

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа: Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки: 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»  
Отделение школы (НОЦ): Отделение ядерно-топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Исследование режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона в составе плазменного стенда

УДК 621.387.143.004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	Муканов Ерназар Бакытулы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ НИ ТПУ	А.Г. Каренгин	к.ф.-м.н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Н.В. Черепанова	к.филос.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ПФ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТ	П.Н. Бычков	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения
<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 инженерно-физические 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 радиоэкологии, 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 образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Отделение школы (НОЦ) Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А4Д	Муканову Ерназару Бакытулы

Тема работы:

<b>Исследование режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона в составе плазменного стенда</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	06.03.2018 №1508/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	22.05.2018 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <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>	Будут исследованы газодинамические и теплофизические параметры воздушно-плазменного потока, генерируемого ВЧФ-плазмотроном, в составе плазменного стенда.
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <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>	При разработке бакалаврской работы должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Обзор и анализ высокочастотных генераторов плазмы. 2. Исследование тепловых и газодинамических методов диагностики плазмы. 3. Расчет параметров коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона. 4. Экспериментальное подтверждение исследований и оптимизаций режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона.

	5. Экономическое обоснование проведения НИР. 6. Выводы по работе. Заключение.
--	--

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Черепанова.Н.В
Социальная ответственность.	Гоголева.Т.С
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
нет	

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

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	А.Г.Каренгин	к.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А4Д	Е.Б.Муканов		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А4Д	Муканову Еназару Бакытулы

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ТФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1.Стоимость расходных материалов 2.Стоимость расхода электроэнергии 3.Норматив заработной платы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1.Тариф на электроэнергию 2.Коэффициенты для расчета заработной платы
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1.Отчисления во внебюджетные фонды (30,2%)

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1.Потенциальные потребители результатов исследования; 2.Анализ конкурентных технических решений; 3.SWOT – анализ.
2. Планирование процесса управления НИТ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1.Структура работ в рамках научного исследования; 2.Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения научного исследования; 3.Бюджет научно - технического исследования (нти).
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	1. Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки;

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	23.04.2018
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	Н.В.Черепанова	к.ф.н.		23.04.2018

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А4Д	Е.Б. Муканов		23.04.2018

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А4Д	Муканову Ерназару Бакытулы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

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

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей макроклимата от оптимальных, ионизирующее излучение от ПЭВМ, шум, вибрация);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током)</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требование охраны труда при работе с ПЭВМ и плазмотрона</li> </ul>

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<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 (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, 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 Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	Муканов Ерназар Бакытулы		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 117 страниц, 25 рисунков, 22 таблицы, 43 источников, 82 формул.

Ключевые слова: плазма, высокочастотный факельный разряд, высокочастотный факельный плазмотрон, плазменный стенд.

Объектом исследования является: высокочастотный факельный плазмотрон.

Цель работы – исследование газодинамические и теплофизические параметры воздушно-плазменного потока, генерируемого ВЧФ-плазмотроном, в составе плазменного стенда.

В результате исследования были определены тепловые мощности на водо-охлаждаемых корпусах ВЧФ-плазмотрона и электроде, а также определение энтальпии и температуры плазменной струи при разных режимах работы ВЧФ-плазмотрона.

Для решения поставленных задач по оптимизации режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона (ВЧФП) проводились эксперименты по следующей схеме:

1. Вначале, до возбуждения разряда в ВЧФП, замерить температуру охлаждающей воды на водо-охлаждаемых элементах установки (аноде генераторной лампы, сеточной индуктивности, электроде и корпусе плазмотрона)

2. Включить компрессор, вентилем установить на ротаметре P1 требуемый расход плазмообразующего газа  $Q_{пл}$ , который на протяжении всех экспериментов поддерживался постоянным, равным 3,4 г/с (100 дел.). Затем вентилем B2 на ротаметре P2 установить расход охлаждающего газа  $Q_{ог}$ , значение которого в экспериментах изменялось от 0 до 3,5 г/с.

3. При помощи узла “поджиг” возбудить высокочастотный факельный разряд (ВЧФР), и позиционерами на лицевой стороне

высокочастотного генератора (ВЧГ) установить нужный режим работы ВЧФП ( $J_a=2; 2,5; 3; 3,5$  А).

4. По истечении нескольких минут при установившемся режиме работы можно проводить замеры температуры охлаждающей воды на водоохлаждаемых элементах установки. Температура охлаждающей воды замерять при изменении степени газодинамического обдува кварцевой трубы и стенок корпуса плазмотрона от 0 до 3,5 г/с.

## Оглавление

Введение.....	10
Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	12
1.1. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ .....	12
1.1.1. Высокочастотные индукционные плазмотроны .....	12
1.1.2. Высокочастотные емкостные плазмотроны.....	19
1.1.3. Высокочастотные факельные плазмотроны.....	21
1.1.4. Высокочастотный факельный плазмотрон для исследований плазменных технологических процессов.....	23
1.1.5. Высокочастотный плазмотрон для проведения плазмохимических процессов во взвешенном слое. ....	25
1.1.6. Высокочастотный факельный плазмотрон для плазмохимических процессов синтеза и переработки веществ.....	28
1.1.7. Сверхвысокочастотные плазмотроны.....	30
1.2. ТЕПЛОВЫЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ.....	35
1.2.1. Измерение температуры плазмы по ее энтальпии .....	35
1.2.2. Измерение тепловых потоков .....	41
1.2.3. Определение теплового потока по изменению температуры, поверхности датчика (метод тонкопленочного термометра сопротивления).....	42
1.2.4. Экспоненциальный (калориметрический) метод. ....	43
1.2.5. Определение теплового потока по времени до начала плавления материала. ....	47
1.2.6. Метод калориметра с линейной характеристикой.....	47
1.2.7. Метод поверхностных точек. ....	50
1.2.8. Метод цилиндрического термометра сопротивления. ....	51
1.2.9. Метод динамической термопары. ....	52
1.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА .....	54
1.3.1. Основные стадии взаимодействия канала высокочастотного факельного разряда с потоком холодного плазмообразующего газа .....	54
1.3.2. Струйная модель коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона. ....	56
1.3.3. Расчет и оптимизация термических параметров коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона .....	60
Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	68
2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА .....	68
2.1.1. Описание экспериментальной установки на базе ВЧ факельного плазмотрона .....	68
2.1.2. Методика проведения экспериментов .....	71
2.1.3. Оценка влияния газодинамического обдува на термические параметры ВЧ факельного плазмотрона. ....	76

ВЫВОДЫ .....	85
3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	86
3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	87
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	87
3.1.2 Технология QuaD .....	87
3.1.3 SWOT-анализ.....	89
3.2 Планирование научно-исследовательской работы .....	92
3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	92
3.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР .....	92
3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования .....	93
3.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	95
3.3.1 Расчет материальных затрат .....	95
3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	97
3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	99
3.3.5 Контрагентные расходы .....	99
3.3.6 Накладные расходы.....	100
3.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	100
3.4 Определение ресурсоэффективности исследования .....	101
4. Социальная ответственность .....	103
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	104
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	105
4.2.1 Организационные мероприятия.....	105
4.2.2 Технические мероприятия.....	106
4.2.3 Условия безопасной работы.....	108
4.3 Электробезопасность.....	111
4.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	112
Список использованной литературы .....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117

## Введение

Развитие теоретических основ плазменных технологий, а также разработка специального оборудования, создали предпосылки для внедрения их в промышленность. К таким технологиям относятся пиролиз углеводородов, получение простых и сложных оксидов, карбидов, нитридов, различных композиционных материалов (катализаторов, ферритов, магнитоносителей, электрорадиокерамики и др.). Широко распространены в промышленности процессы плазменной резки, сварки, термообработки, плазменного травления поверхностей. Благодаря внедрению целого ряда плазмохимических процессов значительный прогресс достигнут в электронной промышленности.

Повышенный интерес ученых и производителей к применению низкотемпературной плазмы обусловлен рядом специфических свойств плазмы, которые значительно расширяют ее технологические возможности.

В настоящее время получили распространение плазмотроны:

высокочастотные индукционные (ВЧИ), в которых используется высокочастотный безэлектродный разряд Н-типа;

высокочастотные емкостные (ВЧЕ), в которых возбуждается высокочастотный разряд Е-типа с внешними электродами;

высокочастотные факельные (ВЧФ), использующие высокочастотный моноэлектродный разряд;

сверхвысокочастотные (СВЧ), в которых разряд возбуждается в полых волноводах.

Выбор генератора для проведения, данного плазмохимического процесса определяется термодинамическими и кинетическими особенностями последнего [1,2]. Генератор низкотемпературной

плазмы, используемый в технологическом процессе, должен отвечать следующим требованиям:

- температура плазмы на выходе из генератора должна быть порядка тысяч градусов (от 2500 до 20000 К);
- плазменное образование должно быть достаточно чистым, т.е. свободным от загрязнения такими частицами, которые не входят в состав рабочего тела;
- параметры низкотемпературной плазмы должны обеспечивать оптимальные условия процесса и быть управляемыми;
- генерация плазмы должна обеспечиваться в течении длительного промежутка времени;
- К.П.Д. процесса преобразования первичной энергии в энергию плазмы должен быть достаточно высок.

Цель выпускной квалификационной работы – определение оптимальных режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона.

## **Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **1.1. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЛАЗМЫ**

Известно, что плазма некоторых электрических разрядов (импульсных, высокочастотных, сверхвысокочастотных, барьерных, тлеющих и др.) является каталитически активной, т.е. обладает каталитическими свойствами [1-3]. В такой плазме температура (энергия) электронов значительно превосходит температуру (энергию) положительно и отрицательно заряженных ионов, нейтральных атомов и молекул. Под действием таких электронов происходит возбуждение и активация атомов и молекул исходного сырья, повышается их реакционная способность, что приводит к существенному росту скорости протекания плазмохимических реакций и выходу целевых продуктов.

#### **1.1.1. Высокочастотные индукционные плазмотроны**

Для получения чистых и сверхчистых веществ и материалов применяют так называемые безэлектродные плазмотроны. К последним относятся высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) генераторы низкотемпературной плазмы.

Условно к первым относят разряды, которые горят на частотах от нескольких сотен килогерц до десятков мегагерц, а ко вторым — зажигаемые на больших частотах — вплоть до миллиметрового диапазона волн (сотни гигагерц).

Особенность работы безэлектродных генераторов низкотемпературной плазмы заключается в том, что плазмообразующий газ во время работы плазмотрона не соприкасается с электродами, а поэтому природа газа не имеет существенного значения.

В настоящее время получили распространение плазмотроны:

- высокочастотные индукционные (ВЧИ), в которых используется высокочастотный безэлектродный разряд Н-типа;
- высокочастотные емкостные (ВЧЕ), в которых возбуждается высокочастотный разряд Е-типа с внешними электродами;
- высокочастотные факельные (ВЧФ), использующие высокочастотный моноэлектродный разряд;
- сверхвысокочастотные (СВЧ), в которых разряд возбуждается в полых волноводах.

ВЧ-плазмотроны обычно работают при атмосферном давлении в диапазоне частот 200 кГц—40 МГц при мощности разряда 0,2—650 кВт и расходе плазмообразующего газа от нуля до 0,3 м<sup>3</sup>/с.

Впервые достаточно мощные индукционные разряды при атмосферном давлении были получены Бабатом в 1941 г. Первые работы по практическому использованию индукционного плазменного генератора появились в 1959—1962 гг. Такой временной разрыв объясняется трудностью создания надежных способов теплозащиты стенок разрядных камер.

При разработке ВЧ плазмотрона должны быть решены следующие задачи:

- ввод электромагнитной энергии в разряд с максимальным к.п.д.;
- вывод нагретого газа из ВЧ плазмотрона с минимальными потерями мощности при обеспечении требуемой надежности конструкции;
- соблюдение инструкций радиоинспекции, техники безопасности, промышленной санитарии.

Плазменные струи, генерируемые с помощью ВЧИ плазмотронов, используют в технологических схемах сравнительно редко. Чаще всего целевой процесс протекает непосредственно в зоне ВЧ разряда.

Рассмотрим различные схемы ВЧИ генераторов низкотемпературной плазмы.

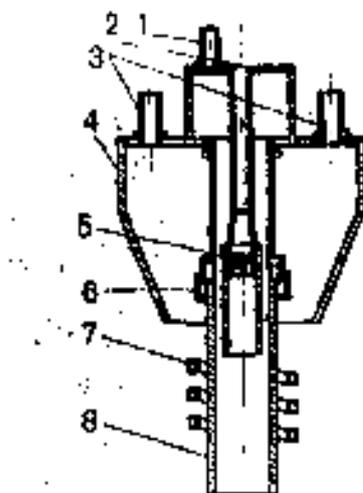


Рис.1.1. Схема ВЧИ генератора низкотемпературной плазмы с прямоструйной газовой защитой разрядной камеры:

1 – ввод теплозащитного потока; 2 – кожух для формирования внутреннего теплозащитного потока; 3 – штуцер; 4 – кожух для формирования внешнего обдува генератора; 5,8 – кварцевые трубки; 6 – цанговый зажим; 7 – индуктор.

