

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Плазменное нанесение керамических покрытий на детали ядерных энергетических установок</b>

УДК 621.039.53:621.039.57:621.793.74

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Мюсова Айдана Евгеньевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник группы сопровождения производства	Панов Пётр Николаевич			

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Юрий Юрьевич	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Латышева Е.В.	к.фил.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н..		

Томск – 2019 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	<b>Результат обучения</b> (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженернофизические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Дорофеева Л.И.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Мюсовой Айдане Евгеньевне

Тема работы:

<b>Плазменное нанесение керамических покрытий на детали ядерных энергетических установок</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1538/с от 27.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.05.2019
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – плазмотрон 6-5902.00.00            Режим работы – периодический            Напыляемые материалы – дисилицид молибдена; алюминия окись            Исследуемые технологические параметры процесса напыления:            - рабочее значение тока I;            - напряжение дуги U;            - расход газов G;            - давление на выходе из плазмотрона P;            - внутренний диаметр выходного электрода;            - длина выходного электрода;</p>
---	---

	- материалы электродов
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	Провести анализ влияния параметров плазмотрона на ресурс плазмотрона. Особые требования: оценка безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, экономический анализ.
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	- Презентация
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Обзор литературы. Расчет электродугового плазмотрона	Луценко Ю.Ю.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Е.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p> <p>Обзор литературы</p>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	28.02.2019
---	------------

**Задание выдал руководитель / консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник группы сопровождения производства	Панов П.Н.			
Доцент	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Мюсова Айдана Евгеньевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Мюсовой Айдане Евгеньевне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материалов и должностные оклады: оклад руководителя – 22052 руб Инженера – 9893 руб</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизации – 20%</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1%</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Оценка конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Определение текущих затрат на исследование Определение трудоемкости работ</i>
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Исследуемый электродуговой плазмотрон и расчет электродов плазмотрона повышают ресурсоэффективность производственного процесса</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT анализа*
3. *График проведения и бюджет НТИ*
4. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	4.03.19
---	---------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Латышева Е.В.	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Мюсова Айдана Евгеньевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0AM71	ФИО Мюсовой Айдане Евгеньевне
-----------------	----------------------------------

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Изотопные технологии и материалы

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожарная и взрывная безопасность.</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты</li> </ul>
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Мюсова Айдана Евгеньевна		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования высшее  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла  
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	17.05.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.02.2019	Выдача задания.	
28.02.2019	Обзор литературы.	
15.03.2019	Расчет электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда. Расчет ВАХ.	
22.04.2019	Расчет системы охлаждения плазмотрона.	
29.04.2019	Расчет ресурсов электродов.	
17.05.2019	Сдача работы.	

#### СОСТАВИЛ:

##### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник группы сопровождения производства	Панов П.Н.			

##### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н.		

#### СОГЛАСОВАНО:

##### Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н..		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 106 страниц, 25 таблиц, 34 источников.

Объект исследования: электродуговой плазмотрон с газовихревой стабилизацией дугового разряда, мощностью 16,3 кВт с водяным охлаждением, материалы электродов: анод - медь марки М1, катод – лантанированный вольфрам марки ВЛ-10, используется для плазменного напыления порошковых материалов.

Цель работы: расчет электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда с целью оптимизации ресурса работы плазмотрона для плазменного нанесения керамических покрытий на детали ядерных энергетических установок.

Полученный результат и новизна: плазмотрон повышенной ресурсоэффективности.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: электродуговой плазмотрон с газовихревой стабилизацией дугового разряда, мощностью 16,3 кВт с водяным охлаждением, материалы электродов: анод-медь марки М1, катод – лантанированный вольфрам марки ВЛ-10.

Степень внедрения: используется в производстве.

Область применения: цех 2206, ЭМЗ «Авангард», ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Экономическая эффективность и значимость работы: сокращение расходов на ремонт, замену электродов, настройку плазмотрона путем оптимизации его параметров с целью увеличения ресурса работы.



## Перечень определений

Плазма - образованный из заряженных частиц или из нейтральных атомов частично или полностью ионизированный газ.

Плазмотрон - устройство, в котором электрический ток используется для образования плазмы, которая, в свою очередь, применяется с целью обработки материалов, генератор плазмы.

Радионуклидный источник тепла (РИТ) - радионуклидное энергетическое устройство предназначенное для преобразования энергии спонтанного деления ядра радиоактивного вещества в тепло.

Тепловой блок: - устройство, сочетающее в себе радионуклидный источник тепла(РИТ) и радиоизотопный термоэлектрический генератор(РИТЭГ).

Радиоизотопный термоэлектрический генератор - радиоизотопный термоэлектрический генератор (РИТЭГ) преобразует тепловую энергию, выделяющуюся при естественном распаде радиоактивных изотопов, в электроэнергию.

### Обозначения и сокращения

РИТЭГ – радиоизотопный термоэлектрический генератор;

РИТ – радиоизотопный(радионуклидный) источник тепла;

ТБ – тепловой блок;

КА – космический аппарат;

ЯЭУ – ядерная энергетическая установка;

ТП – термоэлектрический преобразователь.

## Содержание

Введение.....	13
1. Обзор литературы .....	15
1.1. Роль и место покрытий в производстве.....	16
1.2. Назначение керамических покрытий в радиоизотопных источниках тепла РИТ .....	16
1.3. Материалы в РИТ.....	21
1.4. Керамические покрытия из $Al_2O_3$ , $MoSi_2$ .....	23
1.4.1. Покрытие из $Al_2O_3$ .....	23
1.4.2. Покрытие из $MoSi_2$ .....	24
1.5. Плазменный метод нанесения керамического покрытия .....	25
2. Объект исследования .....	28
2.1. Конструкция электродугового плазмотрона.....	28
2.2. Расчет электродугового подогревателя с гладким выходным электродом и вихревой стабилизацией дуги.....	33
2.2.1. Расчет охлаждения катода .....	39
2.2.2. Расчет системы охлаждения анода .....	45
2.2.3. Расчет ресурса работы анода.....	49
2.2.4. Расчет ресурса работы катода .....	50
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 51	
3.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	51
3.2. Анализ конкурентных технических решений.....	52
3.3. SWOT-анализ .....	54
3.4. Планирование научно-исследовательских работ .....	57
3.4.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	57

3.4.2.	Определение трудоемкости выполнения работ .....	58
3.4.3.	Разработка графика проведения научного исследования .....	59
3.4.4.	Бюджет научно-технического исследования.....	61
3.4.5.	Расчет материальных затрат НТИ.....	61
3.4.6.	Амортизация оборудования .....	62
3.4.7.	Основная заработная плата исполнителей темы.....	63
3.4.8.	Отчисления во внебюджетные фонды .....	65
3.4.9.	Накладные расходы.....	66
3.5.	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта...	66
3.6.	Определение ресурсоэффективности исследования.....	67
4.	Социальная ответственность .....	70
4.1.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	71
4.1.1.	Специальные правовые нормы трудового законодательства .....	71
4.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	72
4.2.	Производственная безопасность .....	74
4.3.	Анализ выявленных вредных факторов при разработке проектируемого решения .....	75
4.3.1.	Недостаточная освещенность.....	76
4.3.2.	Повышенная или пониженная температура рабочей зоны .....	76
4.3.3.	Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	77
4.3.4.	Шум и вибрация.....	78
4.4.	Анализ выявленных опасных факторов при разработке проектируемого решения .....	79
4.4.1.	Поражение электрическим током .....	79
4.4.2.	Опасность возникновения пожара или взрыва.....	81

Заключение .....	85
Список использованной литературы.....	87
Список публикаций.....	90
Приложение I.....	91
Приложение II.....	93

## Введение

**Актуальность проблемы.** На внешнюю поверхность силовой герметичной оболочки РИТ наносится защитное покрытие, состоящее из слоев  $Al_2O_3$ ,  $MoSi_2$ . Необходимость применения керамического покрытия на внешней оболочке РИТ из жаропрочных материалов объясняется коррозионной, окислительной стойкостью данных покрытий в условиях потенциальных аварий РИТЭГ.

Метод нанесения керамического покрытия – плазменный, с помощью электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда.

Правильно спроектированное и настроенное оборудование является необходимостью для повышения производительности рабочего процесса цеха 2206 ЭМЗ «Авангард» РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Неправильно спроектированный и настроенный плазмотрон может повлиять на производительность труда участка напыления плазменных покрытий, а также на продолжительность работы электродов.

**Целью работы** является расчет электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда с целью оптимизации ресурсов работы плазмотрона.

**Объект исследования.** Электродуговой плазмотрон с газовихревой стабилизацией дугового разряда 6-5902.00.00.

**Предмет исследования.** Исследование основных характеристик плазмотрона, расчет системы охлаждения электродов, расчет ресурсов работы электродов.

**Практическая значимость результатов ВКР.** Данные расчеты электродугового плазмотрона помогут выявить причину низкого ресурса работы плазмотрона 6-5902.00.00.

Реализация и апробация работы. Данные расчеты будут использованы и внедрены в цехе 2206 ЭМЗ «Авангард» ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ.

## 1. Обзор литературы

С каждым годом увеличивается потребность в новых материалах, обладающих необходимыми свойствами в жестких условиях работы. Существуют два пути решения данной проблемы. Во-первых, создание нового материала, отвечающим предъявляемым требованиям. Во-вторых, модернизация существующих материалов. Плазменное напыление керамических покрытий позволяет сохраняя исходную оболочку «тело» детали придать ей путем нанесения покрытия необходимых свойств. Устройство с помощью которого осуществляется плазменное напыление - плазмотрон. В его камере получают потоки плазмы с помощью плазмообразующего газа с высоко В камере плазмотрона получают потоки плазмообразующего вещества с высокой температурой и энтальпией, которые не достигаются другими средствами, получают плазму практически любого вещества. Ионизированный газ (плазма) обладает новыми свойствами, такими как, электропроводность, высокая энергоемкость и реакционноспособность, обеспечивающих ей применение в различных отраслях техники.

Низкотемпературная плазма находит применение в различных областях науки и техники – в частности такая плазма используется для получения дисперсных порошков (в том числе нанопорошков), для переработки различных видов отходов: радиоактивных отходов, отходов производства органических растворителей, отходов водоочистки и т.д. Также при помощи низкотемпературной плазмы осуществляется нанесение на изделия тугоплавких, ударопрочных и других покрытий. Низкотемпературная плазма используется так же для ионизации проб в масс-спектрометрических исследованиях.

Среди видов нагрева газа, генерация плазмы в плазмотроне имеет ряд преимуществ относительно других видов, таких как с помощью ядерных или химических реакций. Разряд создается с помощью электроэнергии. Она

наиболее доступна и универсальна по сравнению с другими видами энергии. В плазмотроне плазма может быть получена практически из любых веществ. К достоинствам можно отнести широкий диапазон температур нагрева плазмы  $(1-20) \cdot 10^3 \text{K}$  и простоту обслуживания.

### **1.1. Роль и место покрытий в производстве**

Покрытием называют одно- или многослойную структуру, нанесенную на поверхность для защиты от внешних воздействий, таких как давление, температура, коррозия, эрозия и т.д.

Покрытия различают внешние и внутренние. Различие между ними состоит в том, что внешние покрытия имеют границу между покрытием и поверхностью изделия, а во внутренних граница раздела отсутствует. Соответственно из-за внешних покрытий размер изделия увеличивается на толщину покрытия, при этом возрастает масса изделия. В свою очередь во внутренних, размер остаётся неизменным и при этом изменяются свойства изделия [1].

Различают две основные задачи, разрешаемые при нанесении покрытия:

1. Изменение исходных физико-химических свойств поверхности изделий, обеспечивающих заданные условия эксплуатации;
2. Восстановление свойств, размеров, массы, поверхности изделия, нарушенных условиями эксплуатации.

### **1.2. Назначение керамических покрытий в радиоизотопных источниках тепла РИТ**

Повышение срока службы деталей и узлов различных механизмов - основная задача технологии нанесения керамических покрытий

Оптимизация системы покрытия содержит такие задачи как:

- Выбор состава, структуры покрытия;



- Выбор пористости и адгезии с учетом температуры нанесения покрытия и рабочей температуры;
- Совместимость материала подложки и покрытия;
- Доступность и стоимость материала покрытия;
- Возможность возобновления, ремонта и ухода во время эксплуатации покрытия.

Заявленная прочность покрытия должна учитываться в первую очередь при выборе структуры и состава керамического покрытия. При эксплуатации возникают ситуации, когда толщина заявленного покрытия уменьшается из-за недостаточной прочности, что приводит к снижению прочности самой детали. Диффузия материала из покрытия в обрабатываемую поверхность нередко приводит к изменению состава наносимого покрытия и подложки. А температурное воздействие с последующим изменением структуры на микроуровне нередко является причиной остаточных напряжений в покрытии. Необходимо учитывать и воздействие температуры на изменение структуры на микроуровне, что может послужить причиной возникновения остаточных напряжений в покрытии[1].

Выбор системы должен стремиться к сохранению таких свойств:

- Прочность;
- Пластичность;
- ударная вязкость;
- сопротивление усталости;
- сопротивление ползучести после любого воздействия.

Наиболее сильное влияние на механические свойства оказывает эксплуатация в условиях быстрого термоциклирования, а наиболее важным параметром является температура и время ее воздействия на материал; взаимодействие с окружающей рабочей средой определяет характер и интенсивность химического воздействия.

Не каждый материал способен выдержать температурную нагрузку в открытом космосе. Керамические покрытия используются в космических аппаратах (КА) для исследования дальнего космоса. Космические аппараты (КА) для исследования дальнего космоса не имеют альтернативы по энергоёмкости и энергоэффективности радиоизотопным источникам энергии для обогрева и электропитания бортовой аппаратуры. Наиболее широко используются радионуклидные(радиоизотопные) источники тепла (РИТ) на основе плутония-238 (период полураспада 87,7 лет). Тепловые блоки (ТБ), содержащие РИТ, используются для обогрева бортовой аппаратуры. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ), содержащие вышеуказанные ТБ, используются для обеспечения бортовой аппаратуры электрической энергией.

В качестве плазменного напыления керамических покрытий на детали ЯЭУ рассмотрим керамические покрытия силовой оболочки радиоизотопного источника тепла (РИТ).

Необходимость нанесения покрытий прежде всего объясняется влиянием температур и механических нагрузок, поэтому применяются покрытия, обладающие антикоррозионными свойствами при высоких температурах по условиям их потенциальных аварий. Покрытие выполняют двухслойным из таких материалов как,  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Согласно НРБ-99, Федеральному закону от 21.11.1995 №170-ФЗ, Федеральному закону от 09.01.1996 №3-ФЗ, СанПиН 2.6.1.2749-10 и рекомендациям МАГАТЭ по международным правилам тепловые блоки (ТБ) космического назначения должны конструктивно обеспечивать нераспространение радиоизотопов в окружающую среду в случае аварии КА на стартовой площадке или падении в атмосферу Земли в случае неудачного вывода на полетную траекторию.

Для подробного описания конструкции на рисунке 1 изображен радиоизотопный источник тепла (РИТ).

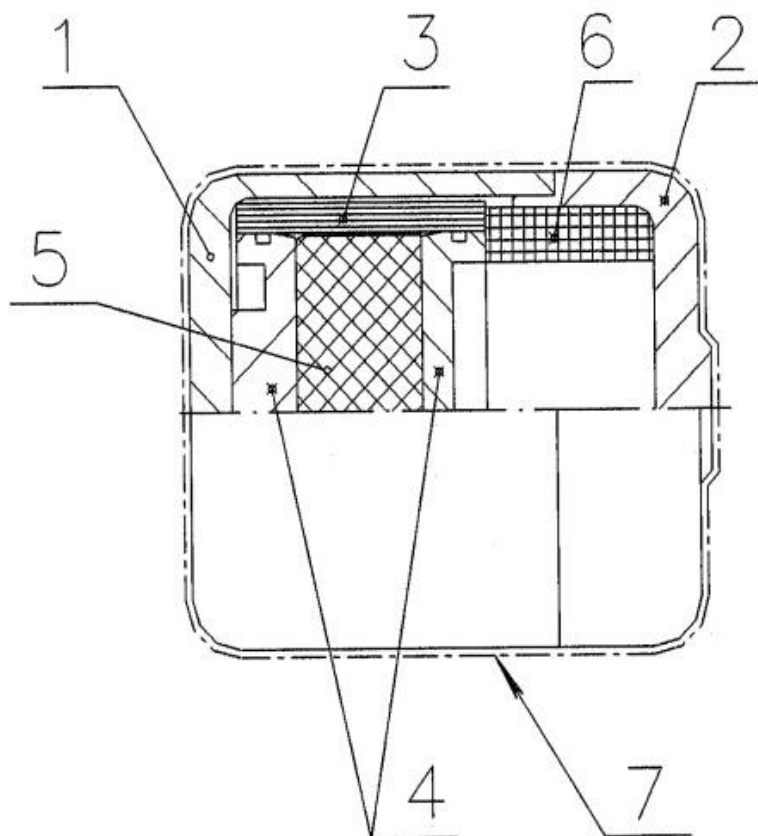


Рисунок 1 – радиоизотопный источник тепла (РИТ), где 1-крышка, 2-капсула, 3- витая оболочка, 4 – крышка, 5 - топливная таблетка из  $^{238}\text{Pu}$ , 6- дистанцирующий элемент, 7 –защитное покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoSi}_2$ .

Силовая герметичная оболочка радиоизотопного источника тепла состоит из корпуса 1 и крышки 2. Капсула 2 устанавливается внутри силовой герметичной оболочки. Корпус капсулы состоит из витой оболочки 3 и крышек 4, топливной таблетки из  $^{238}\text{Pu}$ , дистанцирующего элемента 6. Топливная таблетка устанавливается внутри капсулы. Дистанцирующий элемент размещен между силовой герметичной оболочкой и капсулой и выполняется из упругого материала. Предусмотрена полость, собирающая радиогенный гелий, который образуется капсулой и силовой оболочкой. Основной частью обеспечивающей безопасность и невозможность выхода радиоактивного материала из капсулы и герметичной силовой оболочки является керамическое защитное покрытие, который состоит из двух слоев:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoSi}_2$ [2].

Устройство относится малогабаритным источникам ядерной энергии. При аварийных ситуациях происходит разогрев силовой оболочки РИТ окислительной атмосферой Земли до температур, при которых материал оболочки катастрофически окисляется, что может привести к разрушению герметичной антикоррозионной оболочки РИТ при ударе об поверхность Земли или от внутреннего давления радиогенного гелия. Во избежание этого, внешние силовые оболочки РИТ защищают плотными антикоррозионными керамическими (тугоплавкими) многослойными покрытиями  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Конечный результат - создание радиационно безопасной, компактной и прочной конструкции РИТ и обеспечение наибольшего теплового потока в заданном направлении.

Эксплуатационные требования определяют выбор конструкции устройства. Температурный и механический факторы, действующие при потенциальных авариях, оказывают влияние на стандартные требования эксплуатации. Расплавы и паровая фаза термоэлектрического преобразователя в РИТЭГ являются критерием выбора устойчивых к ним конструкционных материалов. Высокая прочность КМ одна из условий для удержания в капсуле радиоактивного топлива.

Цель конструкционных материалов обеспечить герметичность установки и обеспечить надежность нераспространения ядерного материала в окружающую среду при воздействии образовавшихся факторов.

Существует радиоизотопный источник тепла РИТ-238-3,5 по конструкции похожий на рассматриваемый, но отличие состоит в том, что данный РИТ имеет полость для сбора радиогенного гелия, что повышает габариты РИТ, в случае аварии при разгерметизации высока вероятность радиоактивного загрязнения окружающей среды. На рис.1. Конструкция РИТ предусматривает возможность выполнить корпус капсулы как витую оболочку, что в свою очередь позволит стравливать радиогенный гелий. Изменение в строении конструкции приведёт к снижению внутреннего

давления, влияния разрушающего действия температур, что позволит не допустить радиоактивного воздействия на окружающую среду в случае возможной аварийной разгерметизации оболочки[2].

Цельность и герметичность силовой оболочки в условия плановой эксплуатации приводит к обеспечению удержания радиогенного гелия. В случае аварийной ситуации, защитные функции разрушенной силовой оболочки выполнит капсула, которая за счет своего строения и химического состава обладает коррозионной и окислительной стойкостью.

Особенности конструкции витой оболочки заключаются в применении ленты и крышки. Важную роль играет наличие дистанцирующего элемента между капсулой и силовой оболочкой, выполненного из упругого материала либо металлорезины. В случае выполнения дистанцирующего элемента из металлорезины необходимо изготовить его в виде плоской кольцевой пластины, именно такое конструкторское решение приводит к фиксации капсулы внутри силовой оболочки, движение внутри которой происходит как при транспортировании и эксплуатации, так и при аварийных ситуациях.

Нанесенное на внешнюю поверхность герметичной силовой оболочки защитное покрытие не дает возможность взаимодействовать материалам с расплавом и паровой фазой материалов термоэлектрического преобразователя в условиях аварийной транспортировки РИТЭГ. Данное покрытие выполняет электроизоляционную функцию для условий нахождения РИТ в РИТЭГ.

### **1.3. Материалы в РИТ**

Материал компактной керамической топливной таблетки двуокись плутония или оксид плутония(IV) -  $\text{PuO}_2$ .

Наибольшее объемное выделения тепла и повышенная степень радиационной безопасности достигается при использовании компактной формы топлива. Используется керамическая топливная таблетка из  $\text{PuO}_2$ .

Материал капсулы - нержавеющей сталь 12 Х18Н10Т.

Силовая оболочка РИТ выполнена из борида тантала ТаВ-10, борид-танталовый сплав обладает высокой жаропрочностью, тугоплавкостью, коррозионностойкостью.

РИТ обеспечивает тепловой энергией устройства различного назначения. Тепло выделяется в процессе радиоактивного распада радиоактивного материала  $^{238}\text{Pu}$ . Температура саморазогрева зависит от количества радиоактивного материала, помещенного в радиоактивный источник тепла.

Для недопущения загрязнения окружающей среды, ядерный материал, топливную таблетку помещают внутри капсулы. Образованный радиоактивным распадом плутония гелий стравливается в капсуле, ее внешняя силовая оболочка с защитным керамическим покрытием удерживает давление радиогенного гелия, возрастающего со временем во внутренней полости сбора. Двойная защита в виде силовой оболочки и капсулы в случае аварии не допускает выход радиогенного гелия за пределы внешней силовой защитной оболочки. Силовая оболочка защищает капсулу как внешне так и внутренне, при воздействии механических нагрузок при эксплуатации и аварийных ситуациях. Керамическое покрытие силовой оболочки не дает проникнуть и воздействовать расплавам и парам материалов термоэлектрического преобразователя радиоизотопного термоэлектрического генератора.

Защитное покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoSi}_2$  имеет индивидуальные свойства соответствующие каждому покрытию. Следующий раздел описывает характерные свойства данных керамических покрытий.

## 1.4. Керамические покрытия из $Al_2O_3$ , $MoSi_2$

### 1.4.1. Покрытие из $Al_2O_3$

Оксид алюминия  $Al_2O_3$  — соединение алюминия с кислородом, получено путем нагревания гидроксида алюминия и его солей до температур  $1200^\circ C$ . Оксидные покрытия из окиси алюминия и циркония широко используются в авиатехнике и космотехнике. Также окись алюминия получают из каолинов, бокситов, нефелинов. В свою очередь, из окиси алюминия получают алюминий. Данный материал не растворим в воде, обладает амфотерными свойствами. Окись алюминия в природе встречается в виде корунда (минерал), вид порошка представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Порошок  $Al_2O_3$ .

На практике  $Al_2O_3$  является одним из самых распространенных оксидных керамических материалов. Ниже перечислены основные характеристики данного материала покрытий.

- Электроизоляционные свойства ( $1 \cdot 10^{14}$ - $1 \cdot 10^{15}$   $\Omega \cdot \text{см}$ );
- Механическая прочность – от средней до чрезвычайно высокой (300-630 МПа);
- Высокий предел прочности при сжатии (2000- 4000 МПа);
- Высокая твердость (15-19 ГПа);
- Умеренная теплопроводность (20-30 Вт/(м·К));

- Высокая устойчивость к коррозии и износу;
- Хорошие показатели скольжения;
- Низкая плотность (3,75-3,95 г/см<sup>3</sup>);
- Рабочая температура без механической нагрузки (1000-1500) °С;
- Биоинертность и пригодность для пищевых целей.

#### 1.4.2. Покрытие из MoSi<sub>2</sub>

Дисилицид молибдена MoSi<sub>2</sub> - неорганическое соединение металла молибдена и кремния с формулой MoSi<sub>2</sub>, серые кристаллы, не растворимое в воде. Получают дисилицид путем нагревания смеси порошков молибдена и кремния при температуре 1000-1200°С, вид представлен на рисунке 3.

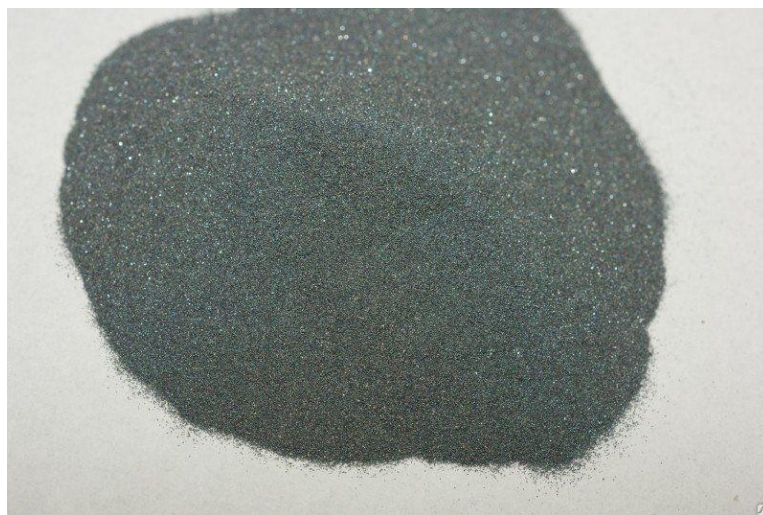


Рисунок 3 - Порошок дисилицида молибдена

MoSi<sub>2</sub> чрезвычайно тугоплавкий и хорошо противостоит окислению воздухом приблизительно до 1700°. Он служит главной составной частью некоторых электронагревательных элементов, которые должны работать на воздухе по крайней мере при 1593°.

Физические свойства дисилицида молибдена:

- Температурой плавления 2050°С;
- плотность 6,24 г/см<sup>3</sup>.



Вследствие высокотемпературного окисления, на поверхности образуется тонкая защитная пленка из стеклообразного диоксида кремния, которая защищает от дальнейшего окисления, чем обусловлена устойчивость к окислению при высоких температурах.

Дисилицид молибдена характеризуется высокой прочностью сцепления с различными материалами.

В настоящее время используются нагреватели высокотемпературные из силицида молибдена типа СМ, ЭСМ, производимые отечественной промышленностью.

Нагреватели высокотемпературные из силицида молибдена типа СМ, ЭСМ предназначены для работы в электрических печах сопротивления с окислительной средой при температуре на рабочей части поверхности нагревателей не более 1660°C. Покрытия из дисилицида молибдена обеспечивают высокую стойкость к коррозии, единственным недостатком является их хрупкость. Лучшее качество покрытия может быть достигнуто шлифованием.

Толщина покрытий варьируется от 0,1 до нескольких мм.

Такие тугоплавкие и энергоемкие материалы как окись алюминия и дисилицид молибдена требуют при нанесении керамических покрытий из данных материалов соответствующую технологию нанесения покрытий. Плазменное напыление наиболее подходящая технология из-за высокой скорости истечения и температуры напыления производимая струей плазмы. Плазматрон позволяет напылять практически любые материалы на обрабатываемую поверхность.

### **1.5. Плазменный метод нанесения керамического покрытия**

Существуют различные методы нанесения покрытий: химический, электрохимический, диффузионный, контактный, плазменный газопламенный, газотермический. Для нанесения керамических тугоплавких

покрытий наиболее подходит плазменный метод, из-за своей распространенности и диапазона нагрева температур.

Различают следующие виды плазмотронов: электродуговой (ЭДП), высокочастотный или индукционно-емкостной (ВСЧ), СВЧ плазмотроны. Преимущество электродугового перед другими состоит в распространенности, простоте обслуживания и эксплуатации, диапазоном температур, работа с любыми газами и с большими мощностями от 300-500 кВт. К недостатками можно отнести ограниченный ресурс работы,

Во всех видах плазмотронов источником нагрева, распыления и ускорения частиц используется плазменная струя. Высокая скорость истечения, температуре напыляется практически любые материалы.

На рисунке 4 приведена обобщенная схема процесса плазменного напыления покрытий. Напыляемый материал, представленный порошком окиси алюминия и дисилицида молибдена, наносится на обрабатываемую поверхность двумя способами: радиально или по оси. Распыляемый материал может иметь вид как порошка, так и проволоки (стержней). Плазменные струй так же имеют различный вид. По типу течения струи выделяют турбулентные и ламинарные, по скорости до- и сверхзвуковые, по направлению закрученные и незакрученные, по подаче непрерывные и импульсные и др.

В современно практике напыления активное применение имеют дозвуковые и сверхзвуковые, осесимметричные, турбулентные плазменные струи.

Для процесса напыления характерно потеря подводимой мощности на нагревание плазмообразующего газа, что приводит к перераспределению и снижению КПД распылителя, которое в результате составляет 0,4-0,75. В условиях напыления порошкового материала КПД имеет ещё более низкие значения, которые колеблется в пределах 0,01-0,15. В условиях применения

напыления проволоки эффективный КПД существенно возрастает и может достигнуть 0,2 – 0,3.

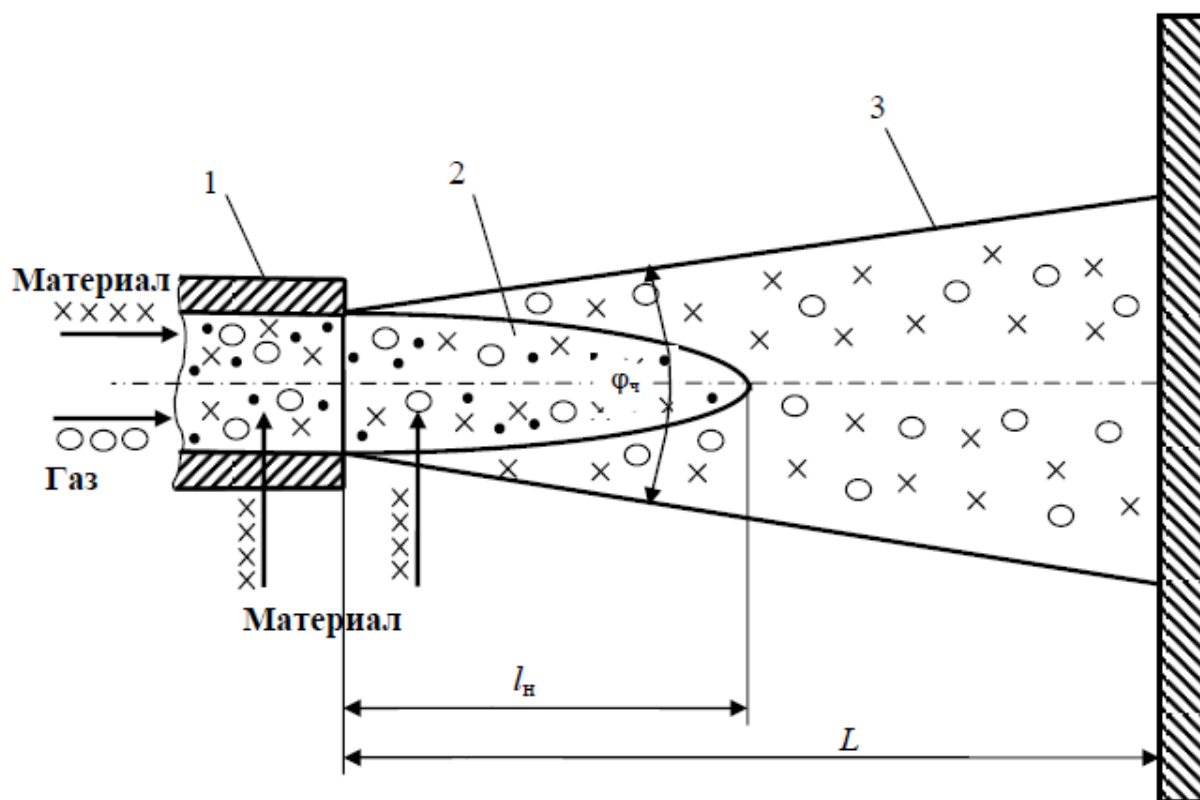


Рисунок 4 - Схема процесса плазменного напыления, где 1 – плазмообразующее сопло, 2 – ядро плазменной струи (начальный участок  $l_n$ ), 3 – основной участок плазменной струи, 4 – напыленное покрытие,  $L$  – расстояние между соплом и обрабатываемой поверхностью.

Удельная энтальпия, температура и скорость в различных сечениях по оси потока является наиболее важными теплофизическим характеристикам плазменных струй, которые определяют оптимальные условия для нагрева, распыления и ускорения напыляемых частиц. Технологичность процесса определяется возможностями изменения характеристик теплофизических параметров струй, что в свою очередь определяет его возможности.

## **2. Объект исследования**

Объектом исследования является электродуговой плазмотрон с газовихревой стабилизацией дугового разряда, мощностью 16,3 кВт с водяным охлаждением, материалы электродов: анод - медь марки М1, катод – лантанированный вольфрам марки ВЛ-10. Используется для плазменного напыления порошковых материалов.

### **2.1. Конструкция электродугового плазмотрона**

Расчет и описание конструкции производится с целью определения геометрии проточной части, параметров потока, что в конечном итоге позволило бы обеспечить надежный поджиг дуги: стабильность горения электрической дуги на оси разрядной камеры, особенно вблизи катодного узла, исключение возможности теплового запираания канала при работе плазмотрона. На рисунке 5 приведена конструкция плазмотрона.

Основным элементом конструкции служит сопло(анод) с внутренним диаметром 6 мм. Катод выполнен из лантанированного вольфрама ВЛ-10, катод из меди М1. Катод, заворачивается медной обоймой. Повышение мощности плазмотрона достигается при силе тока дуги около 500А, что приводит к заметной эрозии стенки электрода, нестабильности плазменной струи, и невоспроизводимости режима напыления[3].