ВЧИ плазмотрон с газовой теплозащитой стенок разрядной трубки (рис.1) представляет собой трубку 8 из прозрачного кварца или другого тугоплавкого огнеупорного диэлектрического материала, один конец которой свободен и помещен в индуктор 7. Другой конец трубки закреплен в специальном держателе, служащем одновременно и газораспределительным устройством. Для теплозащиты трубки по ее внутренней полости создается газовая струя, высокая скорость которой препятствует проникновению термодиффузионных потоков от плазмы к стенке. Струя создает как бы газовую завесу между плазменным образованием и стенкой. Внутри внешней трубки, несколько выше зоны разряда,

вставляется вторая кварцевая трубка 5. Зазор между этими трубками позволяет сформировать теплозащитную струю и направить ее вдоль внутренней поверхности внешней трубки. Внутренняя трубка делит полный газовый поток на два: теплозащитный и плазмообразующий. Плазмотрон описанного типа не нашел широкого применения.

Из всех типов газовой теплозащиты стенок камеры наибольшее распространение получила так называемая вихревая стабилизация плазмы. В этом случае газ подается в цилиндрический кварцевый баллон тангенциально, так что внутри плазмотрона он движется вдоль стенок по спирали. В основе работы такого плазмотрона лежит принцип центрифуги: холодный — тяжелый — газ отбрасывается к стенкам, а более легкий — нагретый — остается в центральной зоне, образуя сгусток плазмы. В зоне индуктора локализуется ярко светящийся шар, температура газа в котором может составлять 10000—20000 К при высокой степени ионизации. Ниже этой области находится менее светящаяся зона факела плазмы. Последняя становится очень яркой при введении различных веществ с пониженным потенциалом ионизации. При многочасовой работе кварцевая камера такого плазмотрона нагревается не выше 70—100 °С.

Если в цилиндрическую зону плазменного образования желательно ввести твердые или газовые реагенты, то следует отказаться от тангенциального ввода плазмообразующего газа, так как при этом возникают восходящие газовые потоки. В подобной ситуации плазмообразующий газ рекомендуется подавать через специальное кольцо, а исходное сырье вводить в любой участок плазменного факела при помощи специального водоохлаждаемого зонда.

В настоящее время широкое распространение получил высокочастотный плазмотрон с водяным охлаждением стенок разрядной камеры.

Преимущество применения безэлектродного высокочастотного разряда с кварцевой разрядной камерой состоит в том, что появляется возможность визуального наблюдения за работой плазмотрона. Разрядная

кварцевая камера ВЧИ плазменной установки используется, в частности, при получении пигментной двуокиси титана индукционно-атомарным способом.

Различают режимы истечения плазменной струи без встречного потока и с ним. Экспериментально установлено, что встречный вихревой поток возникает в закрученной плазменной струе, если тангенциальная составляющая скорости потока в 5 раз превышает его осевую составляющую.

Следует отметить, что кварцевые разрядные камеры обеспечивают высокий К.П.Д. ВЧИ плазмотронов. Суммарные потери мощности в разрядной камере могут составлять 4,5% мощности ВЧИ разряда при среднемассовой температуре воздушной плазменной струи на выходе плазмотрона 6000 К. Кварцевые разрядные камеры могут надежно работать в промышленных технологических процессах при строгом соблюдении параметров технологического режима. Особенностью работы кварцевой разрядной камеры является то, что последняя выдерживает лишь определенное число возбуждений разряда и практически не выдерживает аварийных режимов. Например, прекращение подачи плазмообразующего газа ведет к проплавлению стенки.

Характеристики существующих источников ВЧИ плазмы таковы, что при равномерном аксиальном потоке газа разряд почти целиком заполняет сечение разрядной камеры. Градиенты температуры у стенок достигают значения

5-10°С/см. Проблема защиты стенок разрядных камер от разрушающего воздействия высоких температур может быть решена путем создания в пристеночной области высокоскоростного потока газа, отжимающего разряд от стенок. Однако в этом случае основная масса газа проходит к холодной пристеночной области, что ведет к неоправданно большим расходам технологического газа.

Установлено, что в равномерном аксиальном потоке газа может быть получен устойчивый контрагированный индукционный разряд,

характеризующийся малыми потерями энергии в разрядной камере; высокой стабильностью параметров разряда при изменении расхода газа; большой долей нагреваемого газа. Существенно, что диаметр канала разряда не зависит от расхода газа, давления в разрядной камере и ее диаметра. На основании анализа критериев устойчивости для разряда могут быть сформулированы условия, при которых происходит контракция разряда [4].

Находят применение, водоохлаждаемые металлические трубки или секции. Принцип работы такой камеры основан на следующих основных положениях. Если поместить в индуктор полый металлический цилиндр, толщина стенки которого заведомо больше глубины проникновения электромагнитного поля в металл, то цилиндр будет поглощать всю электрическую энергию и внутри него поля практически не будет. Однако если в этом цилиндре сделать хотя бы один продольный сквозной разрез, то электромагнитная энергия свободно проникает внутрь. Поле возбуждает внутри цилиндра индукционный разряд. Интенсивное водяное охлаждение стенок цилиндра обеспечивает надежную стабильную работу таких устройств с разрядами мощностью в несколько десятков и сотен киловатт.

Помимо обычной конструкции ВЧИ плазмотрона, перспективной может оказаться схема с последовательно горящими ВЧИ разрядами в одной удлиненной разрядной камере (рис.1.2, а). Напряжение на индукторы может подаваться как от одного, так и от нескольких ВЧ генераторов. В последнем случае возможна работа ВЧИ плазмотрона при разных рабочих частотах ВЧ генераторов.

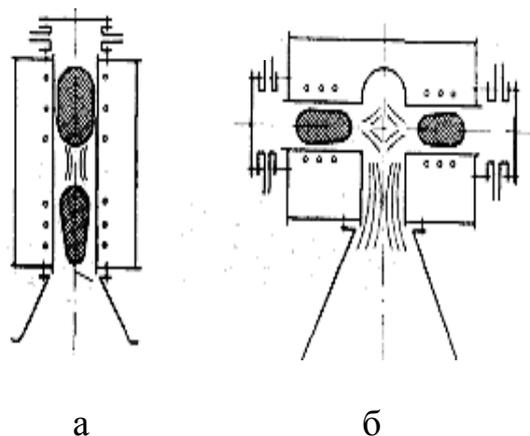


Рис.1.2. Схемы ВЧИ плазмотронов с последовательными разрядами (а) и со встречными плазменными струями (б).

С целью улучшения условий теплообмена в ВЧИ плазмотроне могут быть использованы ВЧИ разряды со встречно-направленными плазменными струями (рис.1.2,б). Создание ВЧИ плазменных установок с ламповыми генераторами единичной мощностью 1 МВт не является проблемой. В настоящее время обсуждаются технические вопросы разработки подобных установок мощностью 3—5 МВт. Ресурс работы установок определяется только ресурсом работы генераторных ламп. Современные генераторные лампы имеют гарантийный срок работы свыше 2000 ч. Задача исследователей и разработчиков заключается в доведении ресурса работы всех узлов до 10 000 ч.

Необходимость разработки и применения в химической технологии мощных высокочастотных плазмотронов связана с преимуществами индукционных плазменных установок по сравнению с электродуговыми, заключающимися в чистоте плазменного образования, высокой стабильности параметров разряда, практически неограниченной длительности непрерывной работы, возможности использования реакционноспособных газов в качестве плазмообразующих.

### 1.1.2. Высокочастотные емкостные плазмотроны

Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) плазмотроны, использующие разряд Е-типа, характеризуются следующими свойствами, представляющими интерес для плазмохимической технологии:

- высокая напряженность электрического поля в зоне разряда;
- низкий уровень интегрального излучения;
- небольшая минимальная мощность, необходимая для поддержания разряда.

Емкостной разряд возбуждается в сосредоточенной емкости, которая включена в высокочастотный контур генератора. Токи, протекающие через плазменный объем, замыкаются на стенки разрядной камеры в виде токов смещения. Наиболее простым емкостным высокочастотным плазмотроном с продольным продувом плазмообразующего газа является конструкция с тремя внешними электродами (рис.3). Центральный электрод 2, находящийся под высоким напряжением, располагается в экранирующем корпусе 3. Электроды 1 и 4 заземлены и конструктивно выполнены совместно с торцевыми крышками 10 и 14 корпуса 3. Расстояние между центральным электродом и заземленными электродами составляет 0,0735 м. Внутренний диаметр всех электродов  $7 \cdot 10^{-2}$  м. Корпус 3 соединен фидером с корпусом 6 ВЧ генератора. Электрод 2 шиной 5 соединен с высоковольтным элементом колебательного контура ВЧ генератора. Разрядная камера 12 изготовлена из кварцевой трубы. Плазмообразующий газ 7 вводится в разрядную камеру через штуцеры 8, расположенные тангенциально в завихрителе 9. Плазменная струя 16 истекает из выходного отверстия 15 разрядной камеры. Внутри разрядной камеры одновременно существует две высокочастотные дуги 11 и 13. Возбуждение ВЧЕ разряда в воздухе и кислороде производится заземленным металлическим стержнем, вводимым в зону высоковольтного электрода 2 разрядной камеры 12.

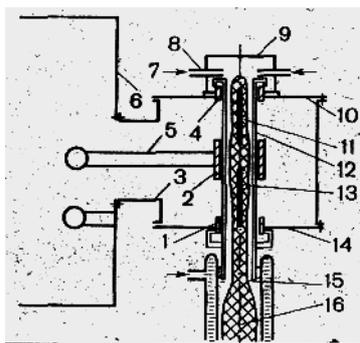


Рис. 1.3. Схема ВЧЕ плазмотрона с тремя внешними электродами:  
 1,4-заземленные электроды; 2-центральный электрод; 3-экранирующий корпус;  
 5-шина; 6-корпус ВЧ генератора; 7-ввод плазмообразующего газа; 8-штуцер; 9-  
 завихритель; 10,14-торцевые крышки; 11,13-высокочастотные дуги; 12-разрядная  
 камера; 15-выходное отверстие; 16-плазменная струя.

В атмосфере гелия происходит самовозбуждение ВЧЕ разряда при ВЧ напряжении, равном 3 кВ. Условия передачи энергии в разряд непрерывно улучшаются при повышении частоты и увеличении площади электродов. Установлено, что мощность ВЧЕ плазмотрона может быть повышена за счет увеличения диаметра разрядной камеры, расстояния между электродами и напряжения на электродах. Мощность ВЧЕ плазмотрона можно наращивать за счет увеличения длины ВЧЕ дуги при неизменном напряжении на электродах. Для этого в одной разрядной камере зажигается несколько последовательно горящих ВЧЕ разрядов. Расчеты подтверждают возможность создания ВЧЕ-плазмотронов мощностью 100 и 1000 кВт.

ВЧЕ плазмотрон не содержит расходующихся деталей, поэтому ресурс его непрерывной работы определяется только ресурсом электровакуумных изделий и составляет ~2000 ч. В зависимости от режима ВЧ генератора и конструкции ВЧЕ плазмотрона К.П.Д. плазмотронов может изменяться в пределах от 30 до 60%.

### 1.1.3. Высокочастотные факельные плазмотроны

В последнее время возрос интерес к разработкам плазмотронов и использованию их в плазменной технологии для получения особо чистых веществ, выращивания кристаллов, проведения теплофизических испытаний материалов и т.д. Для этих целей наиболее пригодны высокочастотные металлические плазмотроны факельного типа [13].

Схема такого плазмотрона представлена на рисунке 1.4.

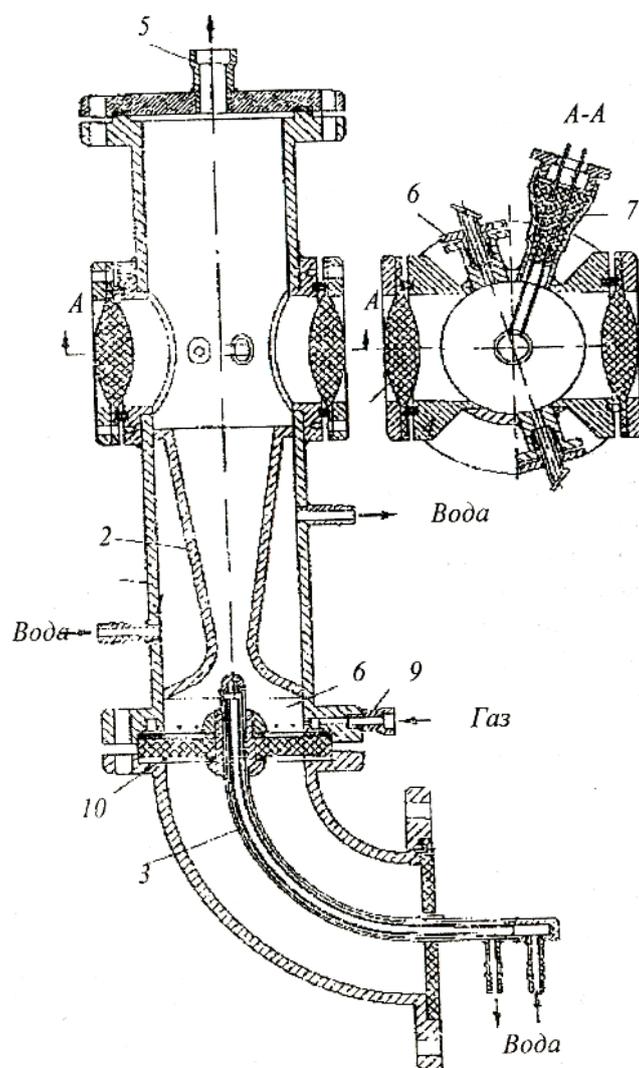


Рис. 1.4. Схема высокочастотного факельного плазмотрона:

1 – металлический корпус; 2 – сопло; 3 – электрод; 4 – окна-линзы;

5-7,9 – штуцер; 8 – газовый распределитель.