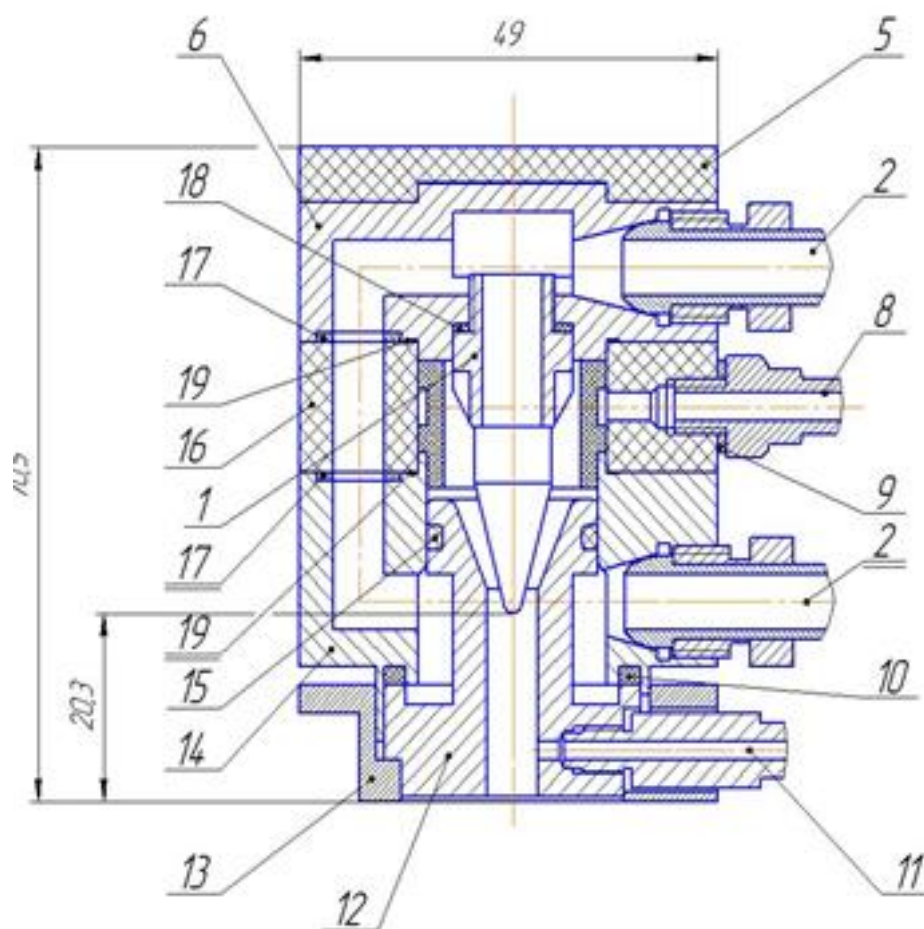


Рисунок 5 – Конструкция ЭДП, где 1 – электрод, 2 – переходник, 5 – корпус верхний, 6 – вставка, 7 – втулка, 8,11 – штуцер, 9,10,18,19 – прокладка, 12 – сопло, 13 – фланец, 14 – корпус нижний, 15 – кольцо, 16 – изолятор, 17 – кольцо, 20 – винт.

Результаты исследований аэродинамики вихревой камеры, проведенных в широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как давление торможения, площадь сечения и количество тангенциальных отверстий в кольце закрутки, а также его диаметр, отнесенный к диаметру выходного электрода, и т.д., позволяют дать ряд следующих полезных рекомендаций по части проектирования этого важного элемента конструкции плазмотрона:

- Отношение диаметра кольца закрутки к диаметру выходного электрода должно составлять 3,5:5;
- Количество отверстий в кольце закрутки желательно иметь не менее четырех и располагать их надо равномерно по окружности: суммарная площадь проходных сечений должна быть такова, чтобы при заданном полном давлении и температуре подаваемого газа его скорость истечения была бы порядка 0,3:0,5 скорости звука;
- Протяженность тангенциальных каналов в кольце закрутки (для получения остронаправленной струи газа) надо выбирать не менее 34 калибров[3].

Величина межэлектродного зазора выбирается, исходя из условий:

- 1) возможности пробоя его напряжением осциллятора;
- 2) гарантированной электрической прочности при наложении максимального рабочего напряжения дуги с учетом ее воздействия на межэлектродный промежуток;
- 3) отсутствия газодинамического запираания потока газа в сечении зазора.

Величина зазора между электродами в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги или стабилизированным уступом составляет  $(2-5) \cdot 10^{-3}$  м, в исследуемом плазмотроне  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м. При следовании данным рекомендациям конструкция обеспечивается хорошей газовихревой стабилизацией электрической дуги и надежным запуском установки.

Практически все экспериментальные данные основаны на снятии характеристик при односоставных газах, в исследуемом плазмотроне тепловая характеристика усложняется из-за двухсоставного плазмообразующего газа.

Рабочий газ, протекая по электродуговой камере, нагревается за счет тепла, выделяемого дуговым разрядом. С газодинамических позиций такая

система представляет собой тепловое сопло. В случае одномерного течения работа теплового сопла хорошо описывается следующим выражением[3]:

$$v^{-1}(M^2 - 1)dv = -a_*^{-2}(k - 1)dQ \quad (1)$$

Где  $v$ - скорость потока;

$a_*=(kRT/\mu_m)^{0.5}$  – скорость звука;

$M$  – число Маха;

$R=8,314 \cdot 10^3$  Дж/(град моль) – универсальная газовая постоянная;

$Q$  – тепло, подводимое к газу извне;

$\mu_m$  – масса одного киломоля рабочего газа;

$T, K$  – температура газа;

$k$  – показатель адиабаты рабочего газа.

Показатель адиабаты рабочего газа вычисляется по формуле[4,5]:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = i + \frac{2}{i}, \quad (2)$$

Где  $c_p$  и  $c_v$  – молярные теплоемкости газа при постоянном давлении, объеме соответственно,  $i$  – число степеней свободы газа.

Ar и He – одноатомные газы, значит  $i=3$ .

Показатель адиабаты по формуле[6]:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = i + \frac{2}{i} = 3 + \frac{2}{3} = 3,66 \quad (3)$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R_0}{\frac{i}{2} R_0} = \frac{\frac{i}{2} R_0 + R_0}{\frac{i}{2} R_0} = 3,66$$

Дозвуковой поток при  $M < 1$  при подводе к нему тепла ускоряется. Вместе со скоростью растет по мере подогрева потока  $M$ . Действительно, по определению  $M \sim vT^{0.5}$ , скорость потока согласно уравнению неразрывности обратно пропорциональна плотности газа  $v \sim \frac{1}{\rho}$ , а плотность, как это следует из уравнения состояния, пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре, т.е.  $Q \sim T^{0.5}/p$ , т.е. число Маха  $M$  растет с увеличением температуры газового потока (давление вниз по потоку

уменьшается). Максимальная скорость, равная скорости звука ( $M=1$ ), достигается в конце сопла[3].

В качестве материала термокатода используется торированный или лантанированный вольфрам. Выбор обусловлен тем, что рабочей средой служит аргон и гелий, т.е химически неактивные к вольфраму газы, а также рабочий ток превышает 200 А (жуков). Переключение полярности в плазмотроне с термокатодом и неподвижным пятном ведет, если не принять специальных мер, к интенсивному разрушению торцевого электрода – анода, т.к. тепловые потери через анодное пятно во много раз больше чем через катодное[7].



## 2.2. Расчет электродугового подогревателя с гладким выходным электродом и вихревой стабилизацией дуги

С целью оптимизации работы электродугового плазмотрона цеха 2206, ЭМЗ «Авангард» РФЯЦ-ВНИИЭФ, необходим расчёт электрических и тепловых характеристик электродугового однокамерного плазмотрона постоянного тока

Таблица 1 – Исходные данные

Исходные данные:		
Мощность	$N_q$ , кВт	16,3
Температура	$T^{\circ}K$	300-8000
Плазмообразующий газ		Ar, He
Расход плазмообразующего газа(Ar)	$G_{Ar}$ , кг/с	$9,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с
Расход плазмообразующего газа(He)	$G_{He}$ , кг/с	$0,5 \cdot 10^{-4}$ кг/с
Общий расход газовой смеси	$G$ , кг/с	$10,3 \cdot 10^{-4}$ кг/с
Рабочий ток	$I$ , А	495
Напряжение	$U$ , В	33
Внутренний диаметр электрода	$d$ , м	$6 \cdot 10^{-3}$
Длина выходного электрода	$l$ , м	$22,34 \cdot 10^{-3}$
Давление на выходе из плазмотрона	$P$ , Н/м <sup>2</sup>	$2,8 \cdot 10^4$

Исходные данные предоставлены цехом 2206, ЭМЗ «Авангард».

Таблица 2 – Показания воды

Температура воды на входе в плазмотрон	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$	8
Температура воды на выходе	$T_{вых}, ^\circ\text{C}$	17
Расход воды на охлаждение	$G_{в}, \text{л/с}$	0,217

Таблица 3 – Экспериментальные значения давление газа на выходе из плазмотрона

$P, \text{кгс/м}^2$	$P, \text{Па}$	$P, \text{кгс/м}^2$	$P, \text{Па}$	$P, \text{кгс/м}^2$	$P, \text{Па}$	$P, \text{кгс/м}^2$	$P, \text{Па}$
0,26	2,549729	0,26	2,549729	0,3	2,941995	0,35	3,4323275
0,26	2,549729	0,26	2,549729	0,3	2,941995	0,35	3,4323275
0,3	2,941995	0,26	2,549729	0,32	3,138128	0,35	3,4323275
0,32	3,138128	0,23	2,2555295	0,26	2,549729	0,35	3,4323275
0,3	2,941995	0,24	2,353596	0,3	2,941995		
0,31	3,0400615	0,22	2,157463	0,3	2,941995		
0,32	3,138128	0,23	2,2555295	0,32	3,138128		
0,33	3,2361945	0,24	2,353596	0,32	3,138128		
0,34	3,334261	0,24	2,353596	0,32	3,138128		
0,24	2,353596	0,24	2,353596	0,33	3,2361945		
0,24	2,353596	0,23	2,2555295	0,33	3,2361945		
0,26	2,549729	0,24	2,353596	0,31	3,0400615		
0,26	2,549729	0,24	2,353596	0,31	3,0400615		
0,26	2,549729	0,28	2,745862	0,31	3,0400615		

Определить: тепловой коэффициент полезного действия  $\eta$ , непрерывный ресурс работы плазмотрона. Требуется провести тепловой расчет элементов плазмотрона.

Воспользуемся системой уравнений[3]

- Вольт-амперная характеристика:

$$U = 1290 \cdot \left(\frac{I^2}{G \cdot d}\right)^{-0.15} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0.3} \cdot (P \cdot d)^{0.25} \quad (4)$$

- тепловой КПД плазмотрона:

$$\frac{(1-\eta)}{\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{I^2}{G \cdot d}\right)^{0,27} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{-0,27} \cdot (\bar{I})^{0.5} \quad (5)$$

- мощность образующая дугу:

$$N_q = U \cdot I \quad (6)$$

- энергия плазменной струи:

$$U \cdot I \cdot \eta = G \cdot (h - h_n) \quad (7)$$

где  $h$ -конечная энтальпия газа на выходе из подогревателя;

$h_n$  – начальная энтальпия газа.

Из-за не замкнутой системы уравнения, необходимо ввести дополнительные условия для взаимосвязи между исходными параметрами.

Отношение длины канала электрода к его внутреннему диаметру происходит из опыта работы с электродуговыми плазмотронами и определяет, что при температуре истекающей струи 3000-4000К и давлении  $P=(1-5) \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, относительная длина выходного электрода принимается равной:

$$\bar{I} = \frac{l}{d} = 20 \quad (8)$$

Внутренний диаметр электрода  $d=0.006$  м. Сравним расчетный и фактический диаметры:

$$d = 1,3 \cdot d_{кр} = 2 \cdot 1,3 \cdot \left( \frac{G}{\pi \cdot \rho_{кр} \cdot a_{кр}} \right)^{0,5} = 2,6 \cdot \left( \frac{10,273 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,4 \cdot 1020} \right)^{0,5} = 0,006 \quad (9)$$

Критическая скорость звука в смеси газов при  $T=3000$ ,  $a_{кр} = 1020 \frac{м}{с}$  [4].

Где критическая плотность смеси газов  $\rho_{кр}$  [5]:

$$\begin{aligned} \rho_{кр} &= \frac{1}{\frac{g_{Ar}/g_{см}}{\rho_{крAr}} + \frac{g_{He}/g_{см}}{\rho_{крHe}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{9,79 \cdot 10^{-4} / 10,273 \cdot 10^{-4}}{531 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,483 \cdot 10^{-4} / 10,273 \cdot 10^{-4}}{69,3 \cdot 10^{-3}}} \\ &= 0,4 \frac{кг}{м^3} \quad (10) \end{aligned}$$

Расчетный внутренний диаметр электрода равен фактическому диаметру.

Критические плотности газов аргона  $\rho_{крAr}$  и гелия  $\rho_{крHe}$ , приведены в таблице 4. [4]

Таблица 4 – Критическая плотность

Газ	Ar	He
Критическая плотность $\rho_{кр}, кг/м^3$	531	69,3

Массовые доли газов:

$$\begin{aligned} m(Ar) &= \frac{g_{Ar}}{g_{см}}; \\ m(He) &= \frac{g_{He}}{g_{см}} \quad (11) \end{aligned}$$

Скорость звука в смеси газов  $a_{кр} = 1020 м/с$  [5];

Энтальпия газовой смеси определяется по формуле [6]:

$$h_{\text{см}} = \frac{g_{\text{Ar}}}{g_{\text{см}}} \cdot h_{\text{Ar}} + \frac{g_{\text{He}}}{g_{\text{см}}} \cdot h_{\text{He}} \quad (12)$$

Согласно [4], энтальпия аргона при  $T=300\text{K}$   $H_{\text{Ar}}=156.02 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$ ;

При  $T=3000\text{K}$   $H_{\text{Ar}}= 1562.26 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$  см. Приложение;

При  $T=8000\text{K}$   $H_{\text{Ar}}= 4019.33 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$  см. Приложение;

Согласно [4], энтальпия гелия при  $T=300\text{K}$   $H_{\text{He}}=156 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$ ;

При  $T=3000\text{K}$   $H_{\text{He}}= 15579 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$  см. Приложение;

При  $T=8000\text{K}$   $H_{\text{He}}= 41100 \cdot 10^3 \text{Дж/кг}$  см. Приложение;

Следовательно по формуле (12):

$$h_{\text{н}} = \frac{9,79}{10,273} \cdot 156,02 \cdot 10^3 + \frac{0,483}{10,273} \cdot 156 \cdot 10^3 = 156,006 \cdot \frac{10^3 \text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$h = \frac{9,79}{10,273} \cdot 1562.26 \cdot 10^3 + \frac{0,483}{10,273} \cdot 15579 \cdot 10^3 = 2,201 \cdot \frac{10^6 \text{Дж}}{\text{кг}};$$

Решим систему по формуле (4) и (5)

$$\begin{aligned} U &= 1290 \cdot \left( \frac{I^2}{G \cdot d} \right)^{-0.15} \cdot \left( \frac{G}{d} \right)^{0.3} \cdot (P \cdot d)^{0.25} \\ &= 1290 \cdot \left( \frac{495^2}{10,273 \cdot 10^{-4} \cdot 0,006} \right)^{-0.15} \cdot \left( \frac{10,273 \cdot 10^{-4}}{0,006} \right)^{0.3} \\ &\quad \cdot (28012,909 \cdot 0,006)^{0.25} = 326,34821 = 326,3\text{В} \end{aligned}$$

$$\frac{(1 - \eta)}{\eta} = 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{I^2}{G \cdot d} \right)^{0.27} \cdot \left( \frac{G}{d} \right)^{-0.27} \cdot (I)^{0.5};$$

$$\begin{aligned} \frac{(1 - \eta)}{\eta} &= 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{495^2}{10,273 \cdot 10^{-4} \cdot 0,006} \right)^{0.27} \cdot \left( \frac{10,273 \cdot 10^{-4}}{0,006} \right)^{-0.27} \\ &\quad \cdot \left( \frac{0,02234}{0,006} \right)^{0.5} \end{aligned}$$

$$\frac{(1 - \eta)}{\eta} = 0,1322489;$$

$$\eta = 0,883198 = 0,88$$

$$N_q = U \cdot I = 326,34821 \cdot 495 = 161542,36 = 0,161\text{МВт};$$

В результате решения получаем  $U=326,35$  В,  $\eta=0,88$ ;

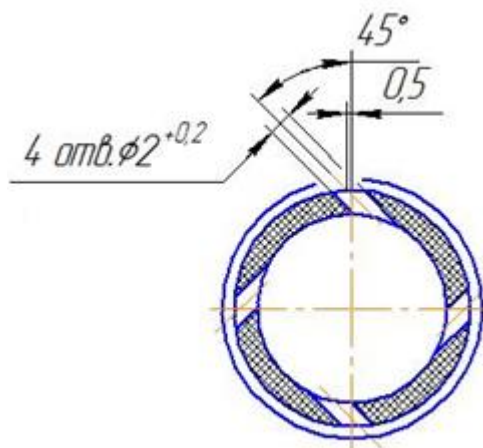


Рисунок 6 – тангенциальные отверстия втулки

Диаметр тангенциальных отверстий, через которые газ подается в вихревую камеру:

$$d_{\phi}=0.002\text{м.}$$

Газовихревая стабилизация дугового разряда является эффективным способом снижения эрозии материала катода. Перемещение пятна дуги с помощью газовихревой закрутки подачи газа не дает локализоваться дуге в одном месте. И для эффективной стабилизации данным способом необходимо обеспечить скорость газа на выходе из отверстий кольца закрутки в пределах  $150 \div 200$  м/с.

По исходным данным количество отверстий  $n=4$ , диаметр каждого из них равен  $d_{\phi}=0.002$  м.

### 2.2.1. Расчет охлаждения катода

Тепловой поток в термокатод от пятна дуги, как показывают эксперименты, является линейной функцией тока[3]:

$$Q_k = 2.34 \cdot I = 2,34 \cdot 495 = 1158,3 \text{ Вт} \quad (13)$$

Исходя из того что значение радиуса обоймы  $r_1=7 \cdot 10^{-3}$  м, находим по формуле значение действительной плотности теплового потока на охлаждаемой стенке катода:

$$q_w = \frac{Q_k}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2} = \frac{1158,3}{2 \cdot \pi \cdot (7 \cdot 10^{-3})^2} = 3.762 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (14)$$

Коэффициент надежности охлаждения показывает отношение критической плотности теплового потока от действительной плотности теплового потока и равен  $k_{\text{охл}}=13$ [3], для получения конструктивно приемлемых значений зазора между электродами.