Он состоит из металлического корпуса 1 с охлаждаемым водой соплом 2 и охлаждаемого водой электрода 3, электрически изолированного от корпуса изолятором 10 из радиотехнического фарфора. Плазмообразующий газ и газообразные реагенты напускаются через штуцер 9 и газовый распределитель 8, откачка - через штуцер 5. Поток высокочастотной плазмы возбуждается с электрода 3 и формируется в сопле 2. В рабочем режиме мощность, вкладываемая в разряд, и скорость прокачки плазмообразующего газа подбираются таким образом, чтобы в области измерений (сечение А-А) находился стабильный цилиндрический столб плазмы, отделенный от корпуса плазмотрона потоками холодного газа. Для проведения гетерогенных плазмохимических реакций верхняя крышка плазмотрона может быть заменена на устройство подачи мелкодисперсного порошка.

Вакуумно-плотные диэлектрические окна-линзы 4 предназначены для измерений параметров плазмы микроволновыми методами. На таком же расстоянии от электрода, как и линзы, находятся два штуцера 6 с окнами из LiF, которые используются для проведения спектральных исследований, а в случае получения плазмы с высокой плотностью электронов могут быть применены для лазерной диагностики. Штуцер 7 предназначен для ввода в разрядную зону сменных электрических зондов Ленгмюра.

Технические данные:

1. Параметры потоков плазмы:
  - а) газовая температура: 1700-5000 К
  - б) электронная температура: 14000-20000 К;
  - в) концентрация электронов:  $10^8+15-10^{13}$  см<sup>-3</sup>;
  - г) давление; 0,05+1,2 атм;
2. Расход плазмообразующего газа: 0,1-100 л/мин;
3. К.П.Д.: 50-65%;
4. Потребляемая мощность 5÷12 кВт при частоте 40 МГц;
5. Режим работы: непрерывный.

#### **1.1.4. Высокочастотный факельный плазмотрон для исследований плазменных технологических процессов.**

Высокочастотный ВЧ факельный плазмотрон предназначен для исследования и оптимизации плазмохимических процессов посредством спектроскопических и СВЧ методов диагностики плазмы. Плазмотрон позволяет также изучить процессы взаимодействия потоков чистой плазмы с поверхностью твердого реагента, при этом в качестве теплоносителя могут использоваться любые газы и газовые смеси.

Принципиально ВЧ факельный плазмотрон состоит из водоохлаждаемого корпуса 1, выполненного в форме сужающегося сопла (рис. 1.5.) и водоохлаждаемого электрода 2, электрически изолированного от корпуса изолятором 9 из радиотехнического фарфора или тефлона. Конструкция электрода позволяет проводить напуск плазмообразующего газа и формировать плазменную струю с заданными параметрами.

К конструктивным особенностям корпуса плазмотрона относятся вакуумноплотные окна-линзы 11 (разрез А-А), предназначенные для диагностики плазмы СВЧ методами, и штуцеры 4 и 7 с окнами, выполненными из фтористого лития. С помощью штуцера 7 плазмотрон присоединяется к спектральным приборам, например к вакуумному монохроматору ВМР-2, а штуцер 4 позволяет проводить исследования спектров поглощения плазменных потоков.

При проведении исследований по взаимодействию плазмы с материалом, исследуемый твердый образец в форме сопла 3 помещается в средней части плазмотрона, в зоне наиболее интенсивного тепловыделения. В верхней части образца расположена кварцевая камера для газодинамического формирования плазменного слоя постоянной геометрии.

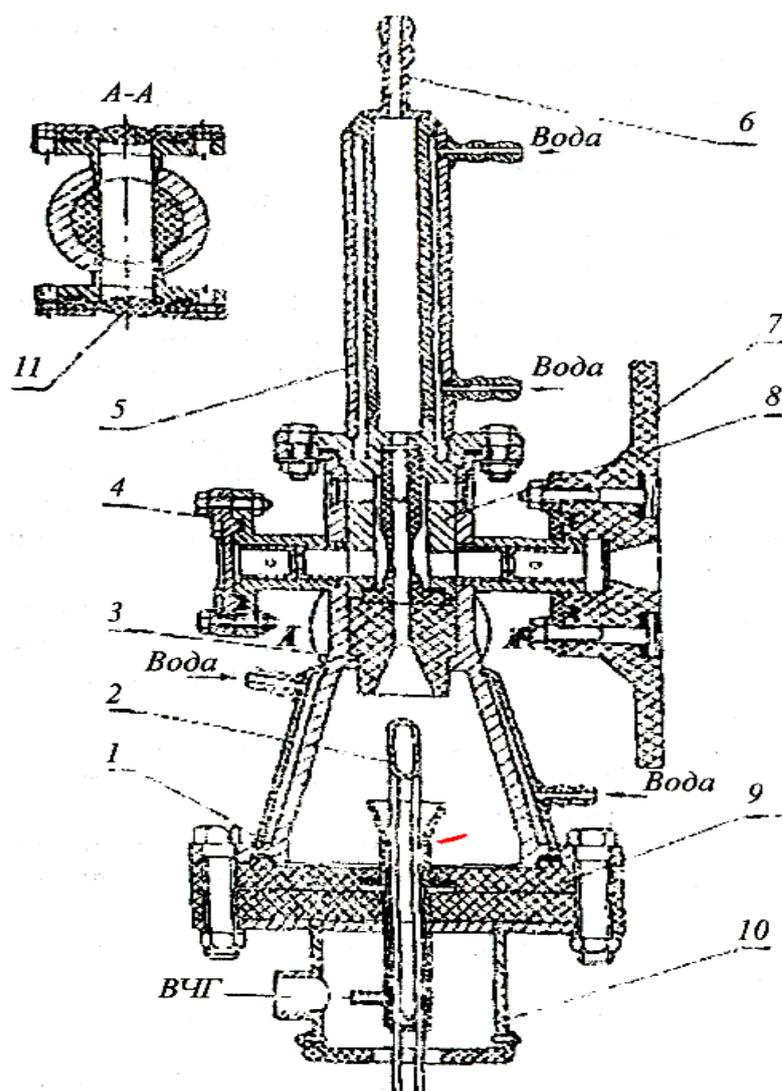


Рис. 1.5. Схема ВЧ факельного плазмотрона для исследований плазменных технологических процессов.

К конструктивным особенностям корпуса плазмотрона относятся вакуумноплотные окна-линзы 11 (разрез А-А), предназначенные для диагностики плазмы СВЧ методами, и штуцеры 4 и 7 с окнами, выполненными из фтористого лития. С помощью штуцера 7 плазмотрон присоединяется к спектральным приборам, например к вакуумному монохроматору ВМР-2, а штуцер 4 позволяет проводить исследования спектров поглощения плазменных потоков.

При проведении исследований по взаимодействию плазмы с материалом, исследуемый твердый образец в форме сопла 3 помещается в средней части плазмотрона, в зоне наиболее интенсивного тепловыделения. В

верхней части образца расположена кварцевая камера для газодинамического формирования плазменного слоя постоянной геометрии.

Для запуска плазмотрона необходимо включить охлаждение электрода и корпуса, откачать плазмотрон до давления порядка 10 мм.рт.ст. и подать на электрод ВЧ потенциал от колебательного контура ВЧ генератора. После возбуждения разряда через сопло электрода 2 в плазмотрон подается плазмообразующий газ или смесь газов, которые формируют плазменный поток. Совместное использование спектральной и СВЧ диагностической аппаратуры позволяет проводить в лабораторных условиях исследование различных плазмохимических процессов, а также процессов взаимодействия плазменных потоков с различными материалами.

Технические данные плазмотрона:

1. Потребляемая мощность: 2÷12 кВт при частоте 40 МГц;
2. Расход плазмообразующего газа: 0,1-100 л/мин;
3. Рабочее давление: 0,1-760 мм.рт.ст.;
4. Средняя газовая температура плазмы воздуха: 1000-5000 К;
5. Источник питания от ВЧ генераторов мощностью 15-20 кВт;
6. Режим работы: непрерывный;
7. К.П.Д. плазмотрона: 50-65%;

#### **1.1.5. Высокочастотный плазмотрон для проведения плазмохимических процессов во взвешенном слое.**

Высокочастотный плазмотрон для проведения плазмохимических процессов во взвешенном слое предназначен для переработки сыпучих материалов с получением продуктов, как в газообразной, так и в конденсированной фазе (рис. 1.6.). Конструктивно в аппарате объединены высокочастотный ВЧ факельный плазмотрон и реактор взвешенного слоя.

ВЧ факельный плазмотрон генерирует плазменный поток, который создает взвешенный слой сыпучего материала в реакционной зоне и обеспечивает эффективный нагрев твердых частиц.

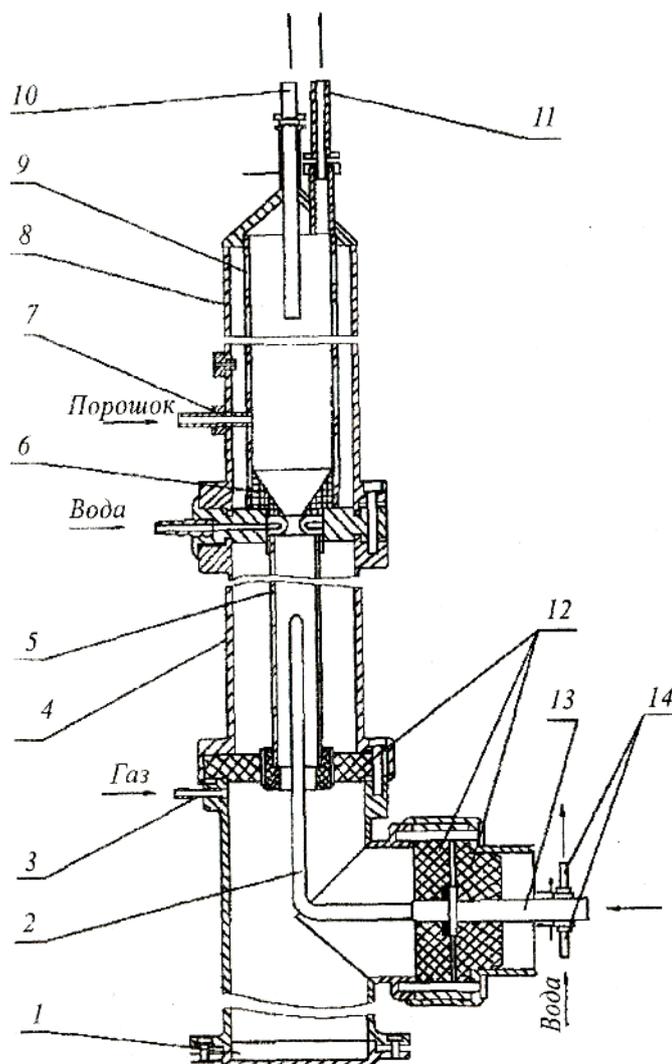


Рис. 1.6. Высокочастотный плазмотрон для проведения плазмохимических процессов во взвешенном слое.

Факельный ВЧ разряд формируется в кварцевой трубе 5 с водоохлаждаемого электрода 2.

Охлаждение электрода осуществляется через штуцеры 14. С целью обеспечения механической прочности корпус 4 плазмотрона изготавливается из металла. Кварцевая труба 5 играет роль тугоплавкой изолирующей насадки

для формирования плазменного потока газового теплоносителя, который вводится в разрядное пространство через штуцер 3. Электрод изолирован от заземляемого корпуса тефлоновыми пластинами 12, которые выполняют и роль уплотнений. Передача энергии от ВЧ генератора осуществляется по фидеру 13.

При формировании взвешенного слоя в реакторе часть сыпучего материала попадает в плазмотрон. Для приема твердых отходов служит сборник 1 .

Плазмохимические процессы переработки сыпучих материалов протекают в реакционной зоне в условиях взвешенного слоя, сформированного плазменным потоком.