Зная  $k_{\text{охл}}$  и  $q_w$  найдем критическую плотность теплового потока:

$$q_{\text{кр}} = k_{\text{охл}} \cdot q_w = 13 \cdot 3,762 \cdot 10^6 = 4,8906 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (15)$$

Начальную температуру воды подаваемую в плазмотрон берем из исходных данных с таблицы 2,  $t_{\text{вх}}=8^\circ\text{C}$ , перепад температур в рубашке охлаждения катода  $\Delta t_{\text{в}}=4^\circ\text{C}$ , давление воды в рубашке охлаждения катода соответствует 5атм. или  $P=5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  (опытные данные).

Секундный расход воды необходимый для охлаждения катода определим с помощью формулы[3]:

$$G_{\text{в}} = \frac{Q}{c_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}}} = \frac{1158,3}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 4} = 0,069276316 = 0,07 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (16)$$

где,  $c_{\text{в}}=4,18 \cdot 10^3$  Дж/(кг·град) – удельная теплоёмкость воды.

Средняя температура охлаждающей воды[3]:

$$t_f = 8 + \frac{4}{2} = 10^\circ\text{C}; \quad (17)$$

Температуру насыщения (кипения) воды  $t_{\text{вн}}$  в интервале давлений  $P=(0\div 40) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  определяют по формуле[3]:

$$t_{\text{вн}} = 100 \cdot \sqrt[4]{P \cdot 10^{-5}} = 100 \cdot \sqrt[4]{5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5}} = 149,535^\circ\text{C} \quad (18)$$

Величина недогрева воды до температуры кипения (насыщения)[3]:

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{вн}} - t_{\text{ф}} = 149,535 - 10 = 139,535^\circ\text{C} \quad (19)$$

Определяем требуемую скорость охладителя(воды) в зазоре, при заданных значениях критической плотности теплового потока, статического давления и недогрева воды  $\Delta t_{\text{н}}$  до температуры кипения, величину скорости потока воды в кольцевом зазоре рубашки охлаждения, обеспечивающей заданную теплоотдачу от стенки:

$$V_{\text{в}} = V_{\text{в0}} \left\{ \frac{q_{\text{кр}}}{[q_{\text{в0}}(1 + B \cdot \Delta t_{\text{н}})]} \right\}^2 =$$

$$= 0,15 \cdot \left\{ 4,8906 \cdot \frac{10^7}{[1,3 \cdot 10^6 \cdot (1 + 0,013 \cdot 139,535)]} \right\}^2 = 26,813 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (20)$$

Значения  $V_{\text{в0}} = 0,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $q_{\text{в0}} = 1,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ,  $B = 0,013 \text{ К}^{-1}$ , определены для  $P=5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  с помощью графика на рисунке 7[3].

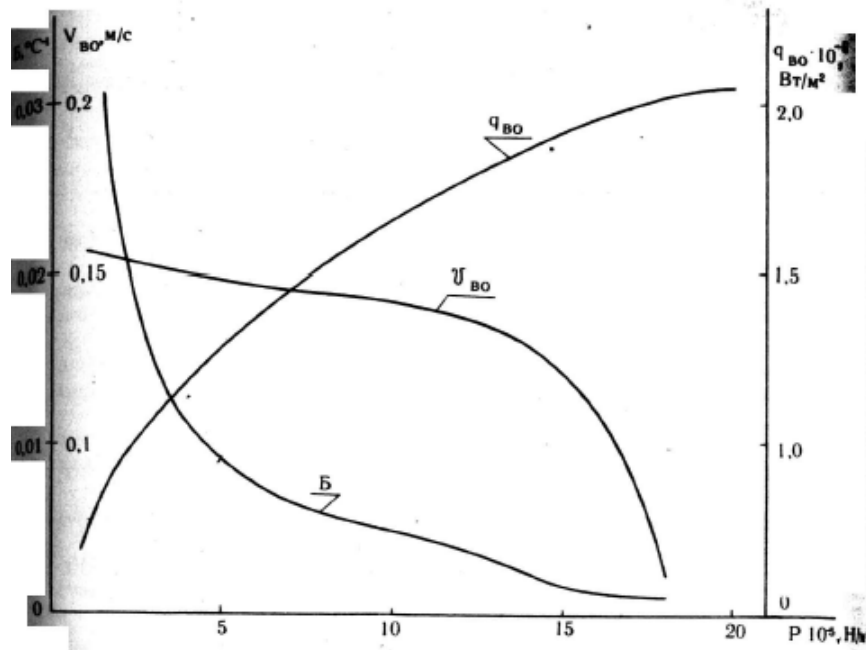


Рисунок 7 – Зависимость  $V_{\text{в0}}, q_{\text{в0}}, B$  от давления  $P$



Для определения режима теплообмена при выбранном значении коэффициента надежности охлаждения нужно сравнить полученную плотность теплового потока с плотностью соответствующей началу насыщения. Режимы теплообмена различают конвективный и пузырьковый.

Число Рейнольдса равно[7]:

$$Re_{ж} = \frac{V_B \cdot d_{\Gamma}}{\nu} = \frac{26,813 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 10^{-6}} = 55860,707 = 55861 \quad (21)$$

При  $Re > 2000$ , что соответствует ламинарному течению жидкости значение величины зазора определяется из уравнения:

$$\delta_B = \frac{G_B}{2 \cdot \pi \cdot r_{\Gamma} \cdot V_B} = \frac{0,2325581}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 \cdot 26,81313} = 2,761 \cdot 10^{-4} \quad (22)$$

Из конструктивных соображений выбираем  $\delta_B = 0,001$  м.

Величина радиуса водоподводящей трубки  $r_{\Gamma}$  выбрана на основе конструктивных решений. Для сохранения скорости потока  $V_B = 26,813 \frac{м}{с}$  необходимо увеличить расход воды до рассчитанного значения  $0,84$  кг/с[3]:

$$G_B = \frac{0,2325581 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{2,761 \cdot 10^{-4}} = 0,8423596 = 0,84 \text{ кг/с} \quad (23)$$

Увеличение расхода охлаждающей воды приведет к изменению температурного перепада до  $0,329^{\circ}C$ .

Средняя температура воды  $t_f = 10 - 0,329 = 9,671^{\circ}C$ .

Направление потока воды в рубашке охлаждения соответствует турбулентному режиму, расчет теплоотдачи производим по формуле согласно турбулентному течению[3]:

$$Nu_{ж} = 0,023 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,4} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (24)$$

Где  $\varepsilon_l$ - коэффициент, который учитывает изменение среднего коэффициента теплоотдачи в зависимости от длины трубы.  $\varepsilon_l = 1,15$  из табл.5

Таблица 5

Re <sub>ж</sub>	l/d <sub>r</sub>								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
1·10 <sup>4</sup>	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
2·10 <sup>4</sup>	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,1	1,05	1,02	1
5·10 <sup>4</sup>	1,34	1,27	1,18	1,13	1,1	1,08	1,04	1,02	1
1·10 <sup>5</sup>	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02	1
1·10 <sup>6</sup>	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

Для охлаждающей воды при температурах  $t_a = 10^\circ\text{C}$  и  $t_w = 149^\circ\text{C}$  числа  $Pr_{ж}$  и  $Pr_w$ , соответствуют значениям(табл):  $Pr_{ж} = 9,3[4]$

$$Pr_w = 1,18[4]$$

Таблица 6 - Теплофизические свойства воды на линии насыщения.

T, °C	Жидкая фаза			
	$\eta \cdot 10^3$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$\lambda \cdot 10^2$ , вт/м·град	$C_p$ , кДж/кг·град	Pr
0	17525	569	4,217	12,99
10	12998	586	4,193	9,3
20	10015	602	4,182	6,96
30	7970	617	4,179	5,4
40	6513	630	4,179	4,32
50	5440	643	4,181	3,54
60	4630	653	4,185	2,97
70	4005	662	4,190	2,54
80	3510	669	4,197	2,2
90	3113	675	4,205	1,94
100	2970	680	4,216	1,73
110	2522	683	4,229	1,56
120	2300	685	4,245	1,43
130	2110	687	4,263	1,31
140	1950	687	4,285	1,22
150	1810	686	4,310	1,14
160	1690	684	4,339	1,07
170	1585	681	4,371	1,02
180	1493	676	4,408	0,97
190	1412	671	4,449	0,94

При расчете  $Nu_{ж}$  из конструктивных соображений принимаем отклонение  $l/d=5$  и предположим что температура охлаждаемой поверхности электрода  $t_w$  равна температуре кипения воды  $t_{вн}$ . При значительном различии рассчитанной величины температуры от заданной расчет производится методом последовательных приближений, принимая каждый раз найденное в предыдущем приближении значение температуры стенки за исходное.

$$Nu_{ж} = 0,023 \cdot 55860^{0,8} \cdot 9,3^{0,4} \cdot \left(\frac{9,3}{1,18}\right)^{0,25} \cdot 1,15 = 678,66 = 679 \quad (25)$$

Следующим этапом после определения числа Нуссельта, идет расчет коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_B = Nu_{ж} \cdot \frac{\lambda_{ж}}{d_{\Gamma}} = \frac{679 \cdot 0,586}{2 \cdot 10^{-3}} = 203598,93 = 2,03 \cdot 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (26)$$

Где  $\lambda_{ж}=0,586$  Вт/(м·К) коэффициент теплопроводности воды при  $t=10^\circ\text{C}$ [4].

Точка теплоотдачи у стенки соответствует началу кипения, вычисляется путем определения плотности теплового потока[3]:

$$q_{нк} = \alpha_B (t_{вн} - t_f) \quad (27)$$

Где  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи, характерный для однофазного теплообмена.

$$q_{нк} = 2,03 \cdot 10^5 \cdot (149 - 10) = 28476128,36 = 2,8 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (28)$$

Так как плотность теплового потока превышает действительную плотность теплового потока  $q_{нк} > q_w$ ,  $2,8 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} > 3,762 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ , охлаждение стенки происходит за счет конвективной теплоотдачи. В этом случае температура стенки (охлаждаемой поверхности) равна[3]:

$$t_w = t_f + \frac{q_w}{\alpha_B} = 10 + \frac{3,76 \cdot 10^6}{2,03 \cdot 10^5} = 28,149 = 28^\circ\text{C} \quad (29)$$

По причине большой численной разницы между принятой в начале расчета температуры стенки и полученного значения в расчетах первого приближения ( $107^{\circ}\text{C}$ ), проведем повторный расчет охлаждения, снизив принимаемую исходную температуру до  $t_w=28^{\circ}\text{C}$ .

Из графика, представленного на рисунке 8 (зависимость построена на основе приложения 1) найдем число Прандтля для воды температуры  $28^{\circ}\text{C}$  во втором приближении  $Pr_w = 5,6$ .

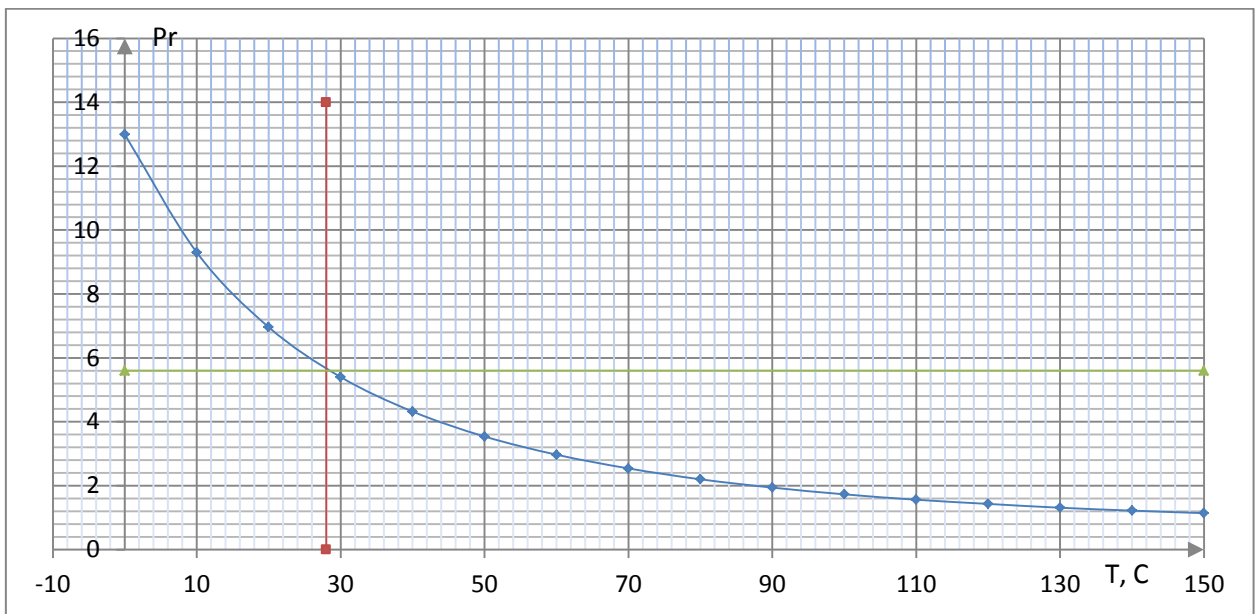


Рисунок 8 – Зависимость  $Pr(T)$ .

Определим число Нуссельта[3]:

$$Nu_{ж} = 0,023 \cdot 55860^{0,8} \cdot 9,3^{0,4} \cdot \left(\frac{9,3}{4,2}\right)^{0,25} \cdot 1.15 = 459,809 = 460 \quad (30)$$

Коэффициент теплоотдачи находим с помощью числа Нуссельта[3]:

$$\alpha_B = Nu_{ж} \cdot \frac{\lambda_{ж}}{d_{\Gamma}} = \frac{460 \cdot 0,617}{2 \cdot 10^{-3}} = 525464,148 = 0,5 \cdot 10^6 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (31)$$

Пояснить значение теплоотдачи у стенки, соответствующую началу кипения, можно определить через плотность теплового потока[3]:

$$q_{нк} = \alpha_B (t_{вн} - t_f) \quad (32)$$

Где  $\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи, характерный для однофазного теплообмена.

$$q_{\text{HK}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot (149 - 9,671) = 73493434,294 = 0,735 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Температура стенки(охлаждаемой поверхности) равна:

$$t_w = t_f + \frac{q_w}{\alpha_B} = 9,671 + \frac{3,76 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} = 16,83 = 17^\circ\text{C} \quad (33)$$

### 2.2.2. Расчет системы охлаждения анода

Расчет полного теплового потока, уносимого в выходной электрод, проводим по формуле[7]:

$$Q = (1 - \eta) \cdot N_d = (1 - 0,96) \cdot 161542,36 = 6039,286 \text{ Вт} \quad (34)$$

Плотность теплового потока в анод это отношение теплового потока к площади внутренней боковой поверхности камеры:

$$q = \frac{(1-\eta) \cdot N_d}{\pi \cdot l \cdot d} = \frac{6039,286}{3,14 \cdot 0,02234 \cdot 0,006} = 14341722,181 = 1,43 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (35)$$

При условии, что давление составляет  $5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  на основе вышеприведенных расчетов температура охлаждаемой стенки анода принимается равной температуре кипения воды и составляет  $149^\circ\text{C}$ .

Расчет максимально допустимого температурного перепада на стенке медного анода производится относительно разницы между температурой плавления вещества металла из которого состоит анод и температурой охлаждающей воды:

$$\Delta t_{\text{max}} = 1083 - 149 = 934^\circ\text{C} \quad (36)$$

Далее необходимо определить максимально допустимую толщину стенки электрода[7]:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{d}{2} \cdot \left\{ \exp \left[ 2\lambda_a \cdot \frac{\Delta t}{q \cdot d} \right] - 1 \right\} = \\ &= \frac{0,006}{2} \cdot \left\{ \exp \left[ 2 \cdot 400 \cdot \frac{934}{1,43 \cdot 10^7 \cdot 0,006} \right] - 1 \right\} = \\ &= 17,707 \text{ м} \quad (37) \end{aligned}$$

Температура плавления меди составляет 1085°C, вероятность перегрева рабочей поверхности медного анода низкая.

Из-за низкой вероятности перегрева толщину стенки электрода решили выбрать меньшей, толщина выбирается не из тепловых свойств, а из-за прочности и доступности. В случае выбора электродов из других материалов обязательно нужно учесть теплопроводность.