Корпус реактора 8 защищен от перегрева кварцевой трубой 9. Подача и разгрузка твердой фазы в реакторе производится через питатель 10 или 7, отвод газов от реактора осуществляется через штуцер 11 . Сменная графитовая насадка 6 позволяет изменять угол раскрытия конуса реактора, а также отношение диаметров его цилиндрической части и входного отверстия.

Преимущества высокочастотного плазмотрона для проведения плазмохимических процессов во взвешенном слое состоят в том, что формирование взвешенного слоя сыпучего материала в нем производится плазменной струей, являющейся одновременно высокоинтенсивным источником тепла. Высокочастотный способ получения плазмы обеспечивает исходную чистоту продуктам реакции и делает аппарат пригодным для переработки различных сыпучих материалов, не загрязняя получаемый продукт конструкционными материалами плазмотрона.

Технические данные:

1. Потребляемая мощность: 10-15 кВт;
2. Расход газа (инертного, реагента или их смеси): 0,24-4,0 м<sup>3</sup>/час;
3. Среднемассовая температура сжижающего агента (плазменной струи): 1500-4000 К;
4. Высота взвешенного слоя: 0,2-0,3 м;

5. Питание от ВЧ генераторов мощностью до 20 кВт с частотой 5-40 МГц;

6. Режим работы: непрерывный;

7. К.П.Д. плазмотрона: 55-70%.

### **1.1.6. Высокочастотный факельный плазмотрон для плазмохимических процессов синтеза и переработки веществ.**

Высокочастотный факельный плазмотрон предназначен для плазмохимических процессов синтеза и переработки веществ.

Применение в качестве источника нагрева ВЧ факельного разряда, плазма которого характеризуется спектральной чистотой, обеспечивает генерирование не только плазменных потоков необходимой тепловой мощности, но и получение продукции высокой степени чистоты.

В отличие от существующих ВЧ индукционных плазмотронов ВЧ факельный плазмотрон в металлическом исполнении отличается механической прочностью и надежностью в эксплуатации.

Принципиально ВЧ факельный плазмотрон (рис. 1.7.) представляет собой отрезок коаксиальной линии, передающей энергию от ВЧ генератора (фидер 10) в разряд. Центральный проводник такой линии заканчивается водоохлаждаемым электродом 1 (штуцеры охлаждения 11), с которого возбуждается одноэлектродный высокочастотный факельный разряд.

Высоковольтный электрод изолирован от заземляемого корпуса 2 плазмотрона пластинами 3 из тефлона. Плазмообразующий газ подается тангенциально через штуцер 4. С целью ликвидации перегрева керамической трубы 5, в которой формируется разряд, часть плазмообразующего газа подается через штуцер 6. Корпус и выходное сопло 7 плазмотрона охлаждаются водой (штуцеры 8, 9). Плазмотрон крепится к реактору с помощью фланца 12. ВЧ факельный разряд формируется потоком плазмообразующего газа при

рабочих давлениях (0,2÷2 атм.) только в том случае, если скорость потока газа через разряд превышает скорость конвективных потоков.

ВЧ факельный плазмотрон используется для нагрева любых (окислительных, инертных) газов и их смесей, а также дисперсных материалов

Высокочастотный факельный плазмотрон предназначен для плазмохимических процессов синтеза и переработки веществ, в которых должно быть исключено загрязнение продуктов реакции материалами электродов и самого плазмотрона за счет их эрозии.

Основными достоинствами ВЧ факельных плазмотронов являются чистота генерируемой плазмы, возможность нагрева газов-окислителей, большой ресурс работы, простота конструкции, возможность генерирования потоков плазмы с технологическими скоростями и высоким К.П.Д. преобразования электрической энергии в тепловую.

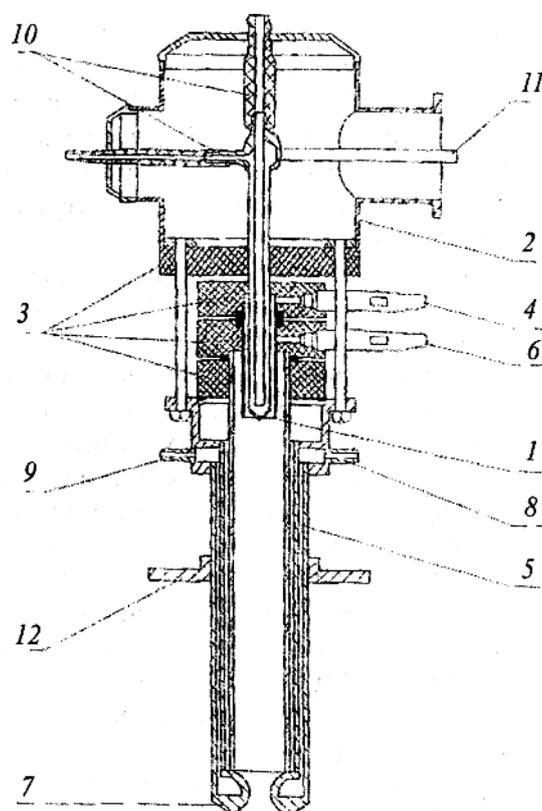


Рис. 1.7. ВЧ факельный плазмотрон для синтеза и переработки веществ.

Технические данные плазмотрона:

1. Потребляемая мощность: 10-20 кВт;
2. Расход плазмообразующего газа: 1-10 м<sup>3</sup>/час;
3. Питание от ВЧ генераторов мощностью 15-30 кВт на разрешенных частотах в диапазоне 5-60 МГц;
4. Режим работы: непрерывный;
5. Ресурс работы: 600-800 часов
6. Рабочее давление: 0,2-2,0 ат.;
7. Среднемассовая температура воздушной плазменной струи: 2000-4500 К.
8. К.П.Д. плазмотрона: 50-70%;

### **1.1.7. Сверхвысокочастотные плазмотроны**

Наложение внешнего переменного поля существенно меняет характер движения заряженных частиц. Последние совершают колебания, накладывающиеся на беспорядочное тепловое движение. Амплитуда колебаний уменьшается с ростом частоты поля. Диапазон СВЧ частот характеризуется тем, что амплитуда колебаний самых легких заряженных частиц — электронов много меньше размеров разрядного объема. При этом основная масса электронов не достигает стенок. Смещение ионов и энергия, которую они получают в электромагнитном поле, значительно меньше соответствующих величин для электронов. Можно сделать вывод, что в механизме СВЧ разряда основную и определяющую роль играют электроны. Тяжелые ионы в процессе практически не участвуют. Малая амплитуда смещения электронов приводит к тому, что процессы на электродах и стенка практической роли не играют и не влияют на режим разряда.

СВЧ-разрядные устройства, служащие для получения низкотемпературной плазмы, получили название СВЧ плазмотронов. Физика безэлектродного СВЧ разряда близка к физике ВЧ разряда. Однако переход

на более высокие частоты приводит к резкому увеличению потерь электромагнитной энергии в плазме, что позволяет эффективно передавать энергию в плазму уже при температуре газа 3500-4000 К.

СВЧ плазмотрон представляет собой волноводно-резонаторное устройство в виде полой металлической камеры, геометрические размеры которой определяются электродинамическими условиями. В отличие от ВЧ установок СВЧ плазмотроны не содержат диэлектрических трубок. Распространение СВЧ электромагнитных колебаний по металлическим волноводам позволяет сформировать плазменное образование, которое изолируется от стенок либо с помощью газовой стабилизации, либо с помощью создания определенного распределения электрического поля по объему.

Техника СВЧ диапазона позволяет создавать разрядные устройства, обеспечивающие независимость мощности и частоты генерируемых источником колебаний от параметров плазмы. Выбирая определенный тип электромагнитной волны, характеризуемой определенным распределением полей по объему, можно создать плазмотрон, к.п.д. которого мало зависит от изменения температуры и объема плазмы.

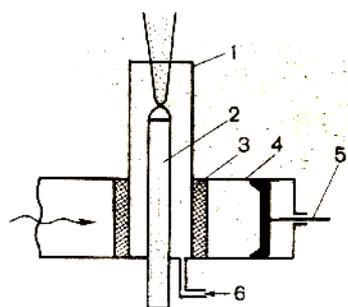


Рис.1.8. Схема коаксиального СВЧ плазмотрона:

1-наружный проводник коаксиальной передающей линии; 2-центральный проводник ; 3-диэлектрическое окно ввода энергии; 4-прямоугольный волновод; 5-поршень; 6- отверстие для ввода газа.

Температура газа может меняться в широких пределах и зависит от диаметра шнура, расхода газа, мощности и конструкции плазмотрона. Возможность регулировки температуры газа позволяет выбирать оптимальную для данного технологического процесса температуру и избегать лишних энергозатрат. СВЧ плазмотрон может быть условно разделен на четыре узла:

- металлическую разрядную камеру, обеспечивающую ввод энергии в плазму;
- устройство возбуждения электромагнитной волны;
- устройство формирования газового потока;
- технологическую часть.

Конструкцию СВЧ плазмотрона выбирают из условия хорошего согласования его с генератором, причем согласование должно быть обеспечено как до, так и после зажигания разряда. Это условие совместно с условием получения высокой удельной мощности в плазме определяет тип возбужденной волны [4].

Рассмотрим схемы СВЧ плазмотронов. На рис.1.8. представлена типичная схема коаксиального плазмотрона, в котором разряд возбуждается на волне, близкой к ТЕМ (ТЕМ - поперечная электромагнитная волна). Плазмотрон состоит из прямоугольного волновода 4, по которому подводится энергия, охлаждаемого центрального 2 и наружного 1 проводников коаксиальной передающей линии, диэлектрического окна ввода энергии 3 и элемента подстройки поршня 5. Газ вводится через отверстия 6 и образует поток, параллельный оси. Описанный плазмотрон может быть использован для спектральных исследований и для проведения технологических процессов, требующих высокой чистоты.

Простейшая схема СВЧ плазмотрона волноводной конструкции представлена на рис.1.9. Разряд возбуждается внутри диэлектрической (кварцевой) трубки, расположенной в центре сечения волновода вдоль

силовых линий электрического поля волны  $H_{10}$ . Такая конструкция СВЧ плазмотрона нашла наибольшее распространение. Например, при вихревой стабилизации минимальная мощность, необходимая для поддержания разряда на воздухе, составляет 400 Вт. Энергия подводится по волноводу сечением 72x34 мм при частоте возбуждающего поля 2375 МГц. Разряд зажигается в кварцевой трубке внутренним диаметром 50 мм, выходное отверстие в сопле составляет 8 мм.

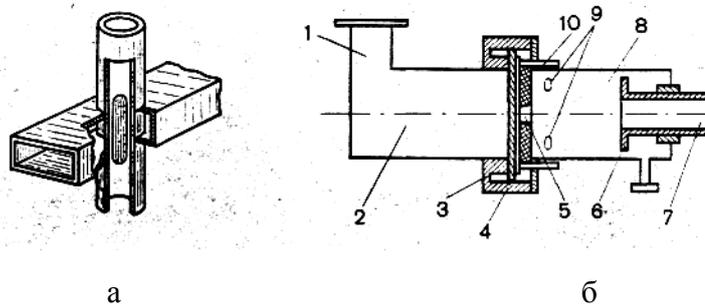


Рис. 1.9. Схемы СВЧ плазмотронов на волнах типа  $H_{10}$  (а) и  $E_{10}$  (б):  
 1-волновод прямоугольного сечения; 2-круглый волновод; 3-дроссельный фланец;  
 4-тефлоновое окно; 5-отверстие; 6-поршень; 7-сопло; 8-разрядная камера; 9-  
 патрубок для ввода рабочего газа; 10-патрубок для поддува.

Диаметр плазменного стержня равен  $\sim 15$  мм и слабо зависит от изменения мощности в пределах от 400 Вт до 5 кВт. В указанных условиях К.П.Д. плазмотрона близок к 95%.

Следует отметить, что изменение мощности в плазме в 2 раза приводит к изменению температуры газа на  $\sim 4\%$ , так как последняя зависит только от диаметра плазменного образования. Исследования показали, что генератор низкотемпературной плазмы на волне  $H_{10}$  не может быть использован для нагрева газа выше 5000—6000 К.. Для получения более высоких температур газа может быть использована конструкция СВЧ плазмотрона, работающего на волне  $E_{10}$ .

Принципиальная схема разрядного устройства на волне типа  $E_{10}$  показана на рис. 9, б. Конструкция удобна для работы и при высоком, и при низком давлении газа. Расчеты показывают, что при возбуждении плазмотрона волной  $E_{10}$  удельная вкладываемая мощность быстро падает с ростом температуры. Высокий коэффициент передачи энергии сохраняется до очень высоких температур.