Для надежного обеспечения прочности стенки и непрерывной работы принимаем ее толщину 0,014м, определив по формуле действительный температурный перепад возникающий по всей длине гладкого канала выходного электрода[3]:

$$\Delta t = \frac{q \cdot d}{2 \cdot \lambda_a} \cdot \ln \left( \frac{(d+2 \cdot \delta)}{d} \right) = \frac{1.43 \cdot 10^7 \cdot 0.006}{2 \cdot 400} \cdot \ln \frac{(0.006+2 \cdot 0.014)}{0.006} = 186.6^\circ\text{C} \quad (38)$$

Для определения секундного расхода воды, необходимого для охлаждения анода примем начальную температуру охлаждающей воды 8°C, с целью обеспечения достаточного перепада температур (186,6°C) в рубашке охлаждения выходного электрода

$$G_B = \frac{Q}{(c_B \cdot \Delta t_B)} = \frac{6039,286}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 8} = 0,1806 = 0,18 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (39)$$

где  $c_B = 4,18 \cdot 10^3$  Дж/(кг · град) – удельная теплоемкость воды. Примем

$$G_B = 0,232 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \text{ согласно экспериментальным данным таблица 2.}$$

Средняя температура охлаждающей воды:

$$t_f = t_{\text{вх}} + \frac{t_{\text{вх}}}{2} = 8 + \frac{8}{2} = 12^\circ\text{C} \quad (40)$$

Давление потока охлаждающей воды  $P=5 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, температура насыщения при этом давлении:

$$t_{\text{вн}} = 100 \sqrt[4]{5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5}} = 149^\circ\text{C} \quad (41)$$

Величина недогрева воды до температуры насыщения:

$$\Delta t_H = 149 - 12 = 137^\circ\text{C} \quad (42)$$

Определим плотность теплового потока охлаждаемой водой поверхности анода:

$$q_w = q \cdot \frac{d}{d_{\text{внеш}}} = 1,43 \cdot 10^7 \cdot \frac{0,006}{0,014} = 8605033,308 = 8,6 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (43)$$

Коэффициент надежности охлаждения  $k_{\text{охл}}=7$ , находим значение критической плотности теплового потока:

$$q_{\text{кр}} = k_{\text{охл}} \cdot q_w = 7 \cdot 8605033,308 = 60235233 = 6,02 \cdot 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (44)$$

Скорость потока охлаждающей воды[7]:

$$v_B = V_{\text{в0}} \left( \frac{q_{\text{кр}}}{q_{\text{в0}} \cdot (1+B \cdot \Delta t_H)} \right)^2 = 0,15 \left( \frac{6,02 \cdot 10^7}{1,3 \cdot 10^6 \cdot (1+0,013 \cdot 137)} \right)^2 = 41,4 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (45)$$

Где значения  $V_{\text{в0}} = 0,15 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $q_{\text{в0}} = 1,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ,  $B = 0,013 \text{ К}^{-1}$ , определены для  $P=5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  с помощью графика [рис.7]

Величина водяного зазора в рубашке охлаждения определяется[3]:

$$\delta_B \geq \frac{G_B}{\pi \cdot V_B \cdot d_{\text{внеш}} \cdot \rho_{\text{ж}}} = \frac{0,2325581}{\pi \cdot 41,431 \cdot 0,02 \cdot 1000} = 0,0001276 \quad (46)$$

Паспортное значение соответствует расчетному условию и равно:

$$\delta_B = 0,001 \text{ м.}$$

Для увеличения точности расчета значения температуры охлаждаемой поверхности и проверки соответствия режима её охлаждения необходимо найти значения трех критериев подобия  $Re_{\text{ж}}$ ,  $Nu_{\text{ж}}$ ,  $Pr_{\text{ж}}$ .

Находим число Рейнольдса, критерий подобия течения вязкой жидкости[3]:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{V_B \cdot d_{\Gamma}}{\nu} = \frac{41,431 \cdot 2 \cdot 0,001}{0,000000129} = 637806,15 = 6,37 \cdot 10^5 \quad (47)$$

Где  $\nu=12,992 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость воды при  $t=12^\circ\text{C}$ [4].

При расчете  $d_{\Gamma} = 2 \cdot \delta_B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Число Нуссельта, тепловой критерий подобия[3]:

$$\begin{aligned} Nu_{ж} &= 0,023 \cdot (Re_{ж})^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,4} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_w}\right)^{0,25} = 0,023 \cdot (6,37 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot \\ &8,8^{0,4} \cdot \left(\frac{8,8}{1,14}\right)^{0,25} = 2932,976 \end{aligned} \quad (48)$$

Где  $Pr_{ж} = 8,8$  при  $t=12^\circ\text{C}$  [4],  $Pr_w = 1,14$  при  $t = 149^\circ\text{C}$  [4].

Определив тепловой критерий подобия  $Nu_{ж}$ , рассчитаем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_B = \frac{Nu_{ж} \cdot \lambda_a}{d_r} = \frac{2932,976 \cdot 0,586}{2 \cdot 0,001} = 859362 = 8,6 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (49)$$

Где  $\lambda_a = 0,586 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  – теплопроводность воды при  $t=12^\circ\text{C}$ [5].

Вычисление плотности теплового потока, соответствующая началу кипения:

$$q_{нк} = \alpha_B \cdot (t_{вн} - t) = 8,6 \cdot 10^5 \cdot (149 - 12) = 1,03 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (50)$$

$q_{нк} > q_w$ , из этого следует, что охлаждение стенки происходит за счет конвективной теплоотдачи. Определим температуру охлаждаемой поверхности:

$$t_w = t + \frac{q_w}{\alpha_B} = 12 + \frac{8,6 \cdot 10^6}{8,6 \cdot 10^5} = 22,013 = 22^\circ\text{C} \quad (51)$$

Температура внутренней поверхности анода:

$$t_3 = t_w + \Delta t = 22 + 186,578 = 208,592 = 208,6^\circ\text{C} \quad (52)$$

Расчет систем охлаждения электродов показал, что охлаждение водой эффективно. Температура стенки анода  $208^\circ\text{C}$ , температура стенки катода  $17^\circ\text{C}$ , это свидетельствует оптимальному нормальному охлаждению потоком воды. Разница температур объясняется разницей материалов электродов и температурой плавления.



### 2.2.3. Расчет ресурса работы анода

Метод определения длины эрозии канала крупномасштабным шунтированием основан на сопоставлении формы и размеров эрозии разностороннему треугольнику, где основанием является ширина крупномасштабного шунтирования, а высотой – предельно допустимая глубина выработки толщины стенки анода[11]

При работе на воздухе в диапазоне токов (100-500)А и расходов газа (10-70)·10<sup>-3</sup> кг/с длина зоны эрозии равна (3-5)·d. Допустимая глубина выработки выбиралась из соображений прочности[8].

Для данного случая принимается:

- внутренний диаметр анода  $d=6 \cdot 10^{-3}$  м;
- расход смеси газов  $G=10,273 \cdot 10^{-4}$  кг/с;
- рабочий ток  $I=495$  А);
- длина эрозированной зоны  $\Delta l_{\text{эр}}=4 \cdot d$ ;
- глубина допустимой выработки (при  $\delta=14 \cdot 10^{-3}$  м)  $h_{\text{эр}}=10 \cdot 10^{-3}$  м.

Согласно предложенным выше данным объем эрозированного материала[9]:

$$\begin{aligned} V_{\text{эр}} &= 2 \cdot \pi \cdot h_{\text{эр}} \cdot d \cdot \left( d + \frac{2}{3} h_{\text{эр}} \right) = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 0,006 \cdot \left( 0,006 + \frac{2}{3} \cdot 0,01 \right) = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} \end{aligned} \quad (53)$$

Плотность медного электрода  $\rho_a=8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>[], масса уносимого материала равна:

$$m_a = \rho_a \cdot V_{\text{эр}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 4,8 \cdot 10^{-6} = 0,04272 = 0,043 \text{ кг} \quad (54)$$

Удельная эрозия медного электрода:

$$\bar{G}_{\text{уд}} = \frac{m}{I \cdot \tau_a} = 5 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \quad (55)$$

Время работы составит[3]:

$$\tau = \frac{m}{I \cdot \bar{G}_{уд} \cdot 3600} = \frac{0,043}{495 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 3600} = 47,6986144 = 47,7 \text{ч} \quad (56)$$

#### 2.2.4. Расчет ресурса работы катода

Диаметр вольфрамового катода при значении рабочего тока  $I=495 \text{ А}$ :

$$\begin{aligned} d_k &= \frac{1,3 \cdot 10^{-4} \cdot I^{0.5}}{(1 - 2,15 \cdot 10^{-2} \cdot I^{0.5})} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 495^{0.5}}{(1 - 2,15 \cdot 10^{-2} \cdot 495^{0.5})} = \\ &= 0.0055445 = 0,006 \text{ м} \quad (57) \end{aligned}$$

Расчетный диаметр катода соответствует паспортному значению диаметра катода.

Удельная эрозия вольфрамового электрода[10]:

$$\bar{G}_{уд} = 10^{-11} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

Плотность вольфрамового электрода  $\rho_k=19,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

Глубина выработки вставки  $\Delta l_k = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Время работы катода:

$$\tau_k = \frac{\rho_k \cdot \pi \cdot d_k^2 \cdot \Delta l_k}{I \cdot \bar{G}_{уд} \cdot 4} = \frac{19,1 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 0,006^2 \cdot 0,003}{495 \cdot 10^{-11} \cdot 4} = 32729,6834 \text{с} = 9,09 \text{ч} \quad (58)$$

При расчете основных характеристик электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда получили КПД  $\eta=0,13$ . Расчетные геометрические данные совпали с паспортными. При расчете системы охлаждения электродов водой температура внешней стенки анода составил  $t_w=$  , температура стенки катода составил. Ресурс работы анода составил 47,7 ч, при ресурсе работы катода 9,7ч. Малый ресурс работы катода и является причиной низкого ресурса работы всего плазмотрона.

### **3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

#### **3.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

В данной научно-исследовательской работе рассмотрена плазменное нанесение керамических покрытий на детали ядерных энергетических установок. Низкотемпературная плазма находит применение в различных областях науки и техники – в частности такая плазма используется для получения дисперсных порошков (в том числе нанопорошков), для переработки различных видов отходов: радиоактивных отходов, отходов производства органических растворителей, отходов водоочистки и т.д. Также при помощи низкотемпературной плазмы осуществляется нанесение на изделия тугоплавких, ударопрочных и других покрытий. Низкотемпературная плазма используется так же для ионизации проб в масс-спектрометрических исследованиях. Все эти процессы являются высокотехнологичными и требуют точного контроля технологических параметров плазменной струи (температура, концентрация ионов и электронов и др.). В дипломной работе в качестве устройства напыления покрытия используется электродуговой плазмотрон с газовихревой стабилизацией разряда. Существуют основные виды конструкции таких плазмотронов: ПН-6 с МЭВ, плазмотрон фирмы «Зульцер» с самоустанавливающейся длиной дуги, плазмотрон со стабилизацией разряда уступом, ПУН-1, плазмотрон со сверхзвуковым соплом.

Можно привести несколько примеров заинтересованных в этой области исследований предприятий:

- ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»;
- Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю. А. Гагарина;
- ПО «Маяк»

### 3.2. Анализ конкурентных технических решений

Основными конкурентами электродуговых плазмотронов (ЭДП) являются: высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ) плазмотроны и лазерные плазмотроны. Вид используемой в генераторе плазмы энергии также является одним из первых признаков классификации.

Высокочастотные плазмотроны являются безэлектродными и используют индуктивную или ёмкостную связь с источником мощности. Поскольку для прохождения высокочастотной мощности сквозь стенки разрядной камеры, последняя должна быть выполнена из непроводящих материалов, в качестве таковых, как правило используется кварцевое стекло или керамика. Поскольку для поддержания безэлектродного разряда не требуется электрического контакта плазмы с электродами, применяют газодинамическую изоляцию стенок от плазменной струи, что позволяет избежать их чрезмерного нагрева и ограничиться воздушным охлаждением. Рассмотрим основные достоинства и недостатки данных видов плазмотронов.

СВЧ плазмотроны основаны на сверхвысокочастотном разряде, как правило в резонаторе, сквозь который продувается плазмообразующий газ.

Таблица 7. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ЭДП</sub>	Б <sub>ВЧ</sub>	Б <sub>СВЧ</sub>	К <sub>ЭДП</sub>	К <sub>ВЧ</sub>	К <sub>СВЧ</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,05	4	5	3	0,2	0,25	0,15
2. Удобство в эксплуатации	0,02	5	4	3	0,1	0,08	0,06
3. Ресурс работы	0,02	3	5	4	0,06	0,1	0,08

Продолжение таблицы 76

4. Энергоэкономичность	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,20
5. Надежность	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
6. Область рабочих давлений	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
7. Безопасность	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
8. Функциональная мощность	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
9. Простота эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
10. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,02	3	5	4	0,06	0,1	0,08
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	3	3	5	0,3	0,3	0,5
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
3. Цена	0,12	4	5	3	0,48	0,6	0,36
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Финансирование научной разработки	0,1	3	4	5	0,3	0,4	0,5
Итого	1	62	61	55	4,15	3,91	3,84

К преимуществам электродугового плазмотрона следует отнести: удобство в эксплуатации установки, широкий работы области рабочих давлений, перспективность технологии, функциональную мощность, простоту эксплуатации и уровня проникновения на рынок (ввиду распространенности вида), предполагаемый срок эксплуатации. Однако электродуговой плазмотрон имеет ряд недостатков в сравнении с другими видами плазмотронов, а именно: высокое потребление электроэнергии, низкий ресурс работы электродов, устарение конструкции (невозможность полного подключения к ЭВМ).

### 3.3. SWOT-анализ

**SWOT** – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Проведем SWOT-анализ электродугового плазмотрона. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 8.

Таблица 8. Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Простота монтажа и эксплуатации установки С2. Различные режимы работы. С3. Долгий срок эксплуатации С4. Распространенность.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Маленький ресурс работы электродов Сл2. Низкая актуальность исследований
<b>Возможности:</b> В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив В2. Усовершенствование установки В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами		
<b>Угрозы:</b> У1. Появление более актуальных конструкций плазмотрона У2. Малый спрос на установку.		

Второй этап заключается в том, что необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с

различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	-	+	+	+
	B3	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1		Сл2	
	B1	-		-	
	B2	-		-	
	B3	-		-	
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1		Сл2	
	У1	+		+	
	У2	-		-	

Таблица 10. SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	С1. Простота монтажа и эксплуатации установки С2. Различные режимы работы. С3. Долгий срок эксплуатации С4. Распространенность.	Сл1. Маленький ресурс работы электродов Сл2. Низкая актуальность исследований

<p><b>Возможности:</b>  В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив  В2. Усовершенствование установки  В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами</p>	<p>Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как долгий период эксплуатации и простота монтажа.</p>	<p>В свою очередь маленький ресурс работы электродов, а также низкая актуальность может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Появление более актуальных методик  У2. Малый спрос на установку.</p>	<p>Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.</p>	<p>Угрозы могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности, так как малый спрос и появление более актуальных методик могут сыграть свою роль.</p>

По результатам SWOT-анализа делаем вывод о том, что преимущества разрабатываемой технологии преобладают над её недостатками. Сильные стороны проекта могут понизить процент угроз исследования.



### 3.4. Планирование научно-исследовательских работ

#### 3.4.1. Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 11. Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор материалов по теме	Руководитель
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Изучение материалов и литературы	Руководитель, студент
	6	Расчет	Руководитель, студент
	7	Исследование опытных образцов	Руководитель, студент
	8	Сопоставление результатов расчета с паспортными данными	Руководитель, студент
	9	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Студент

### 3.4.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (59)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$t_{ож1} = \frac{3 \cdot 5 + 2 \cdot 8}{5} = 6,2 \text{ дн.} \quad (60)$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \quad (61)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

$$T_{pi} = \frac{6,2}{1} = 6,2 \text{ раб.дн.}$$

### 3.4.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (62)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (63)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году; 104

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году; 14

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округлены до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} \approx 1.48$$

Таблица 12. Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\min}$ , чел-дни	$t_{\max}$ , чел-дни	$t_{\text{ожг}}$ , чел-дни			
1	5	8	6,2	Руководитель	6,2	10
2	10	14	11,6	Студент	11,6	18
3	3	5	3,8	Студент	3,8	6
4	5	7	5,8	Студент	5,8	9
5	1	3	1,8	Руководитель, студент	0,9	2
6	14	20	16,4		8,2	13
7	5	7	5,8		2,9	5
8	3	5	3,8	Руководитель, студент	1,9	3
9	5	8	6,2		3,1	5
10	1	3	1,8	Студент	0,9	2
Итого:			64		14,6/30,5	73

Таблица 13 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_k$ , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ														
				Март			Апрель			Май			Июнь					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2				
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	10	■														
2	Подбор материалов по теме	Руководитель	18		■													
3	Выбор направления исследований	Руководитель	6			■												
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	9				■											
5	Изучение материалов и литературы	Студент, Руководитель	2					■										



где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$Ц_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 14.

Таблица 14. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Ручка	шт	3	17	51
Бумага для печати	шт	1	270	270
CD-диск	шт	1	40	40
Итого				361

### 3.4.6. Амортизация оборудования

В данном пункте рассчитывается амортизация компьютерного оборудования и принтеров, необходимых в исследовательской работе.

Расчет амортизации проводился следующим образом:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (65)$$

где  $H_A$  – норма амортизации;

$n$  – срок полезного использования в количествах лет;

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 40000}{12} \cdot 4 = 660 \text{ руб.}, \quad (66)$$

где  $I$ – итоговая сумма в руб.;

$m$  – время использования в месяцах;

Результаты расчета амортизации используемой техники представлены в таблице 15.

Таблица 15 - Расчет амортизации компьютерного оборудования

№	Наименование изделия	Кол-во единиц изделия	Цена единицы изделия, руб.	Общая стоимость изделия, руб.
1	Компьютерное оборудование	1	40000	40000
Норма амортизации				20 %
Амортизация				660 руб.

### 3.4.7. Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИТ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (67)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата;

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (68)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (69)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 16 Расчетный годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	104	104
-праздничные дни	14	14
Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени: - отпуск	56	56
- невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	191	191

Количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 56 дней составляет  $M = 10,4$  месяца. Тогда,

для руководителя:  $Z_{дн} = \frac{43001 \cdot 10,4}{191} = 2341$  рублей

для инженера:  $Z_{дн} = \frac{19291 \cdot 10,4}{191} = 1050$  рублей

Основная заработная плата:



Для руководителя:  $Z_{осн} = 2341 \cdot 7,4 = 17323$  рублей

Для инженера:  $Z_{осн} = 1050 \cdot 15,95 = 16747$  рублей

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (70)$$

где  $Z_{ТС}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{ТС}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5

Для руководителя:  $Z_M = 22052 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 43001$

Для инженера:  $Z_M = 9893 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 19291$

Таблица 17. Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{ТС}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_p$	$k_d$	$Z_M$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	Т раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	22052	0,3	1,3	0,2	43001	2341	14,6	34178
Инженер	9893	0,3	1,3	0,2	19291	1050	30,5	32025

Таблица 18. Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Магистр
Основная зарплата, руб	34178	32025
Итого по статье $C_{зн}$ , руб	66203	

### 3.4.8. Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (80)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды;

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%

$$Z_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot 66203 = 17941 \text{ рублей}$$

Таблица 19. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Сумма отчислений
Руководитель проект	34178	0,271	9262
Инженер	32025	0,271	8678
Итого			17941

### 3.4.9. Накладные расходы

Научное исследование проводились 60 дней по 3 часа, мощность установки 0,35 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C_{\text{эл}} = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} \quad (81)$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию;

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$  – время использования компьютерного оборудования, ч.

Тариф на промышленную электроэнергию для «Электромеханического завода Авангард» составляет 3,71 руб. за 1 кВт ч.

$$C_{\text{эл}} = 3,71 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 0,35 = 233,73 \text{ руб.}$$

### 3.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта. Бюджет затрат приведен в таблице 20.

Таблица 20. Затраты научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИИ	361
2. Амортизация	660
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	66203
4. Отчисления во внебюджетные фонды	17941
5. Накладные расходы	233,73
6. Бюджет затрат НИИ	85398,73

### 3.6. Определение ресурсоэффективности исследования

Определение ресурсоэффективности происходит на основе расчета интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования. Данный показатель можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_i^n a_i \cdot b_i,$$

где

$I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности заносим в таблицу 21

Таблица 21. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1
1. Производительность	0,3	5
2. Энергосбережение	0,2	4
3. Надежность	0,4	5
4. Материалоемкость	0,1	4
ИТОГО	1	

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,1 = 4,7 \quad (82)$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при высокой производительности и надежности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (83)$$

где  $I_{финр}^{исп.i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Таблица 22. Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп. 1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7
3	Интегральный показатель эффективности	0,21

Сравнение значений интегральных показателей эффективности

позволяет делать вывод о том, что вид плазмотрона электродуговой является наиболее эффективным.

В данном разделе проведен анализ конкурентных технических решений в результате которого наиболее конкурентоспособным оказался электродуговой плазмотрон. По результатам SWOT-анализа делаем вывод о том, что преимущества разрабатываемой технологии преобладают над её недостатками. Сильные стороны проекта могут понизить процент угроз исследования. Были определены трудоемкость выполнения работ, бюджет НИИ, расчет материальных затрат НИИ, посчитана амортизация основного компьютерного оборудования, определены зарплаты сотрудников, в результате которого определен бюджет затрат научно-исследовательского проекта.

#### **4. Социальная ответственность**

Социальная ответственность – это объективная необходимость, которая отвечает за нарушение социальных норм. Этот раздел выражает характер взаимоотношений личности с обществом, государством, с коллективами и другими социальными группами, то есть всеми окружающими ее людьми.

В данной магистерской диссертации приведены данные по оптимизации работы электродугового плазмотрона путем расчета основных показателей его работы. Рассчитываемое устройство относится к плазменным технологиям. Работа проводилась в цехе 2206, ЭМЗ «Авангард» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Данная работа подразумевает собой выполнение следующих видов задач:

Расчет вольт-амперной характеристики электродугового плазмотрона с газовихревой стабилизацией дугового разряда ;

Расчет системы охлаждения катода плазмотрона;

Расчет системы охлаждения анода плазмотрона;

Расчет ресурсов работы электродов.

На данный момент в цехе 2206 используются несколько электродуговых плазмотронов. Расчет и оптимизация работы плазмотрона позволит снизить ресурс работы электродов, повысит производительность труда участка напыления покрытий.

В данном разделе планируется провести анализ факторов производственной среды и принятие решений для улучшения условий труда. Для чего будут проанализированы вредные и опасные факторы производства: поражение электрическим током, недостаточная освещенность, воздействие электромагнитного излучения, а также влияние микроклимата.

## **4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

В Российской Федерации вопросы, относящиеся к организации и охране труда при работе за компьютером, регулируются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. При работе инженера-конструктора с персональным компьютером очень важную роль играет соблюдение правильного режима труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

### **4.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 при работе на персональном компьютере определяются следующие требования:

1. К работе на персональном компьютере допускаются лица, прошедшие обучение безопасным методам труда, вводный инструктаж, первичный инструктаж на рабочем месте;
2. Работник обязан:
  - Выполнять только ту работу, которая определена его должностной инструкцией;
  - Содержать в чистоте рабочее место;
  - Соблюдать меры пожарной безопасности;
  - Соблюдать режим труда и отдыха в зависимости от продолжительности, вида и категории трудовой деятельности.
3. Длительность рабочей смены не более 8 ч (480 мин);

4. Установление 2 регламентированных перерывов, учитываемых при установлении нормы выработки: длительностью 20 мин через 1 – 2 ч после начала смены, длительностью 30 мин примерно через 2 ч после обеденного перерыва;
5. Обеденный перерыв длительностью не менее 40 мин примерно в середине смены. Регламентированные перерывы должны использоваться для активного отдыха и лечебно-профилактических мероприятий и процедур. [12]

При 12 часовой рабочей смене регламентированные перерывы должны устанавливаться в первые 8 часов работы аналогично перерывам при 8-часовой рабочей смене, а в течение последних 4 часов работы, независимо от категории и вида работ, каждый час продолжительностью 15 минут. [12]

Таблица 23 – Время регламентированных перерывов при работе на компьютере

Категория работы	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с компьютером			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	Группа А, количество знаков	Группа Б, количество знаков	Группа В, часов	При 8-часовой смене	При 12-часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2,0	30	70
II	до 40 000	до 30 000	до 4,0	50	90
III	до 60 000	до 40 000	до 6,0	70	120

#### **4.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Анализ условий труда в лаборатории является одной из основных задач организации рабочего места. Организация рабочего места заключается в выполнении ряда мероприятий, обеспечивающих рациональный и



безопасный трудовой процесс, и эффективное использование орудий и предметов труда, что повышает производительность и способствует снижению утомляемости работающих.

Удобное и рациональное расположение органов управления позволяет исключить лишние движения. Рабочие места операторов выполняем также с учетом требований технической эстетики:

- планировка рабочего места избавляет работающих от лишних и утомительных трудовых движений, и обеспечивает удобную рабочую позу;
- рабочее место обеспечено инструментами и приспособлениями, необходимыми для работы, а также для личной безопасности; вблизи рабочего места установлены ящики или шкафы для хранения инструмента и личных вещей;
- рабочее место в соответствии с санитарными нормами освещено и проветрено, постоянно содержится в чистоте; не захламлено, нет хаотичного хранения инструмента и материалов.

Рабочее место инженера-конструктора должно отвечать требованиям к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ для взрослых пользователей [13]:

1. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 - 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.
2. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.
3. Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:
  - ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
  - поверхность сиденья с закругленным передним краем;

- высоту опорной поверхности спинки  $300 \pm 20$  мм, ширину не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости 400 мм;
  - угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах  $\pm 30$  градусов;
4. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы. [14]

Создание благоприятных условий труда и правильное оформление рабочих мест, имеет большое значение, как для облегчения труда, так и для повышения его привлекательности, положительно влияющей на производительность труда.

#### 4.2. Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Все эти факторы могут воздействовать на сотрудника лаборатории, проводящего исследование. В таблице 24 представлен этап разработки, который может привести к воздействию вредных или опасных факторов.

Таблица 24 – Основные элементы производственного процесса, формирующего вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003 – 2015)	Этап разработки	Нормативные документы
1. Поражение электрическим током	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [19]
2. Вероятность возникновения пожара	+	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85

или взрыва		ССБТ Пожарная безопасность [20]
3. Недостаточная освещенность	+	<a href="#">СП 52.13330.2011</a> Естественное и искусственное освещение [16]
4. Повышение уровня электромагнитного излучения	+	ГОСТ 12.1.006 – 84. Электромагнитные поля радиочастот [14]
5. Повышенная или пониженная температура рабочей зоны	+	СанПиН 2.2.4 – 548 – 96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [15]
6. Шум и вибрация	+	ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум[24] ГОСТ 31192.2-2005 (ИСО 5349-2:2001) Вибрация[254]

Работа по разработке проводилась за персональным компьютером. Можно отметить следующие вредные факторы:

- Недостаточная освещенность;
- Повышение уровня электромагнитного излучения;
- Пониженная или повышенная температура рабочей зоны;
- Шум и вибрация

Опасные факторы, которые могут возникнуть при выполнении данной работы:

- Опасность поражения электрическим током;
- Опасность возникновения пожара;

#### **4.3. Анализ выявленных вредных факторов при разработке проектируемого решения**

Основные параметры, характеризующие вредные условия труда это: недостаточная освещенность, повышенная или пониженная температура

рабочей зоны, повышенный уровень электромагнитного излучения, повышенный шум и вибрация.

#### **4.3.1. Недостаточная освещенность**

Среди технических требований к автоматизированным рабочим местам оператора особенно важным является требование к освещенности, которая значительно влияет на эффективность трудового процесса. Недостаточная освещенность способствует возрастанию нагрузки на органы зрения и приводит к утомляемости организма. Поэтому необходимо обеспечить оптимальное сочетание общего и местного освещения [16].

Естественное освещение должно удовлетворять СП 52.13330.2011 [16]. Нормы естественного освещения установлены с учетом обязательной регулярной очистки стекол световых проемов не реже двух раз в год (для помещений с незначительным выделением пыли, дыма и копоти). В данной лаборатории производятся работы средней точности IV (минимальная величина различия составляет от 0.5 до 1 мм). Следовательно, согласно СП 52.13330.2011 необходимо создать искусственное освещение при системе общего освещения не ниже 200 лк, при системе комбинированного освещения не ниже 400 лк в соответствии с разрядом зрительной работы.

Необходимо предусмотреть на окнах солнцезащитные устройства, например, жалюзи, предотвращающие проникновение прямых солнечных лучей, которые создают на рабочих местах резкие тени.

#### **4.3.2. Повышенная или пониженная температура рабочей зоны**

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей. Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в

течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности.

Нормы учитывают:

- Время года – холодный и переходный ( $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже), теплый ( $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше) периоды;
- Категорию работ – легкая, средней тяжести и тяжелая;
- Характеристику помещения по тепловому облучению.

Отклонения микроклимата от нормы, могут вызвать:

- Повреждения или нарушения состояния здоровья;
- Общие и локальные ощущения теплового дискомфорта;
- Напряжение механизмов терморегуляции;
- Ухудшению самочувствия и понижению работоспособности

Для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата на рабочем месте должны быть предусмотрены защитные мероприятия:

- Установка систем местного кондиционирования воздуха;
- Оборудование комнат отдыха, в которых обеспечены оптимальные параметры микроклимата;
- Регламентация рабочего времени.

#### **4.3.3. Повышенный уровень электромагнитного излучения**

Повышенный уровень электромагнитных излучений, и его оценка проводится при выполнении работ любым электрическим оборудованием.

Источниками электромагнитных излучений на автоматизированном рабочем месте оператора являются компьютеры, щиты управления, панели сигнализации. В данной работе обработка полученных данных проводилась при помощи компьютера.

При длительном воздействии электромагнитных полей (ЭМП) возможны появления чувства тяжести и головная боль в височной и затылочной областях, ухудшение памяти, повышенная утомляемость,

раздражительность, расстройства сна. Расстройства в состоянии здоровья работающих, обусловленные функциональными нарушениями в деятельности нервной и сердечно-сосудистой системы [18].

Обязательным требованием к помещениям, где размещены рабочие места с персональными компьютерами, является оборудование помещений защитным заземлением. В этих помещениях следует проводить ежедневную влажную уборку и после каждого часа работы на ЭВМ необходимо проводить систематическое проветривание помещения.

Предельно допустимый уровень напряженности воздействующего ЭП равен 25 кВ/м. Пребывание в ЭП напряженностью более 25 кВ/м без средств защиты не допускается.

Мероприятия по снижению влияния ЭМП на организм человека:

- Соблюдение безопасных расстояний от электросетей;
- Заземление электрооборудования, приборов;
- Использованием оборудования с меньшими уровнями энергопотребления.

Средства коллективной защиты от ЭМП включают в себя:

- Оградительные устройства;
- Защитные покрытия;
- Герметизирующие устройства;
- Знаки безопасности.

#### **4.3.4. Шум и вибрация**

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха,

осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на компьютере уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ[24,25]

#### **4.4. Анализ выявленных опасных факторов при разработке проектируемого решения**

##### **4.4.1. Поражение электрическим током**

Несоблюдение правил эксплуатации электрооборудования, кабелей связи, компьютеров может привести к возможности поражения электрическим током.

Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. Проходя через его организм, электрический ток производит термическое, электролитическое, биологическое и механическое (динамическое) действия.

Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, а также в нагреве до высоких температур других органов. Электролитическое действие тока выражается в разложении органических жидкостей и вызывает значительные нарушения их физико-химического состава. Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биоэлектрических процессов. Механическое (динамическое) действие тока выражается в повреждениях различных тканей организма, стенок кровеносных сосудов, сосудов легочной ткани в результате электродинамического эффекта.

Работа с использованием электрического оборудования может быть безопасна, если все работающие соблюдают правила технической эксплуатации и техники безопасности. Безопасность электрических установок достигается применением следующих способов индивидуальной и коллективной защиты:

- Заземление, электрическое соединение с заземляющим устройством металлических частей;
- Защитное отключение, обеспечивающее автоматическое отключение всех фаз аварийного участка с момента возникновения замыкания или ухудшения изоляции;
- Изоляция частей, находящихся под напряжением в местах, где может произойти непосредственный контакт с человеком. Изоляция частей является наиболее распространенной мерой электробезопасности, однако за изоляцией нужно постоянно следить и поддерживать ее в исправном состоянии;
- Применение средств коллективной защиты – заземление установки [19].

Самый распространенный способ защиты от поражения током при эксплуатации измерительных приборов и устройств - защитное заземление, которое предназначено для превращения «замыкания электричества на корпус» в «замыкание тока на землю» для уменьшения напряжения прикосновения и напряжения шага до безопасных величин (выравнивание потенциала).

Чтобы исключить опасность поражения необходимо соблюдать следующие правила электробезопасности:

- перед включением прибора в сеть должна быть визуально проверена его электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей на корпус;
- при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети устройство и устранить неисправность;



- запрещается включать и выключать устройство при помощи штепсельной вилки. Штепсельную вилку включать и выключать из розетки можно только при выключенном устройстве [19].

#### **4.4.2. Опасность возникновения пожара или взрыва**

Эксплуатация компьютерной техники сопряжена с опасностью в виде различного рода возгораний, поэтому пожарная безопасность при работе с компьютером очень важна.

Возникновение пожара в кабинете может быть обусловлено следующими факторами: в современных ПК очень высокая плотность размещения электронных схем. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество тепла, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 100 °С. При этом возможно оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение, как следствие – короткое замыкание, сопровождаемое искрением.

Следовательно, для целей обеспечения пожарной безопасности эксплуатация ПК связана с необходимостью проведения обслуживающих, ремонтных и профилактических работ. При этом используются различные смазочные материалы, легковоспламеняющиеся жидкости, прокладывают временные электропроводки, ведут пайку и чистку отдельных узлов и деталей. Также всегда есть вероятность дополнительной пожарной опасности, которая требует соответствующих мер пожарной профилактики.

Пожарная профилактика – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара. Успех борьбы с пожаром во многом зависит от его своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по его ограничению и ликвидации.

Пожарная безопасность при работе на автоматизированном рабочем месте оператора предусматривает осторожность при обслуживающих, ремонтных и профилактических работах, так как во время таких работ использование различных смазочных материалов, легковоспламеняющихся жидкостей, прокладок, временных электропроводок крайне опасно, как и проведение пайки и чистки отдельных узлов и деталей. Избежать дополнительной пожарной опасности поможет соблюдение соответствующих мер пожарной профилактики. Прокладка всех видов кабелей в металлических газонаполненных трубах – отличный вариант для предотвращения возгорания. [20].

Мероприятия по пожарной профилактике:

- Организационные мероприятия включают в себя противопожарный инструктаж рабочих и служащих, издание приказов по пожарной безопасности и т.д.;
- Соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании помещений, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения и правильное размещение оборудования;
- Мероприятия режимного характера: запрещение курения в неустановленных местах, производства огневых работ в помещении;
- Технологически эксплуатационные: современные профилактические осмотры и испытания оборудования.

Для тушения пожаров используются воздушно-механическая пена, углекислый газ, а также галогидрированные углеводороды. Так как основная опасность – неисправность электропроводки, то при пожаре необходимо немедленно обесточить электросеть в помещении. Главный рубильник должен находиться в легкодоступном месте. До момента выключения рубильника, очаг пожара можно тушить сухим песком или углекислотными

огнетушителями. Типы огнетушителей: ГОСТ 12.4.009 – 75, согласно МЮ РФ 27.06.2003г., № 4838, устанавливаются в количестве [20]:

- 1 огнетушитель порошковый ОП – 10,
- 2 огнетушитель порошковый ОП – 20;
- 2 углекислотно – бромэтиловый огнетушитель ОУБ – 7.

В случае аварийной ситуации, а также обнаружении какой-либо неисправности, создающей угрозу оператору, необходимо остановить проведение работы. Руководитель должен быть извещен о прекращении работы в связи с аварийным состоянием установки. Запрещается запускать установку до устранения всех неисправностей. В случае возгорания или взрыва необходимо отключить подачу электропитания, вызвать пожарную охрану и действовать согласно плану ликвидации аварий.

В данном разделе «Социальная ответственность» рассмотрены основные вопросы по сохранению безопасности персонала на рабочих местах. Предложенные меры способствуют сохранению здоровья персонала и способствуют увеличению его работоспособности.

Требуемые меры и средства защиты в чрезвычайных ситуациях способны максимально обезопасить предприятие и персонал от различных видов ущерба. Меры пожарной и электробезопасности предохраняют персонал от аварий крупного масштаба.