Данная конструкция обеспечивает получение безэлектродного разряда в металлической трубке без диэлектрической трубки. Через стандартный волновод прямоугольного сечения 1, сочлененный с круглым волноводом 2 так, что широкая стенка перпендикулярна оси круглого волновода, в трубе 2 возбуждается волна  $E_{10}$ . Разрядная камера 8 соединяется с трубой 2 при помощи дроссельного фланца 3. Тefлоновое или керамическое окно 4 отделяет трубу 2 от разрядной камеры 8. Коротко замыкающий поршень 6 служит для регулировки положения зоны разряда. Рабочий газ вводится в разрядную камеру через патрубки 9, обеспечивающие тангенциальный ввод газа. Для изоляции плазменного образования от тefлонового окна его конструкция обеспечивает осевой поддув через отверстие 5 в тefлоне, к которому газ подводится через патрубки 10. Нагретый газ выходит через сопло 7. Сопло охлаждается водой.

При вкладывании в разряд СВЧ мощности 10 кВт была получена температура газа 8000 К.

## 1.2. ТЕПЛОВЫЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

### 1.2.1. Измерение температуры плазмы по ее энтальпии

Из существующих немногочисленных методов измерения температуры газа наиболее распространен и хорошо разработан метод, основанный на измерении доплеровского уширения линий. Однако его трудно применять при высокой плотности и температуре плазмы из-за сложности получения достаточного разрешения, так как на доплеровское уширение накладывается уширение, обусловленное эффектом Штарка, а при низких температурах — из-за малости эффекта. Другие методы определения температуры тяжелых частиц имеют ограниченное применение. Так, метод, основанный на измерении скорости звука, применим только при очень малой степени ионизации и обладает недостаточным разрешением, а метод, использующий рассеяние монохроматического излучения лазера, требует больших размеров плазмы и результаты зависят от температуры электронов.

Измерение температуры плазмы по ее энтальпии. Наиболее удобен и оперативен метод определения температуры газа по его энтальпии, отличающийся от других простотой и возможностью проводить локальные измерения. Впервые для плазмы этот метод был применен Греем [20]. Определение энтальпии основано на измерении теплового потока, воспринимаемого датчиком при отборе ионизованного газа через внутренний капилляр (рис.1.10,а). Зная расход газа через капилляр  $G_r$  и температуру газа на выходе из датчика  $T_r^0$ , можно определить Энтальпию плазмы:

$$H = (Q/G_r) + H_0, \quad (1)$$

где  $Q$  —тепловой поток, полученный датчиком при отборе газа;

$H_0$  — энтальпия газа, соответствующая температуре  $T_0$ .

Конструкция датчика (см. рис.1.10, а) состоит из коаксиальных тонкостенных трубок, позволяющих охлаждать датчик и отбирать газ в передней критической точке продольно обтекаемого цилиндра.

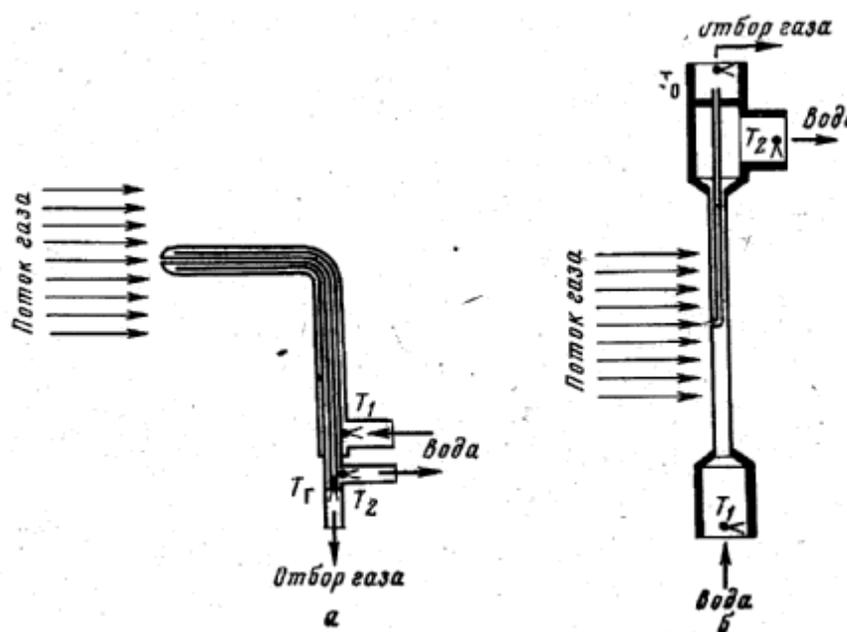


Рис. 1.10. Схема энтальпийных датчиков: а - по данным Грея [1];  
б - с повышенной чувствительностью [2].

На рис.10,б несколько иной энтальпийный датчик с разнесенными входом и выходом охлаждающей воды. Такая конструкция требует только двух коаксиальных трубок, что позволяет значительно уменьшить его диаметр и тем самым увеличить чувствительность, не изменяя способа измерения энтальпии. Минимальный диаметр датчика составлял 1,35 мм, что значительно меньше минимального диаметра (2,3 мм) датчика Грея [20], а максимальный диаметр 5 мм. Датчики изготовлены из меди, никеля и нержавеющей стали. Диаметр отверстия для отбора

газа равен 6,4-1 мм. Схема измерения энтальпии плазмы приведена на рис.1.11.

Энтальпийный датчик устанавливался перпендикулярно потоку, так чтобы отверстие датчика, через которое отбирается газ, было направлено навстречу движению газа и находилось на передней критической линии цилиндра. Датчик центрировался относительно оси струи по темному пространству вблизи отверстия, образуемому при пропускании через внутренний капилляр холодного воздуха. Газ отбирался через датчик форвакуумным насосом, который соединялся с регистрирующим ротаметром через предварительно откачиваемую колбу. Данный датчик позволял также определять динамический напор струи плазмы.

При измерении температуры газа в плазме с помощью энтальпийного датчика очень важна его чувствительность. В соответствии с методом измерения энтальпии за чувствительность датчика принимается отношение теплового потока, полученного за счет протекания горячего газа через капилляр, к полному тепловому потоку, полученному датчиком в плазменном потоке:

$$\sigma = (\Delta T_f - \Delta T_n) / \Delta T_f,$$

где  $\Delta T_f$  и  $\Delta T_n$  — увеличение температуры охлаждающей воды с отбором и без отбора газа соответственно. При рассмотрении чувствительности, исходя из условий теплоотдачи между плазмой и стенкой датчика, Грей [20] предположил наличие ламинарного течения снаружи датчика и внутри капилляра. Так как параметры плазмы вдоль датчика изменяются, уравнения, описывающие теплообмен, нелинейны. Грей, вводя эффективную температуру и усредняя параметры плазмы по длине датчика, получил среднее значение чувствительности, которое затем сравнивал с

экспериментальными значениями. Хорошего совпадения не наблюдалось.

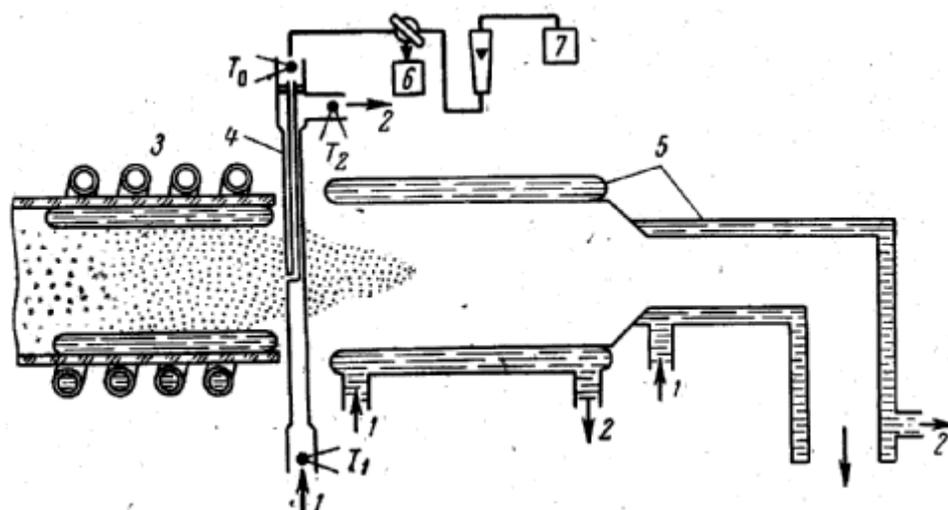


Рис.1.11. Схема измерения энтальпии плазмы:

1 и 2-соответственно вход и выход охлаждающей воды в калориметре; 3-высокочастотная горелка; 4-Энтальпийный датчик; 5-калориметр; 6-датчик; 7-откачивающая система.

Однако точное значение чувствительности не всегда требуется, более важна максимальная чувствительность, которая позволяет определить пределы применимости энтальпийного датчика. Максимальная чувствительность достигается, когда отбираемый газ полностью отдает свое тепло, охлаждаясь в капилляре до температуры стенки. Массовая скорость газа, проходящего через датчик, не должна превышать массовой скорости течения плазмы, иначе структура потока будет нарушена. Формулу для вычисления максимальной чувствительности энтальпийного датчика можно представить в виде:

$$\sigma_{\max} = H\rho v S_K / Q_f, \quad (3)$$

где  $\rho v$ -массовый расход отбираемого газа ( $\rho$ -плотность газа;  $v$ -скорость его в трубке);  $S_k$ -площадь поперечного сечения входного отверстия для отбора газа;  $Q_f$ -полный тепловой поток, получаемый датчиком. На рис.1.12 представлены расчетные зависимости максимальной чувствительности датчика от температуры при разных фиксированных скоростях течения аргонной плазмы. Полный тепловой поток  $Q_f$  вычислялся из условий теплообмена датчика с потоком плазмы по критериальной зависимости:

$$Q_f = Q_n + H\rho v S_k, \quad (4)$$

где

$$Q_n = 0,5 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,4} \left[ \frac{(\rho\mu)_{nl}}{(\rho\mu)_{cm}} \right]^{0,2} \cdot \left\{ 1 + \text{Le}_{амб}^{0,52} \frac{H_i}{H} \right\} \frac{\Delta H}{c_p} \pi dl$$

-тепловой поток на датчик без отсоса газа;  $\lambda$ -коэффициент теплопроводности;  $\rho$ -плотность;  $\mu$ -вязкость;  $c_p$ -теплоемкость;  $H_i$ -энтальпия ионизации;  $\Delta H$ -энтальпийный напор;  $\text{Le}_{амб}$ -критерий Льюиса — Семенова, учитывающий только амбиполярную диффузию.

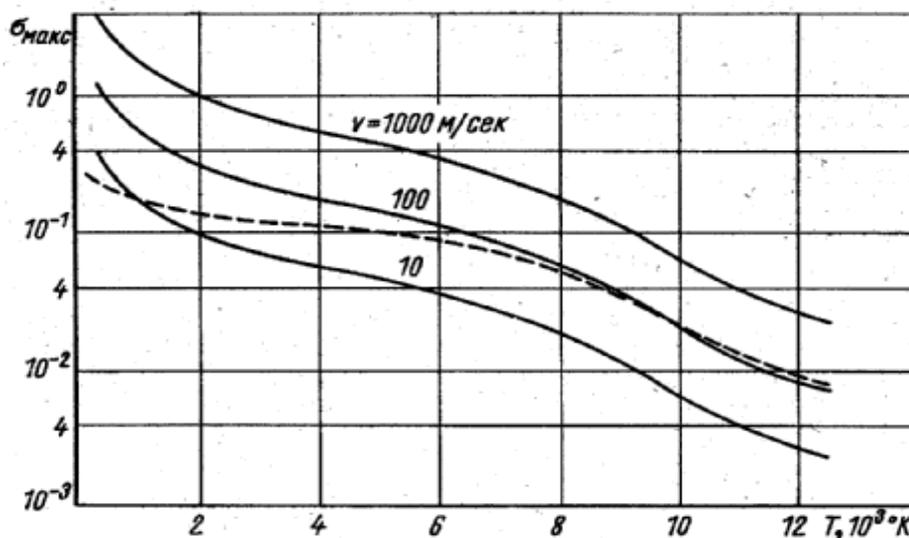


Рис.1.12. Зависимость максимальной чувствительности энтальпийного датчика от температуры плазмы аргона ( $d=5$  мм,  $l=10$  мм):  
 $v=v_0 T/T_a$  (при  $\Gamma_0=10^3$  К,  $a=10$  м/сек).

Индексы «пл» и «ст» относят свойства газа к температуре плазмы и стенки соответственно:  $d$  и  $l$ -диаметр и длина поверхности датчика, находящейся в плазме. Расчет производился на единицу длины  $l=1,0$  см для  $d=0,5$  см. Диаметр капилляра считался равным 1,0 мм. В соответствии с рис.1.12 чувствительность датчика с увеличением температуры падает, а с увеличением скорости течения плазмы растет. Пунктирная кривая вычислена для условий, когда скорость течения прямо пропорциональна температуре плазмы. Измерения более точны в области низких температур и высоких скоростей плазмы. В соответствии с работой [20] при переходе к молекулярному газу, например к кислороду, чувствительность датчика возрастает.

Учитывая рассмотренную чувствительность энтальпийного датчика и погрешности определения теплового потока при отборе газа через капилляр  $\pm 5\%$ , градуировки расходомера  $\pm 3\%$ , расчета энтальпии в зависимости от температуры  $\pm 2\%$ , можно считать, что погрешность определения температуры составляет  $\pm 10\%$ . При отсутствии в плазме термодинамического равновесия точность определения температуры уменьшается, но погрешность при этом не превышает  $\pm 20\%$ . Измерение температуры тяжелых частиц плазмы по теплоотдаче к поперечно обтекаемому цилиндру. В последнее время развивается метод, основанный на измерении теплоотдачи от плазмы к вносимым телам [2, 5, 6]. Критериальная зависимость позволяет установить связь между плотностью теплового потока  $q$ , скоростью течения плазмы или динамическим напором и температурой. Обычно тепловой поток измеряют с помощью цилиндрического калориметрического датчика, а скорость течения плазмы — по измерениям динамического напора. Критериальная зависимость используется в следующем виде:

$$\frac{q}{\sqrt[4]{p}} = 0,6 \text{Pr}^{0,4} \frac{\lambda \rho^{0,25}}{\sqrt{d\mu}} \left[ \frac{(\rho\mu)_{пл}}{(\rho\mu)_{см}} \right]^{0,2} \left[ 1 + (Le^{0,52} - 1) \frac{H_D}{H} \right] \frac{\Delta H}{c_p}, \quad (5)$$

где  $p$ -динамический напор,  $H_D$ - энтальпия диссоциации.

В правой части все параметры зависят только от температуры и, следовательно, величину  $q/\sqrt[4]{p}$  можно вычислить и сопоставить с экспериментальными значениями. Из этого сопоставления и определяется температура плазмы. Точность определения температуры плазмы зависит от правильности выбора критериальной зависимости, точности определения условий теплообмена, погрешности определения теплофизических характеристик плазмы и погрешности измерения теплового потока и скоростного напора плазменной струи. Приведенная критериальная зависимость подтверждена экспериментально с погрешностью  $\pm 25\%$ . Погрешность вычисления температуры по тепловому потоку и скорости течения плазмы составляет  $\pm 10\%$ . в области температур , где имеет место ионизация или диссоциация газа.

### 1.2.2. Измерение тепловых потоков

Существующие методы измерения тепловых потоков плазмы по способам регистрации делятся на стационарные и "нестационарные [20-23], Стационарные методы основаны на измерении разности температуры охлаждающей воды, протекающей через исследуемую модель, помещенную в поток плазмы; нестационарные — на измерении зависимости температуры датчика во времени.

Нестационарные методы. Из нестационарных методов наиболее распространен метод измерения теплового потока с помощью датчика, представляющего собой металлическую

пластину, покрытую с одной стороны слоем теплоизоляции бесконечной толщины. Нестационарные методы определения тепловых потоков классифицируются по толщине металлической пластины и способу измерения ее температуры во времени.

### **1.2.3. Определение теплового потока по изменению температуры, поверхности датчика (метод тонкопленочного термометра сопротивления).**

При постоянном одномерном тепловом потоке через металлическую пластину конечной толщины, находящуюся в идеальном контакте с полубесконечным слоем изоляции, изменение температуры на поверхности контакта металла и изоляции описывается выражением [8]

$$T_m(l,t) = \frac{2\sqrt{am}}{\lambda_m} \cdot \frac{q}{1+A} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-A}{1+A}\right)^n \times \left[ 2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 l^2}{4a_m t}\right] - \frac{2n+1}{\sqrt{a_m}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(2n+1)l}{2\sqrt{a_m t}}\right) \right] \quad (6)$$

где  $T_1$ -температура металла;  $l$ -линейный размер;  $t$ -время;  $a_T$ -коэффициент температуропроводности металла;  $\lambda_m$ -коэффициент теплопроводности металла;  $A$ -отношение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности металла и изоляции:

$$A = \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \sqrt{\frac{a_m}{a_i}} \quad (7)$$

Если толщина металла значительно меньше характеристической толщины изолятора  $l_i$  которая, в свою очередь, меньше характеристической толщины металла  $l_m$ , приближенно означающей глубину проникновения теплового потока за время  $t$ , то средняя температура металлической пластины равна температуре контакта металла с изолятором

$$T_m(l,t) = \left(2\sqrt{a_i} / \sqrt{\pi\lambda_i}\right)qt \quad (8)$$

где  $q$ - плотность теплового потока к пластине.

Температура тонкой металлической пленки обычно измеряется по изменению ее электрического сопротивления  $R = R_0(1 + a_R T_m)$ , где  $R_0$ -электрическое сопротивление пленки при комнатной температуре;  $a_R$ -температурный коэффициент сопротивления.

#### 1.2.4. Экспоненциальный (калориметрический) метод.

В отличие от тонкопленочного термометра сопротивления в данном методе толщина металлической пластины  $l$  выбирается больше характеристической толщины металла  $l > \sqrt{a_m t}$ . В этом случае датчик поглощает практически все подводимое к нему тепло и тем самым является калориметром. Тепловой поток  $Q$ , поступающий в такое тело за время  $dt$ , равен изменению теплосодержания элемента:

$$q = l \rho_m c_p dT / dt \quad (9)$$

где  $c_p$ -теплоемкость;  $l$ -толщина и  $\rho_m$ -плотность материала датчика.

Так как датчик имеет конечные размеры, потери тепла от металлической пластины к изолятору искажают линейные характеристики нагрева такого калориметра. На рис.1.13 приведена зависимость отношения тепловых потоков, определяемая выражением:

$$Q_i / Q = \int_0^t q_i dt / q_0 t \quad (10)$$

где  $Q_i$ -тепловой поток от датчика к изолятору;  $q_0$ -плотность теплового потока к датчику от толщины датчиков и времени проведения опыта. Наличие небольших воздушных прослоек между датчиком и изолятором значительно снижает потери тепла. Изменение температуры пластины во времени, как и в случае

тонкопленочного термометра сопротивления [20], определяется через изменение электрических величин. Интегрируя выражение для распределения температуры по толщине металлической пластины, и в соответствии с формулой  $dU/dt = \alpha_R R_0 I \cdot dT/dt$ , характеризующей изменение напряжения  $U$  с изменением температуры датчика во времени, можно записать выражение для плотности теплового потока через среднюю температуру пластины :

$$q = \frac{1}{IR_0} \cdot \frac{\rho c_p l}{\alpha_R} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (11)$$

где  $I$ -сила тока, протекающего через датчик при напряжении  $U$ .

Выражение (11) справедливо только для одномерного теплового потока, когда каждый слой пластины имеет везде одинаковую температуру. В случае слишком толстого датчика тепло не успевает проникнуть на всю его толщину за время эксперимента и распределение температуры становится нелинейным. Для компенсации нелинейности распределения температуры вводится поправка [20].

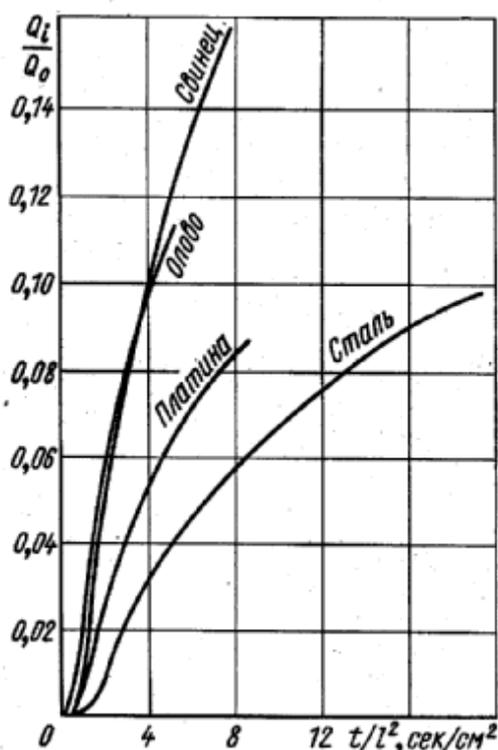


Рис.1.13. Утечки тепла от калориметра к изолятору для различных материалов датчика.

Температуру датчика можно регистрировать разными способами в зависимости от того, какое из выражений (10) или (11) используется. Для определения плотности теплового потока в соответствии с выражением (10) датчик заделывается в исследуемую модель, и при известных размерах и физических параметрах датчика изменение температуры во времени регистрируется дифференциальной термопарой. В работе [20] для измерения  $q$  использовались полые цилиндры с плоскими, сферическими и эллипсоидальными торцами с небольшой толщиной стенки. В работе [20] в качестве датчика применялись алюминиевые пробки большой толщины с заделанными внутрь термопарами. Для уменьшения погрешности, связанной с наличием радиальной составляющей теплового потока, которая обуславливает утечку тепла вдоль образующей модели, в работе [20] использовались модели в виде полусферы, состоящие из

отдельных сегментов. В процессе измерения температура сегментов изменялась с различной скоростью, и изотермические условия имели место лишь в начальный момент времени. Поэтому для расчета  $q$  использовалась экстраполяция зависимостей  $T(t)$  к моменту  $t=0$ , при котором справедливо уравнение (10).

Если для определения  $q$  используется выражение (11) то методика проведения эксперимента аналогична методике тонкопленочного термометра сопротивления. Так, в работе [20] использовалась платиновая пластина в контакте с моделью из пирекса с полусферической головкой. Датчик покрывал 30% головки модели.

При измерении тепловых потоков в сильно ионизованных газах возникало электрическое замыкание датчика по поверхности пленки [20], что было устранено покрытием датчика моноокисью или двуокисью кремния. В процессе отжига моноокись кремния переходит в двуокись. Толщина покрытий составляла приблизительно 0,01 мкм для тонкопленочного термометра сопротивления, а для массивного термометра сопротивления 1 мкм и 6 мкм [20].

Погрешности определения тепловых потоков данным методом связаны с неопределенностями, вносимыми самим датчиком. Трудно установить точную величину сопротивления, соответствующего эффективной поверхности датчика, а также контактное сопротивление соединений чувствительного элемента. Измеренные величины сопротивлений отличаются на  $\pm 15\%$  от величины, вычисленной в соответствии с размерами датчика и данными по сопротивлению материала [20].

### **1.2.5. Определение теплового потока по времени до начала плавления материала.**

Этот метод аналогичен выше описанному методу определения теплового потока по изменению температуры поверхности. В основе метода лежит решение одномерного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела при постоянной плотности теплового потока  $q$  на поверхности. Основной определяющей величиной является  $t_{пл}$ -время от начала нагревания тела до достижения температуры плавления  $T_{пл}$ . В соответствии с формулой (9):

$$q = (\sqrt{\pi} / 2) \sqrt{\rho c_p \lambda} / (t_{пл} T_{пл}) \quad (12)$$

В качестве датчиков для определения плотностей тепловых потоков от воздуха, нагретого в электродуговом подогревателе, использовались медные и алюминиевые цилиндры, защищенные с боковой поверхности стекловолокном. Время до начала плавления измерялось с помощью киносъемки или секундомером.

### **1.2.6. Метод калориметра с линейной характеристикой.**

Определение плотности теплового потока с помощью калориметра с линейной характеристикой основано на измерении температуры обратной поверхности датчика в отличие от экспоненциального калориметрического метода, в котором  $q$  определяется по изменению средней температуры пластины (датчика), перпендикулярной к потоку. Схема датчика и его одномерная модель приведены на рис.1.13. Датчик представляет собой пластину конечных размеров, через переднюю поверхность которой поступает равномерный тепловой поток, причем боковые

и обратная поверхности пластины теплоизолированы. Вследствие такой конструкции датчика задача определения температуры обратной поверхности и связи ее с  $q$  сводится (см. рис.1.13) к решению одномерного уравнения теплопроводности  $\partial^2 T / \partial x^2 = 1/a \cdot \partial T / \partial t$  с граничными условиями: при  $x=0$ ,  $q=\text{const}$ , при  $x=l$   $\partial T / \partial x = 0$ ; при  $t=0$ ;  $T=0$ . Решение уравнения имеет следующий вид [31 — 33]:

$$T = q \frac{2\sqrt{at}}{\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \text{ierfc} \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{at}} + \text{ierfc} \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{at}} \right] \quad (4) \quad (13)$$

где  $a$ ,  $\lambda$ -коэффициенты температуропроводности и теплопроводности;  $x$ -положение термопары. Значения суммы в зависимости от  $x/l$  и  $at/l^2$  протабулированы в работе. В работе [20] определено время  $t_1$ , по прошествии которого температура на обратной стороне датчика начинает возрастать линейно:

$$t_1 = 0,35l^2 / a \quad (5) \quad (14)$$

где  $l$ -в см;  $a$ -в см<sup>2</sup>/сек.