Административный и производственный персонал должны обеспечить:

- постоянное улучшение состояния промышленной безопасности, охраны труда;
- достижение уровня промышленной безопасности;
- повышение эффективности производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности
- совершенствование процедур подготовки и реализации программ в области промышленной безопасности, охраны труда и охраны окружающей

среды, обеспечивающие постоянное выявление и решение наиболее важных задач промышленной безопасности;

## Заключение

Применение вольфрамовых катодов несет в себе дополнительные ограничения в работе плазмотроне. Для недопущения окисления поверхности катода, и низкого ресурса работы электрода, для повышения качества напыляемого покрытия рабочей средой вольфрамого катода выбирают инертную. Так же применяют специальные присадки вольфраме, но со временем содержание присадок снижается, увеличивая работу выхода из электронов, возникает эрозия.

Эрозия в основном локализована на аноде, причиной тому является низкий ресурс работы вольфрамового катода, локализация пятна дуги на одном и том же месте. Эффективное перемещение пятна дуги по стенке электрода возможно газовихревой стабилизацией разряда с помощью тангенциальных отверстий. Более подробное изучение локальных и интегральных характеристик для снижения эрозии из-за аэродинамических процессов. Предлагаемые пути оптимизации ресурса работы плазмотрона включает в себя:

- Расширение внутреннего диаметра выходного электрода;
- Баланс давления смеси газов на входе в плазмотрон;
- Расщепить радиальный канал дуги на несколько токопроводящих каналов;
- Перемещение дуги с помощью электродинамических сил

Качественное плазменное нанесение керамических покрытий на детали ядерных энергетических установок, а точнее малогабаритных источников ядерной энергии РИТЭГ, позволит повысить прочность внешнего защитного покрытия, тем самым сохраняя герметичность силовой оболочки. Характерные свойства керамического покрытия не допускают выхода радиоактивного материала наружу.

Кроме того, в разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был проведен анализ

конкурентных технических решений в результате которого наиболее конкурентоспособным оказался электродуговой плазмотрон. Были определены трудоемкость выполнения работ, бюджет НИИ, расчет материальных затрат НИИ, посчитана амортизация основного компьютерного оборудования, определены зарплаты сотрудников, в результате которого определен бюджет затрат научно-исследовательского проекта.

В разделе «Социальная ответственность» описываются вредные факторы влияния ПВЭМ, а также в соответствии с нормативными документами, описаны правила безопасной работы людей с персональным компьютером и разработаны меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

## Список использованной литературы

1. Кравцова Е.Д., Э.М.Никифорова. Технология нанесения и свойства покрытий – Красноярск: СФУ, 2008 – 75с.
2. Пустовалов А.А, Шаповалова В.П, Лазаренко Ю.В. Малогабаритные ядерные источники электрической энергии. – Москва: Энергоатомиздат, 1992.- 207с.
3. Жуков М.Ф. – Основы расчета плазмотронов линейной схемы Академия наук СССР Сибирское отделение Институт теплофизики – Новосибирск, 1979, 146 с.
4. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б., - Справочник по физико-техническим основам криогеники - Энергоатомиздат, Москва, 1973, 430 с.
5. Диденко В.Н. – Газовые смеси. Смешение газов. Методическое пособие– ИГТУ, 2002, 40 с.
6. Жуков М.Ф, Коротеев А.С., Урюков Б.А. – Прикладная динамика термической плазмы, Академия наук СССР Сибирское отделение Институт теплофизики, Новосибирск, 1975, 300 с.
7. Клименко Г.К., Ляпин А.А. – Генераторы плазмы, методические указания, изд. МГТУ им.Н.Э. Баумана, Москва, 2010, 65с.
8. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
9. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
10. Теория столба электрической дуги / Низкотемпературная плазма. Т.1. Новосибирск: Наука СО, 1990. 376 с.
11. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт. М.: «Машиностроение», 1993. 295 с.

12. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
13. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергия, 1981. – 590 с.
14. ГОСТ 12.1.006-84. Нормы уровней напряженности электрических полей.
15. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
16. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
17. ГОСТ 12.1.005–88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху
18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
19. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
20. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
21. Об охране атмосферного воздуха: федеральный закон от 4 мая 1999 г. № 96–ФЗ (ред. от 25 июня 2012 г. № 93–ФЗ) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1999. – № 18.– Ст. 2222 ; 2012. – № 26. – Ст. 3446.
22. ГОСТ 17.1.3.13–86. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнений.
23. О санитарно – эпидемиологическом благополучии населения: федеральный закон от 30 марта 1999 г. №52 - ФЗ (ред. От 25 июня 2012 г. №93-ФЗ) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1999. - №14. – Ст. 1650; 2012. - №26. – Ст. 3446



24. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности.
25. ГОСТ 31192.2-2005 (ИСО 5349-2:2001) Вибрация. Измерение локальной вибрации и оценка ее воздействия на человека.
26. W.R.Corliss and D.G.Harvey, Radiotopic Power Generation, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1964.
27. Ponomarev-Stepnoi N.N. Nuclear energetics in space. Atomic Energy, 1989, v. 66, No. 6.
28. Lazarenko J.V., Pustovalov A.A., Shapovalov V.P. Small-dimension nuclear electric energy sources, M.: Energoatomizdat, 1992.
29. Pustovalov A.A. Mini RTG on Plutonium-238: Development and Application. The 18 th International Conference on Thermoelectrics (ICT-99), Baltimore, Maryland, USA, 1999.
30. Pustovalov A., Polyakov V., Nikulichev V. Certification of Plutonium-238 Radionuclide Power Sources for «Mars-96» International Mission, Space Bulletin, 1995, v. 2, No 4.
31. Pustovalov A., Gusev V., Borschevsky A., Chmielewsky A. Experimental Confirmation of Milliwatt Power Source Concept. International Conference on Thermoelectric, ICT-99, Baltimore, USA, 1999.
32. Robert D. Abelson «Space Mission and Application», Thermoelectric Handbook ed. D.M. Rowe, USA, 2005. 8. Pustovalov A.A., Gusev V.V., Pankin M.I.
33. «State, field of application and prospects of use of radionuclide thermoelectric generators (RTG) on base of plutonium-238 for exploration of the Solar system planets», International Conference «Nuclear energy in space», Moscow-Podolsk, 2005.
34. Certificate on a safety use of RHU «Angel» in structure of spacecraft «Mars-96» № ФСС КТ 1 34.01-1.4-6 942- 01.95 from 15.06.95.

## Список публикаций

1. Луценко Ю. Ю. , Мюсова А. Е. , Зеленецкая Е. П. Взаимосвязь длины канала высокочастотного факельного разряда с его тепловой мощностью // Физическая электроника: материалы X Всероссийской конференции, Махачкала, 24-27 Октября 2018. - Махачкала: ДГУ, 2018 - С. 66-69
2. Мюсова А. Е. , Луценко Ю. Ю. Определение характеристик факельного разряда, используемого в процессах плазменной переработки веществ // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов , Томск, 19-23 Ноября 2018. - Томск: Графика, 2018 - С. 52
3. Мюсова А. Е. , Луценко Ю. Ю. Особенности процесса горения высокочастотного разряда в восстановительных средах // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов , Томск, 19-23 Ноября 2018. - Томск: Графика, 2018 - С. 36
4. Мюсова А. Е. , Луценко Ю. Ю. Температурные характеристики высокочастотного факельного разряда, горящего в смеси атомарного и молекулярного газа // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов , Томск, 19-23 Ноября 2018. - Томск: Графика, 2018 - С. 51

Теплофизические свойства. Энтальпия He

T, K	h, кДж/кг
<b>300</b>	<b>156</b>
500	1143
1000	3895
2000	9348
2500	11425
<b>3000</b>	<b>15579</b>
3500	19000
4000	21500
4250	22500
4500	23000
4750	23500
5000	24300
5250	25000
5750	28000
6000	29700
6250	30000
6750	33000
7000	35000
7500	37500
8000	41100

Теплофизические свойства. Энтальпия газа Ar

T, K	h, кДж/кг	h, Дж/кг
<b>290</b>	<b>156</b>	<b>156000</b>
500	241	241000
1000	501	501000
2000	1021	1021000
2500	1281	1281000
<b>3000</b>	<b>1541</b>	<b>1541000</b>
4000	2061	2061000
4500	2321	2321000
5000	2581	2581000
5500	2841	2841000
6000	3102	3102000
7000	3636	3636000
8000	4218	4218000

Вязкость смеси газов He-Ar

T, °C	0	20	40	60	80	100
20	221,1	226,1	228,4	226	214,5	194,9
100	268,4	274,2	274,3	270,1	238,9	228,1
200	320,8	325,6	324,6	318,1	301,9	267,2
250	344,8	350,2	348,1	338,2	318,8	285,3

Теплопроводность бинарных газовых смесей He-Ar

T, °C	0	20	40	60	80	100
0	163	267	402	587	877	1405

## Приложение II

(справочное)

### Plasma application of ceramic coatings on parts of nuclear power plants

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Мюсова А.Е.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник группы сопровождения производства	Панов П.Н.			

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ИЯТШ-2

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель	Шайкина О.И.			

## Abstract

Plasma application of ceramic coatings on parts of nuclear power plants is a necessary technology for space exploration. Ceramic coatings are applied to the power sealed shell of the radioisotope heat source. The coating has a heat resistance, corrosion resistance under extreme conditions of operation in outer space.

Brief review of the practical applications of radionuclide thermoelectric generators (RTG) for research of planets and Deep Space in conditions, where use of solar batteries because of the big remoteness from the Sun is inefficient, is surveyed.

More than 40-years experience of RTG use in Space has shown their obvious advantages: high reliability and long service life, compactness, stability of parameters irrespective of external conditions and from a level of light exposure. Basic characteristics of RTG "Angel" developed earlier within the framework of the International project "Mars - 96" for spacecraft "Mars - 96" are listed.

The importance of RTG application for space missions of 21 century is emphasized, especially in structure of probes, landed on surface of planets of Solar system (rovers, autonomous stations etc.).

## Introduction

Beginning of application of RTG in the space dates from middle of the last century. In USA these works were keeping under the SNAP program (System for Nuclear Auxiliary Power). In USSR such type activity was conducting under «Orion» program and then under "BUK" and "Topaz" programs concerning reactor energy plants [25-27].

Advisability and perspectivity of RTG application for space research is dictated by their unique characteristics: high reliability, non-failure operation, a long functioning in conditions of outer space at maintenance of stability of output parameters irrespective of orientation in space and of an illumination level. The

last factor should be especially taken into account at a planning the space expeditions for exploration of the planets distant from the Sun (Jupiter, Saturn, Neptune, Pluto).

As a radionuclide for the present-day space application RTG Pu-238 is used, which possesses a high specific energy-release (0,57 W/g), a long half-life period (87,7 years), a low radiation emission (equivalent dose rate from neutron and gamma rays), that allows to refuse use of additional radiation protection in the RTG on base of Pu-238 and to develop rather a compact RTG with a small weight and a long service life.

The first RTG on the basis of Pu-238 (SNAP-3B) was launched by USA «Transit-4A». That RTG electric power was 2,7 W and mass was 2,1 kg [25].

Till the end of 1960-th in USA a number of RTG of SNAP series (SNAP-9A, SNAP-19, SNAP-27, MHW, CPHS) was developed, which have found a wide application for Deep space exploration.

In USSR strategy of use of nuclear power plants (NPP) in Space was focused, mainly, on the reactor-type NPP with direct (thermoelectric and thermoemission) conversion. Till middle of 1960-th thermoelectric NPP «BUK» of 3 kW electric power was developed and in the beginning of 1970-th thermoelectric NPP «Topaz» of 6,0 kWel was designed. From 1970 to 1988 31 NPP «BUK» were launched in structure of satellites of the “Kosmos” series. NPP «Topaz» were launched in 1987-1988 in structure of spacecrafts «Kosmos-1818» and «Kosmos-1867. Launchings of Polonium-210 based RTG in USSR took place in 1965 in structure of satellites «Kosmos-84» [26].

Besides RTG the compact radionuclide heat units (RHU) equipped with a small amount of plutonium fuel (several grams) have found an application in the space. Such units are used only for heating scientific apparatus and the other equipment with the purpose of maintenance of the necessary heat mode during its operation on the planets surface.

History and state of the works in the field of RTG development in USA and Russia

RTG developed in USA have found wide application in research of planets of Solar system and Deep Space. Thus RTG-SNAP-27 were used for realization of seven lunar expeditions under the program "Apollo" in the period from 1969 till 1972 and they have worked in structure of the scientific equipment placed on the Moon surface from 5 up to 7 years.

RTG SNAP-19 were put in spacecrafts Pioneer-10 and Pioneer-11 (1972-1973) and have worked in conditions of deep space for about 30 years at a distance more than 80 A.U. (1010 km) from the Earth. RTG SNAP-19 was used in the landing Martian modules (1977) - the program "Viking". In structure of spacecrafts "Voyager-1" and "Voyager-2" (1977) RTGs of MHW-RTG series with 170 W electric power were used. During more than 20-years voyage in the space spacecrafts «Voyager-1,2» studied from the transit orbit and took the first photographs of Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune. Communication with the Earth was keeping continually as long as the spacecrafts had left the Solar system.

The most significant space missions with use of RTG of GPHS-RTG series (fig. 9) were the following:

- Galileo – exploration of Jupiter and its satellites (launch in 1989)
- Ulisses – investigation of polar areas of the Sun (launch in 1980);
- Cassini – exploration Saturn and its satellite Titan (launch in 1997);
- mission New Horizons – exploration of Pluto planet (launch in 2006).

Table 25 presents the general parameters of RTG on base of Pu-238, developed in USA.



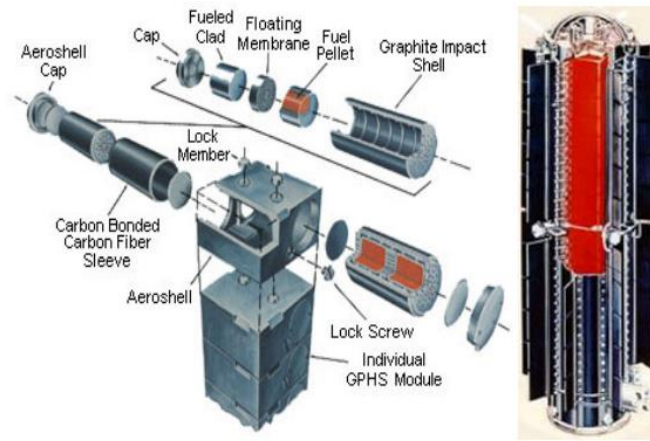


Fig. 9 Radionuclide Heat Assembly design GPHS and RTG GPHS-RTG

Table 25

Parameter	SNAP-3B	SNAP/19	MHW	GPHS-RTG
Electric power, W	2,7	40	170	300
Output voltage, V	5,6	30	30	30
Heat power, W	53	610	2400	4500
Mass of PuO <sub>2</sub> , kg	0,12	1,230	4,8	9
Efficiency, %	4,5	6,5	6,7	6,7
Mass, kg	2,1	15	36	60
Specific power, W/kg	1,3	2,7	4,7	5
Service lifetime, years	5	10	10	15

In addition to RTGs the RHUs of 1 Wel. were used instruction of spacecrafts Galileo, Cassini, of Mars rovers Pathfinder, Opportunity, Spirit. At that there were 3...8 heat units in the Mars rovers, whereas for spacecrafts Galileo and Cassini amount of RHU rose up to 120 units.



Fig. 10 Radionuclide Heat Unit LW RHU

Since in USSR strategy of nuclear energy sources development was based on designing reactor plants on kilowatt energy level, therefore development of the space application RTG was carrying out on a limited scale. Nevertheless to the middle of 80-th of the last century a complex energy plant on base of plutonium-238 named as “Visit” (fig. 11) was developed under program of the longterm exploration of Mars planet. There was applied in structure of that plant RTG of 40 Wel., heat power from which (near 600 W) was transmitted to a heat exchanger.

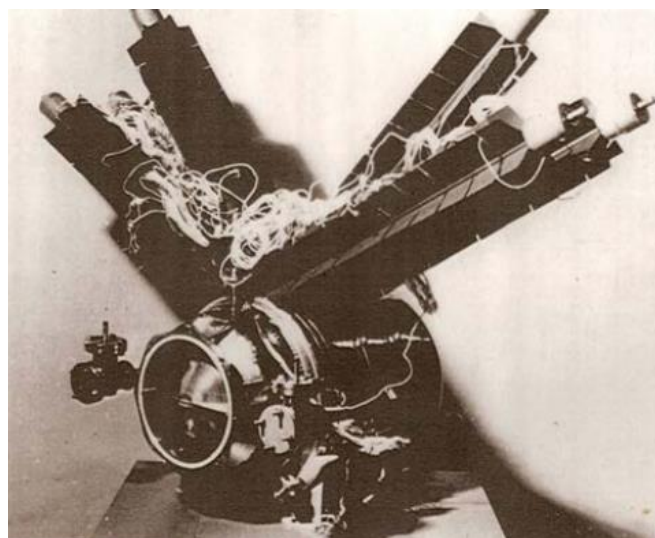


Fig. 11 Complex energy plant on base of plutonium-238 «Visit»

To that time in USSR a number of the key problems of development of space application TRG was solved, i.e. manufacturing capabilities on industrial production of plutonium-238 and of structural materials, as well as technology of fabrication of the cascade-type thermoelectric converters on base of high-

temperature (Si-Ge) and middletemperature (PbTe-GeTe) semiconductor materials were elaborated.

Later on in USSR development of the plutonium-238 RTG was carrying out only for the ground application, including for electric supply of the implantable electric cardiostimulators [29].



Fig. 12 Radionuclide Energy Sources for electric cardiostimulator: RECS-D, Gemma-2.