Из решения уравнения (13) следует, что температура передней поверхности по истечении переходного режима является также линейной функцией времени

$$T = \frac{lq}{\lambda} \left( \frac{at}{l^2} + \frac{1}{3} \right) \quad (15)$$

и достигает максимально допустимой температуры  $T_{\text{макс}}$  за время

$$t_2 = \frac{l^2}{a} \left( \frac{\lambda T_{\text{макс}}}{lq} - \frac{1}{3} \right) \quad (6) \quad (16)$$

Исходя из выражений (15) и (16), в работе [20] определена линейная часть температурно-временной характеристики

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \left( \frac{\lambda T_{\text{макс}}}{aq} l - 0,683l^2 / a \right) \quad (17)$$

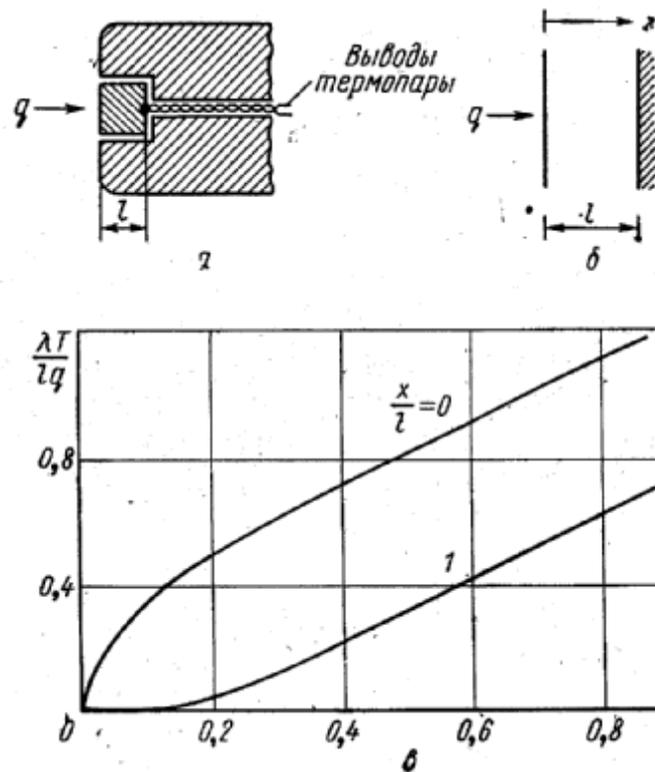


Рис. 1.13. Схема (а) калориметрического датчика с линейной характеристикой (в) его одномерной модели (б).

Для измерения высоких тепловых потоков желательно иметь максимальный временной интервал

$$\Delta t_{\text{макс}} = 0,366 \lambda^2 T_{\text{макс}}^2 / a q^2$$

при оптимальной толщине датчика.

$$l_{\text{опт}} = l T_{\text{макс}} / 1,366 q \quad (19)$$

На рис.1.14 приведены значения  $l_{\text{опт}}$  и  $\Delta t_{\text{макс}}$  для датчика из меди. Для  $q=10$  кВт/см<sup>2</sup> оптимальной толщиной калориметрического датчика, обеспечивающей максимальную величину временного интервала, является значение  $l_{\text{опт}}=0,5$  мм. При меньших плотностях тепловых потоков величина  $l_{\text{опт}}$  увеличивается и при  $q=1$  кВт/см<sup>2</sup> достигает 5 см. Следует отметить, что для снижения градиента температур в датчике диаметр рабочей поверхности должен быть меньше, или сравним с величиной  $l_{\text{опт}}$ . В работе [20] плотность теплового потока измерялась датчиком, где в качестве калориметра использовался медный цилиндр диаметром 3,2 и длиной 6,4 мм, помещенный в теплоизоляционный материал.

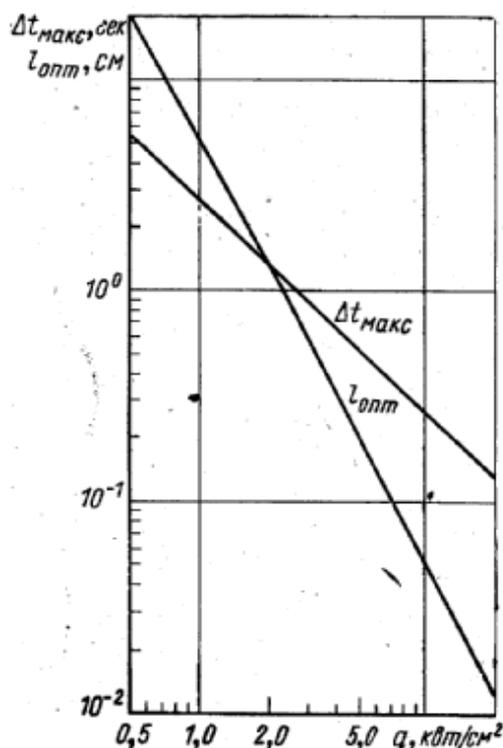


Рис.1.14. Зависимость  $l_{\text{опт}}$  и  $\Delta t_{\text{макс}}$  от плотности теплового потока.

В работе [20], в качестве датчика использовалась модель, позволяющая приблизить условия опыта к нагреванию бесконечной пластины, в виде стального цилиндра, окруженного двумя кольцами из теплоизоляционного материала.

### 1.2.7. Метод поверхностных точек.

Плотность теплового потока определяется по температурам лицевой и обратной поверхностей датчика. В соответствии с законом Фурье плотность потока тепла к плоской пластине определяется:

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (7) \quad (20)$$

где  $\lambda$ -коэффициент теплопроводности материала датчика;

$z$ -координата по нормали к поверхности датчика. Таким образом, необходимо знать градиент температур в материале

датчика. Для бесконечной пластины толщиной  $z$ , градиент температур можно определить из решения уравнения теплопроводности с начальным  $T(z)|_{t=0} = f(z)$  и граничными условиями  $T(0, t) = \varphi_1(t)$  и  $T(l, t) = \varphi_2(t)$ , которые могут быть определены экспериментально.

Вычисленная зависимость  $T(z, t)$  подставляется в уравнение (20). Зная температуры передней и обратной поверхностей датчика, можно определить тепловой поток.

### 1.2.8. Метод цилиндрического термометра сопротивления.

В работе [20] для измерения тепловых потоков использовался калориметрический метод цилиндрического (проволочного) термометра сопротивления. Тепловой поток на единицу цилиндрического датчика (проволоки) определяется выражением  $Q_l = c_p m_l dT / dt$ , где  $c_p$  — теплоемкость материала датчика;  $m_l$  — масса проволоки на единицу длины. Изменение температуры проволоки обычно регистрируется путем измерения ее электрического сопротивления  $R_t = R_0(1 + \alpha_R T)$ , где  $\alpha_R$  — температурный коэффициент электрического сопротивления;  $R_0$  — электрическое сопротивление проволоки при температуре окружающей среды — атмосферы. Измерение  $R_t$  обычно производится с помощью мостовой схемы. Для упрощения вычислений теплового потока следует поддерживать постоянными напряжение  $U_0$ , подаваемое на мост, и силу тока  $I$ , протекающего через  $R_t$ . В этом случае напряжение  $U_t$ , измеряемое осциллографом, определяется выражением

$$U_t(x) = (R_t - R_0)I \quad (21)$$

Учитывая, что  $R_0 = 4\rho_R l / \pi d^2$ , где  $\rho_R$ -удельное электрическое сопротивление проволоки;  $l$ -ее длина, плотность потока

$$q(x) = \frac{\pi^2 \rho_c d^4}{16 \alpha_R \rho_R l} \cdot \frac{dU_t(x)}{dt} \quad (22)$$

где  $q(x)$ -плотность теплового потока в зависимости от положения датчика в потоке плазмы;  $\rho$ -плотность материала датчика;  $d$ -его диаметр;  $U_t(x)$ - падение напряжения на проволоке.

Данный метод для определения локальной плотности теплового потока требует применения пересчета измеренных значений  $q(x)$  в радиальное распределение.

### 1.2.9. Метод динамической термопары.

Как и большинство нестационарных калориметрических методов он основан на измерении поглощенного в датчике тепла, т. е. на измерении скорости нагрева спая термопары. Спай термопары изготовлялся в виде сферы или цилиндра. В последнем случае термопара сваривалась встык (бескорольковая термопара) и образовывала сплошной цилиндр.

В работе [20] термопара вводилась в плазму с помощью электромагнита. На рис.1.15 приведена схема устройства, позволяющего быстро вводить спай термопары в определенную точку плазмы. В схеме предусмотрена плавная регулировка времени выдержки термопары в плазме с помощью сопротивлений  $R7$  и  $R8$  в пределах 0,05—10 сек, что позволяет предохранить термопары от перегрева. Плотность теплового потока вычислялась с помощью выражений для цилиндра и сферы соответственно

$$q = \rho_c \frac{d}{4} \cdot \frac{dT}{dt} \text{ и } q = \rho_c \frac{d}{6} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (23)$$

где  $d$ -диаметр;  $\rho$ -плотность;  $c_p$ -теплоемкость термопары.  
 Данный метод позволяет измерять непосредственно локальную плотность теплового потока.

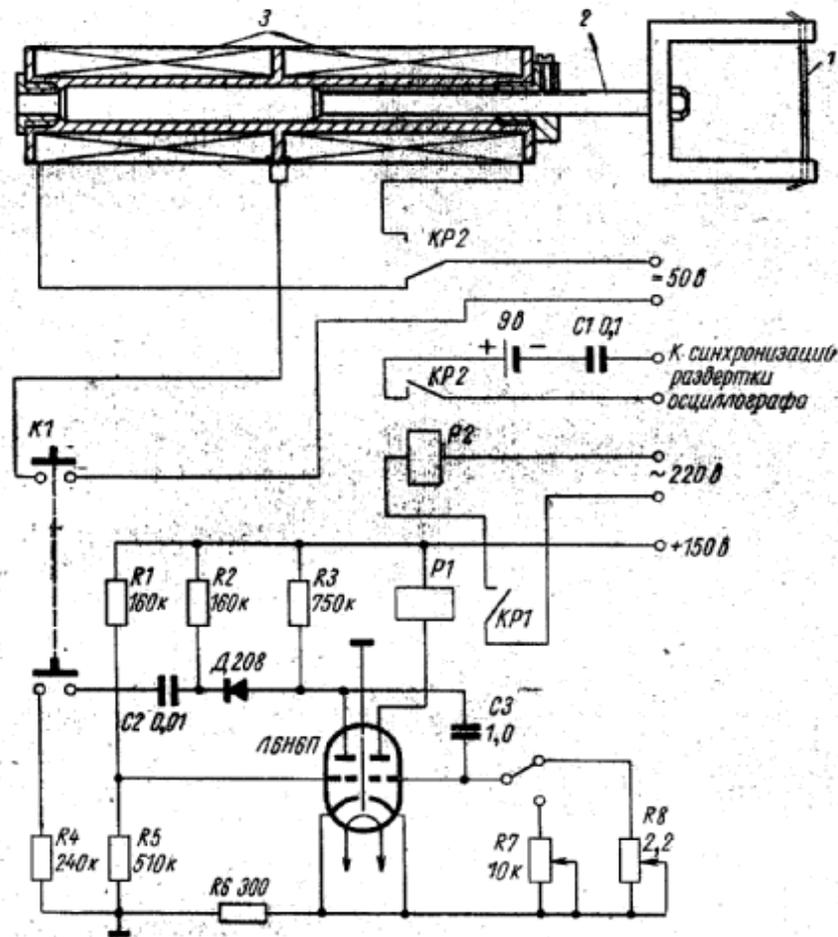


Рис. 1.15. Схема динамической термопары:

1-бескорольковая термопара; 2-подвижный шток; 3-электромагнит; К1-кнопка пуска; Р1-реле управления (РСМ-2); Р2 -реле переключения обмоток магнита (МКУ-48)

### 1.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА

#### 1.3.1. Основные стадии взаимодействия канала высокочастотного факельного разряда с потоком холодного плазмообразующего газа

Общие требования к перемешиванию. Плазмохимический процесс начинается с перемешивания сырья с плазмой. Под перемешиванием будем понимать процесс распределения сырья в потоке плазмы для достижения заданной степени однородности концентрации, скорости и температуры среды в поперечном сечении реактора за время, меньшее, чем время пребывания среды в реакторе. Перемешивание считается полным, когда выравниваются средние по времени значения скорости, температуры и концентрации компонентов.

На первой стадии смешения компоненты распределяются по объему равномерно в виде турбулентных глобул, внутри которых распределение неравномерное. На второй стадии за счет процессов диффузии происходит выравнивание концентраций на молекулярном уровне.

При перемешивании глобулы дробятся, пока размер их станет сравнимым по порядку величины с масштабом Колмогорова:

$$l_k = 10 l \text{Re}^{-\frac{3}{4}}$$

где  $l$ -характерный линейный размер потока.

Характерная продолжительность молекулярной диффузии в масштабе  $l_k$  значительно меньше продолжительности уменьшения размеров глобул в турбулентном потоке. Поэтому скорость процесса перемешивания определяется скоростью уменьшения размеров крупных глобул.