A new urgency of RTG use in the space had emerged in Russia in frame of International project «Mars-96», when need of a long-time energy feeding small autonomous stations (SAS) landed on Mars appeared. For this purpose RTG of 0,2 W electric power and heat unit of 8,5 Wheat were developed. These RTG and RHU for use in structure of SAS of spacecraft «Mars-96» were named as RTG and RHU «Angel» [30].

In Europe at the present time development of RTG and RHU is not performing though European Space Agency (ESA) examines possibility of use of RHU “Angel” in framework of “Exomars” program and later on, maybe, use of RTG on 4...5 W electric power level.

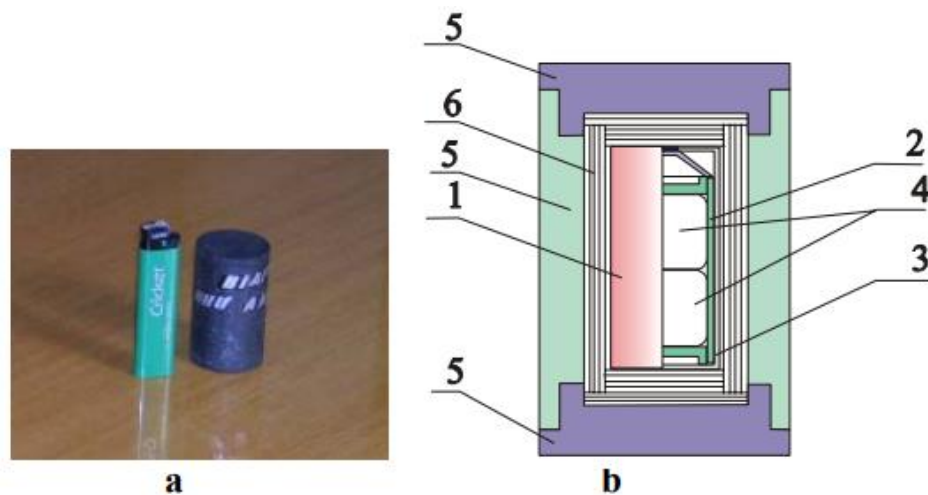


Fig. 13 Appearance (a) and design of RHU «Angel» (b): 1- radionuclide heat source (RHS); 2 – anticorrosive shell; 3 – protective shell; 4 - PuO<sub>2</sub> pellet; 5 – heat-protective casing; 6 – heat-insulation insert

#### RTG and its basic component parts

RTG consists of a number of basic components which secure its long operation regardless of environmental conditions: radionuclide heat unit (RHU), thermoelectric converter (TEC), heat insulation, attachment fittings of RHU and TEC inside RTG casing, heat-rejection system etc. One of the main RTG members is radionuclide heat unit (RHU), containing the certain amount of plutonium-238 based fuel, radioactive decay of which produces a heat flux onto thermoelectric converter.

Radionuclide heat unit (RHU) represent a complex high-technology product, as it imposed by a number of severe requirements on integrity securing for any kinds of external actions at a nominal operation mode and in case of probable emergencies. These requirements are stated in Resolution № 14/68 dated 14.12.1992, approved by General Assembly of the United Nations and related to “Principles relevant to use of nuclear power sources in outer space” which must be taken into account at a designing of RTG.

Fig. 9 shows design of a heat assembly and GPHS-RTG. Basis of the heat assembly is a module containing four capsules of 62.5 W heat power each. The total assembly is placed inside heat-protection and shockproof body made of

carbon-carbonic materials, which are capable of ensuring the body integrity in case of emergency impacts.

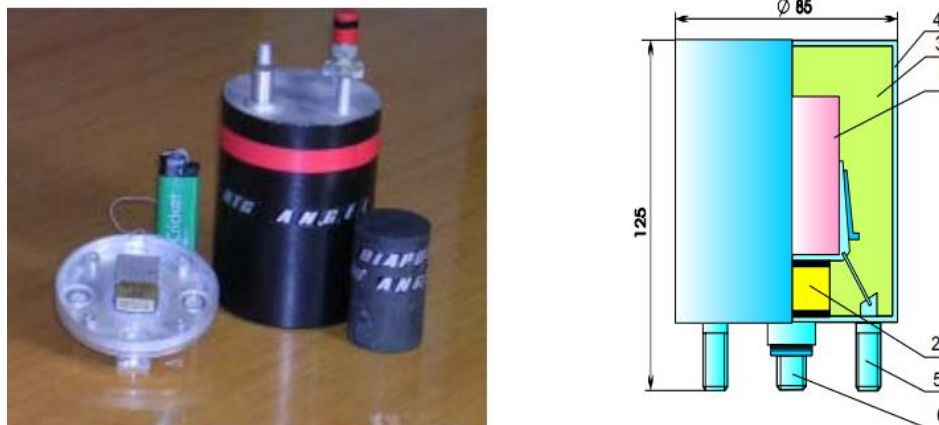


Fig. 14. Photo of RTG «Angel» with the basic accessories (RHU «Angel» and thermoelectric battery) (a) and its design (b): 1 – RHU; 2 – thermoelectric battery; 3 – heat insulation; 4 – casing; 5 – fastening members; 6 – electric connector

On base of such the single modules it is feasibly to build up the aggregate assemblies on heat power from 250 W up to 5.0 kW. RTG of GPHS-RTG series with use of such heat aggregate assemblies and efficient thermoelectric converters generated practically about 300 Wel.. This design of heat unit is the basic one.

RHU of 1,0 Wheat represents a multilayer capsule, inside which the pellet of plutonium-238 dioxide is placed and this capsule is enclosed into heat-protection body made of carbon-carbonic materials (fig. 10).

The information exists that on the basis of 1,0 W RHU is conducting project engineering RTG on electric power of about 40 mW (Powerstick) [31].

Design of RHU «Angel» is presented in fig. 13. Fig. 14 demonstrates structural layout and photo of RTG «Angel».

Plutonium-238 dioxide pellets are placed in the two-shell pressurized capsule which is in turn closed in multilayer heat insulation and housed in heat-protective casing made of composite carbon-carbonic materials.

RHU «Angel» had passed the planned tests and was certificated in accordance with International requirements on a safety use in structure of spacecraft «Mars-96» [34].

RHU «Angel» is an unified product ant it can be used both independently and as part of RTG.

#### Thermoelectric converter

In the RTGs developed under program SNAP there were used thermoelectric converters on base of bismuth telluride, lead telluride, materials of TAGS-type (tellurium, antimonide, germanium and argentum). Thermoelectric converters on base of silicon-germanium alloys were used in RTG MHW and GPHS-RTG, Pluto-Kuper.

Fig. 15 exemplifies the dependences for figure of Merit of some thermoelectric materials and skutterudites as a function of temperature.

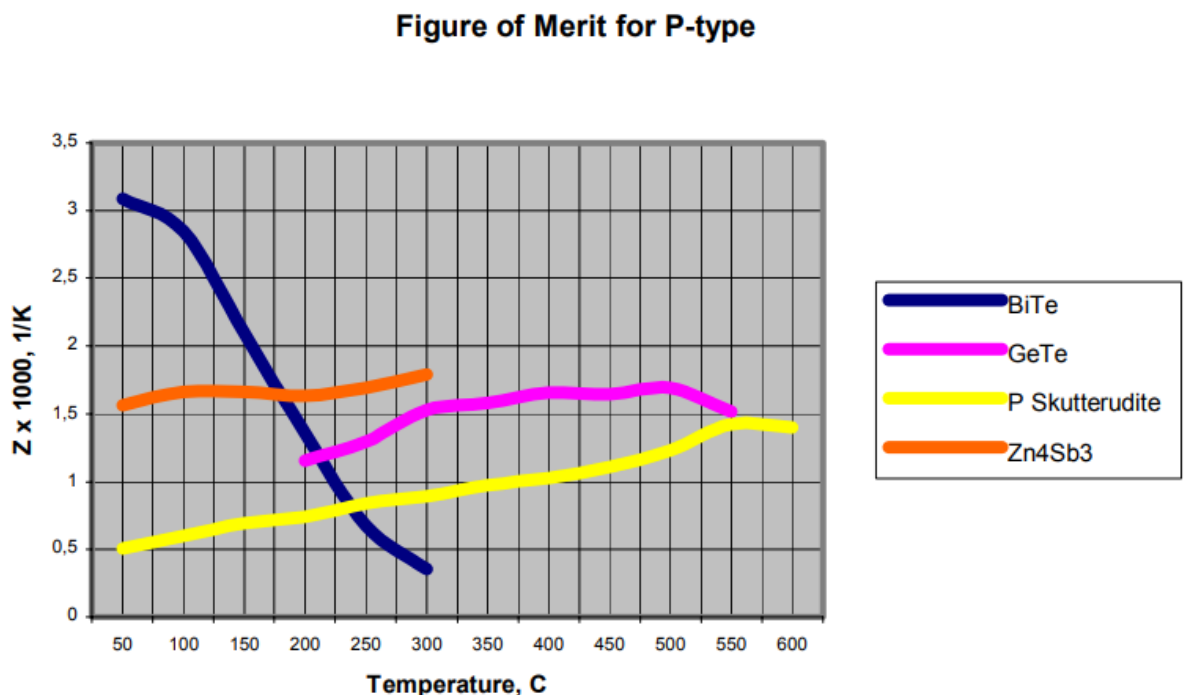


Fig. 15 Figure of Merit Z for P-type materials as a function of Temperature

In RTG «Angel» the thermoelectric materials on base of bismuth telluride were applied.

Fig. 16 demonstrates dependences of parameter Z as a function of temperature for such materials.

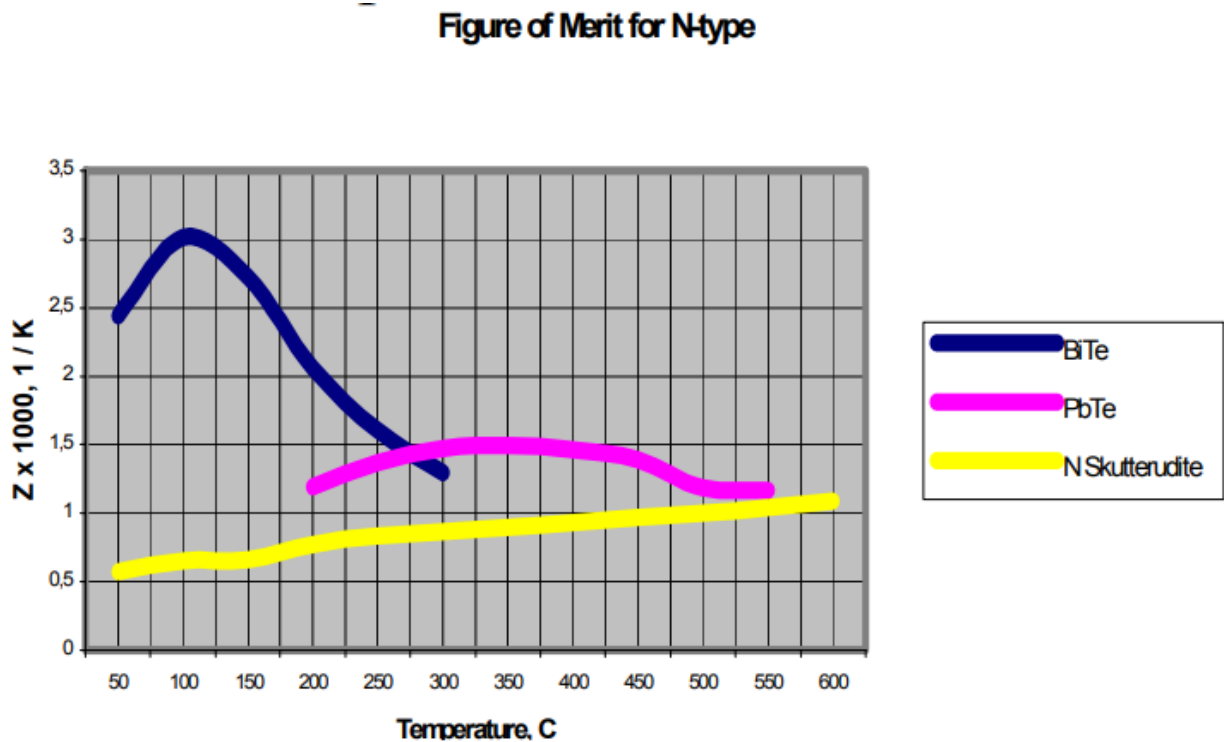


Fig. 17 Figure of Merit Z for N-type materials as a function of temperature

In the Russian projects on the space application RTG of watt range electric power (from 4 up to 30 W) a possibility of application of a middle-temperature (PbTe-GeTe) materials together with low-temperature materials (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) is considered with purpose to arrange the cascaded or segmented thermoelectric converters for operation temperature range of 20-480°C.

#### Prospects of RTG application for planet investigations

By now RTG are still unique, the most reliable energy sources for a long-time activity in outer space. The elaborations by USA on designing the standard plutonium<sup>238</sup> heat assemblies GPHS based new autonomous electric energy sources AMTEC-type and thermo-photo-voltaic generators (with efficiency at a level of 16-18% according predicted estimations) are meanwhile at a stage of R&D project and they are inferior drastically in reliability and service life in comparison with RTG.

In this connection, in framework of the space programs USA plan to use a new RTG named as MM RTG (multimission RTG) on base of 8 heat assemblies GPHS-type (of heat power about 2,0 kW) and thermoelectric converter PbTe/TAGS-type.

According to developers' assessments this RTG will generate 125 Wel. at an efficiency of 6,2% and its mass will be 45 kg. These RTGs are planned to be used in course of the Martian exploration under program Mars Science Laboratory (MCL) and for mission Solar Probe. Russian experts think expedient to develop RTGs of electric power up to 2,0 W with adaptation of heat assemblies based on a few RHU «Angel» and with appliance of thermoelectric converter on the basis of bismuth tellurides. Design parameters for a few such type RTG are resulted in Table 26.

Table 26

Parameter	RTG «Angel»	RTG A-1	RTG A-2	RTG A-3
Electric power, W	0,2	0,3	0,7	1,1
Voltage, V	15	5	5	5
Heat power, W	8,6	8,6	17,2	25,8
Efficiency of RTG, %	2,6	3,4	4,1	4,3
Mass of RTG, kg	0,5	0,5	1	1,5
Specific power, W/kg	0,4	0,6	0,7	0,7
Amount of RHU	1	1	2	3
Dimensions of RHU, mm	40	40	40	90
Diameter	60	60	122	60
Height				
Dimensions of RTG, mm	85	85	85	160
Diameter	120	120	185	140
Height				
Service lifetime, years	10	15	15	15

For RTG on electric power level more than 3 W it is necessary to fulfill a new elaboration of a basic heat unit with heat power 50-60 W, as well as of a new



cascaded (segmented) thermoelectric converter and RTG design. As an example, fig. 18 shows one of the possible unified designs for RTG module on 30 Wel. with efficiency of about 9,5% [33].

Such RTG can find application in the future Russian space programs, ESA missions on exploration of Mars, Jupiter and its satellite Europe as well as in frame of the programs related with detailed and prolonged research of the Moon.

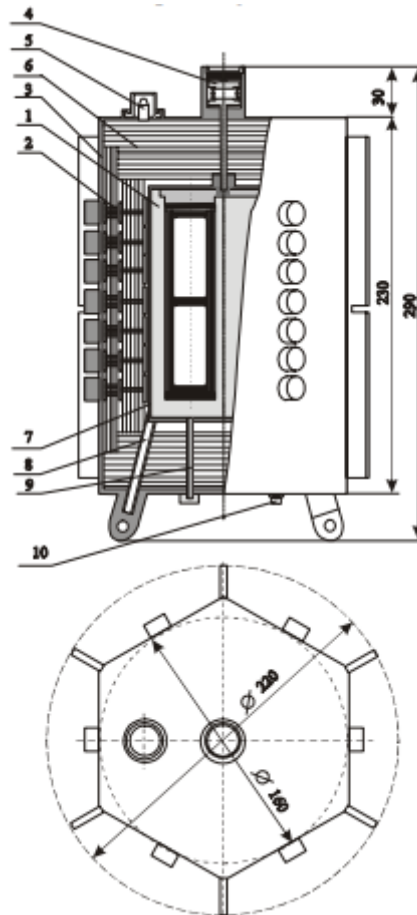


Fig. 18 Principle design of RTG on 30 Wel. 1 – Radioactive nuclide thermal block, 2 – Thermoelectric battery (42 pieces), 3 – Base, 4 - Tightening device, 5 - Exhaust tube, 6 - Gas-screen thermal insulation, 7 - Helium gas collector, 8 - Support (4 pieces), 9 - Helium gas outlet, 10 - Socket

In our opinion, RTG on base of plutonium-238 are the unique energy sources with which use it is possible for the planetary exploring both to support a nominal heat operation mode at the negative low temperatures and to provide electric supply for various transducers during 20 and more years.

## Conclusion

During last 40 years plutonium-238 based RTG have been founding a wide application in framework of the USA planetary exploration programs and they showing themselves as a high reliable energy sources efficient for a work in conditions of Deep space for more than 20 years. At the present time for appliance in the space RTG for two basic electric power ranges are developed: from tens up to a few hundreds W and compact mini-RTG less than of 1 W. Besides RTG in the planetary researches the compact radionuclide sources containing a small amount of plutonium-238 (grams) are used as the heaters. In Russia for spacecraft «Mars-96» RTG and RHU were developed, which were named as RHU/RTG “Angel”. For the future space programs in Russia projection of watt-power RTG is conducting now. In Europe there is no project engineering on RHU and RTG for space programs of ESA and CNES. For the time being ESA examines possibility of appliance of RHU “Angel” in frame of Exomars program and later on, evidently, of RTG on electric power level of 4-5 W. The urgency of application of RTG for planetary exploration does not raise doubts owing to prospects to support a long-time (for more than 20 years) functioning the scientific equipment on the planets surface and in Deep space.