Скорости плазмохимических реакций столь высоки, что характерная продолжительность химических превращений становится сравнимой с характерной продолжительностью процессов переноса. Таким образом, химические превращения частично происходят уже при перемешивании, что обуславливает в итоге разную глубину взаимодействия компонентов и ухудшение качества или уменьшение выхода целевых продуктов. Отсюда жесткие требования к скорости перемешивания. Считается, что продолжительность перемешивания должна быть на порядок меньше продолжительности плазмохимического процесса в целом.

Высокая скорость перемешивания достигается при взаимодействии струйных течений. Подача в реактор струй газообразного или жидкого сырья обычно не вызывает затруднений. Предварительно диспергированное и распределенное в газе или жидкости твердое сырье можно подавать в реактор также в виде струи, на которую распространяются закономерности хорошо разработанной теории двухфазного течения.

В общем случае интенсивность перемешивания струй зависит от следующих факторов:

- 1) характерного линейного размера и формы устья струй;
- 2) угла атаки струй;
- 3) характеристики турбулентности струй;
- 4) относительного шага между струями;
- 5) отношения скоростных напоров струй;
- 6) отношения диаметров устьев струй и др.

### 1.3.2. Струйная модель коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона.

При движении газа или жидкости в потоке возникают поверхности тангенциального разрыва; течения по обе стороны такой поверхности называются струйными. На поверхности раздела происходит разрыв скорости течения, температуры, концентрации, тогда как распределение статического давления остается непрерывным [24].

На поверхности тангенциального разрыва в связи с его неустойчивостью возникают вихри, вследствие чего между соседними струями происходит поперечный перенос количества движения, теплоты и вещества. На границе двух струй формируется область конечной толщины с непрерывным распределением скорости, температуры и концентрации; эта область называется струйным турбулентным пограничным слоем.

Утолщение струйного пограничного слоя, состоящего из увлеченного вещества окружающей среды и заторможенного вещества самой струи, приводит, с одной стороны, к увеличению поперечного сечения, а с другой стороны — к утончению ядра струи (рис.1.16).

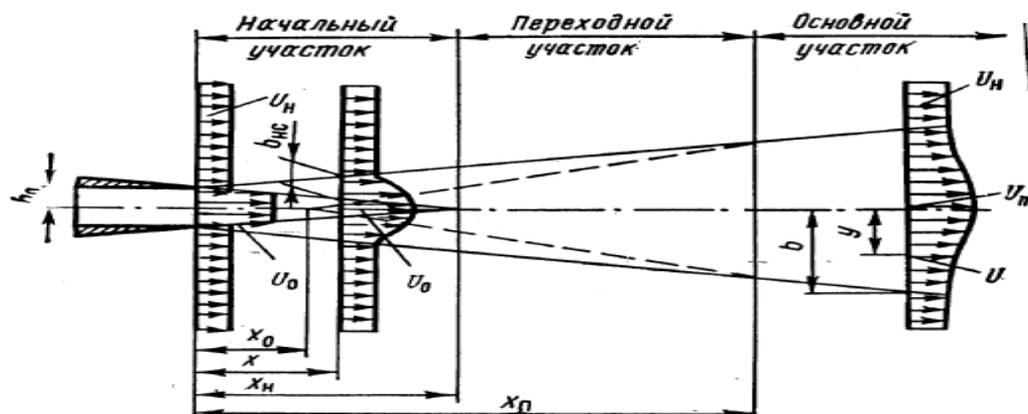


Рис. 1.16. Схема течения в струе.

Часть струи, в которой имеется потенциальное ядро течения, называют начальным участком. Скорость в потенциальном ядре постоянна. Далее по течению следуют переходной и основной участки. Струя, распространяющаяся в покоящейся среде, называется затопленной. В такой струе поперечные составляющие гораздо меньше продольных составляющих величин. Опыты показывают, что профили избыточных значений скорости (рис.17), температуры и концентрации как в затопленной турбулентной струе, так и в струе, распространяющейся в спутном потоке, имеют одинаковую универсальную форму:

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_M} = \frac{U - U_H}{U_M - U_H} = f \cdot \frac{y}{y_c} \quad (25)$$

где  $U$ -скорость на расстоянии  $y$  от оси струи;  $U_M$ -скорость на оси струи;  $U_H$ -скорость спутного потока;  $y_c$ -расстояние от оси струи до места, в котором избыточная скорость  $U_c$  вдвое меньше своего максимального значения:

$$U_c = U_H = 0,5(U_M - U_H) \quad (26)$$

Для описания профилей скорости на основном участке струи любой формы Г. Шлихтинг теоретически получил зависимость

$$\frac{U - U_H}{U_M - U_H} = f(\eta) = 1 - \eta^{3/2} \quad (27)$$

$\eta = y/b$ -расстояние от точки со скоростью  $U$  до оси струи, выраженное в долях радиуса данного сечения струи.

Из уравнения легко определяется относительное расстояние до точки, в которой избыточная скорость вдвое меньше, чем на оси струи

$$\eta_c = \frac{y_c}{b} = 0,441 \quad (28)$$

Схема развития струи газа в поперечном потоке приведена на рис.1.18.

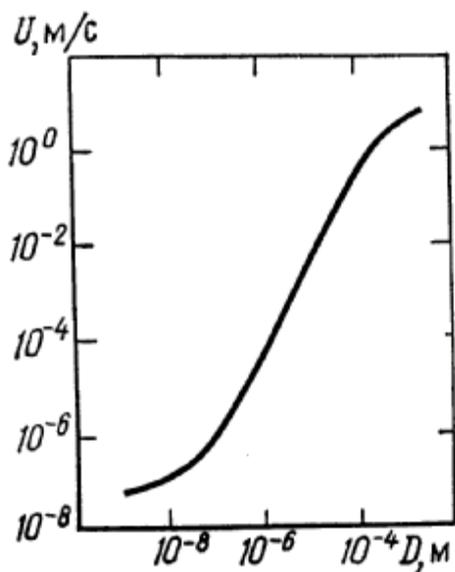


Рис.1.17. Профиль безразмерной избыточной скорости на основном участке струи.

Рис.1.18.Схема развития струи в поперечном потоке газа.

На основании многочисленных экспериментов Ю. В. Ивановым получено уравнение оси струи в сносящем потоке для  $\alpha = 90^\circ$ :

$$\frac{ay}{d} = 195 \left( \frac{p_1 U_1^2}{p_2 U_2^2} \right)^{1,3} \left( \frac{ax}{d} \right)^3 \quad (29)$$

где а-коэффициент структуры струи,  $0,06 \leq a \leq 0,008$ .

Абсолютная величина проникновения газовой струи в поток определяется по формуле:

$$h = kd \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (30)$$

где k-опытный коэффициент,  $k=2,2$ ; U-скорость;  $\rho$ -плотность; индекс «1» относится к сносящему потоку; индекс «2»- к струе. Для любого коэффициента структуры формула может быть записана так:

$$\frac{h}{d} = \frac{0,132 U_2}{a U_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (31)$$

При средних значениях  $a$  и углах атаки  $45^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$  дальнобойность струи может быть представлена в виде

$$aD_1 = \frac{ax}{d} = k_1 \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (32)$$

где  $k_1 = 0,1, 0,11, 0,12, 0,11, 0,1$  для углов атаки  $a = 45, 60, 90, 120$  и  $135^\circ$  соответственно;  $D_1$ -дальнобойность струи, т. е. относительное расстояние  $x/d$  по нормали от плоскости устья до места на оси струи, в котором проекция осевой скорости на ось  $x$  составляет 5 % от устьевой скорости струи. Из последнего уравнения видно, что наибольшей дальнобойностью обладают струи с углом атаки  $a = 90^\circ$ . Диаметр струи в поперечном потоке можно определить из уравнения

$$D_0 = \frac{0,098}{a} dq^{0,5} \omega^{-0,13}, \quad (33)$$

где  $q$ -гидродинамический параметр;  $\omega$ -отношение плотностей смешивающихся газов.

При смешении холодного газа с плазмой  $\omega = 0,1 \dots 0,15$

$$q = \rho_2 \omega_2^2 / \rho_1 \omega_1^2, \quad (34)$$

индекс «1» относится к основному потоку, индекс «2» — к струе.

В действительности сечение круглой струи, развивающейся в поперечном потоке, приобретает подковообразную форму, обращенную выпуклой стороной навстречу потоку. Это вызвано тем, что за струей, непроницаемой для потока, образуется циркуляционная зона. Зависимость дальнобойности струи от гидродинамического параметра удовлетворительно аппроксимируется уравнением

$$h = 2,48 dq^{0,26}, \quad (35)$$

Глубина проникновения ряда струй в поперечный поток газа может быть определена по формуле

$$h = k_s \sin \alpha d \frac{U_2}{U_1} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (36)$$

где  $k_s$ -коэффициент относительного шага  $k_s$  (рис. 1.19). На рис.1.19  $s$ -шаг между осями отверстий;  $d$ -диаметр отверстий.

Интересно отметить, что отношение диаметра струи в потоке  $D_c$ , измеренного на расстоянии  $h$  от устья струи, является величиной постоянной

$$\frac{D_c}{h} = 0,75. \quad (37)$$

Экспериментально показано, что чем меньше относительный шаг отверстий, тем меньше глубина проникновения струй в поток.

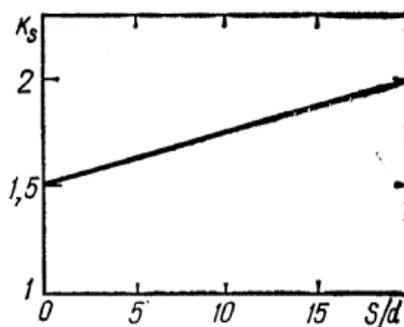


Рис. 1.19. Зависимость  $k_s$  от  $S/d$

### 1.3.3. Расчет и оптимизация термических параметров коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона

Существенным отличием процесса перемешивания в плазмохимическом реакторе от перемешивания свободных струй является ограничение объема перемешивания стенками реактора. Поток можно считать свободным, пока его пограничный слой не соприкоснется со стенками реактора. Взаимодействие потока со стенками реактора приводит к дополнительной турбулизации, изменению траектории движения, возникновению циркуляционных течений. Особенно усложняется картина течения при столкновении встречных струй [24].

Для типичных вариантов организации процесса перемешивания в плазмохимическом реакторе получены эмпирические соотношения, которые позволяют определить длину зоны перемешивания  $L$ . Зная величину  $L$ , можно легко определить продолжительность процесса перемешивания:

$$t = L/U,$$

где  $U$ - линейная скорость движения среды в реакторе.

Наибольший интерес представляют два варианта, перемешивания, при которых струи плазмы и сырья вводятся в реактор: а) спутно; б) под углом друг к другу. Частным случаем второго варианта является встречная подача струй. Применяется также подача нескольких струй в основной поток, причем возможна подача как струй плазмы в поток сырья, так и струй сырья в поток плазмы.

Схема перемешивания плазменного теплоносителя со спутным потоком холодных реагентов показана на рис.1.20. Плазма вводится в цилиндрическую камеру смешения диаметром  $D$  через отверстие диаметром  $d$ . В этом случае распределение теплоносителя в реакторе можно считать установившимся, когда внешние границы потока пересекутся со стенками цилиндрической камеры смешения при условии, что  $L$  больше длины начального участка струи. Показано, что в широком диапазоне значений числа Рейнольдса скорости и температуры турбулентных струй:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 0,22 \dots 0,3. \quad (39)$$

Отсюда

$$L = D / \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = (1,7 \dots 1,8) D. \quad (40)$$

При поперечном вводе плазмы в поток сырья (рис.1.21) дальнобойность плазменной струи  $h$ , т. е. расстояние по радиусу от стенки реактора до оси вводимого потока в точке, где оба течения становятся соосными, оценивается выражением

$$h/d = 2,48q^{0,26}, \quad (41)$$

здесь

$$q = \frac{\rho_1 U_1^2}{\rho_2 U_2^2}, \quad (42)$$

где  $\rho_1$ ,  $U_1$ -плотность и линейная скорость холодного газа соответственно;  $\rho_2$ ,  $U_2$ -плотность и линейная скорость горячего газа соответственно.

Соотношение справедливо для  $U_1=10\dots50\text{м/с}$ ;  $U_2=400\dots700\text{м/с}$ ;  $T=(3\dots4)\cdot 10^3\text{ К}$ . Длина зоны смешения  $L$  при введении плазменной струи в холодный поток меньше, чем при введении холодной струи в поток плазмы, поскольку угол раскрытия плазменной струи больше, чем холодной. Длина зоны смешения  $L$  в цилиндрическом канале обычно не превышает  $2D$ . Уменьшая диаметр канала  $D$ , можно уменьшить  $L$ , однако всегда должно соблюдаться условие  $L \gg 1$ . Исходя из приближенной модели турбулентной струи и последнего условия, можно установить соотношение между диаметром устья и смесительного участка реактора  $D = (2,5\dots3,5) d$ .

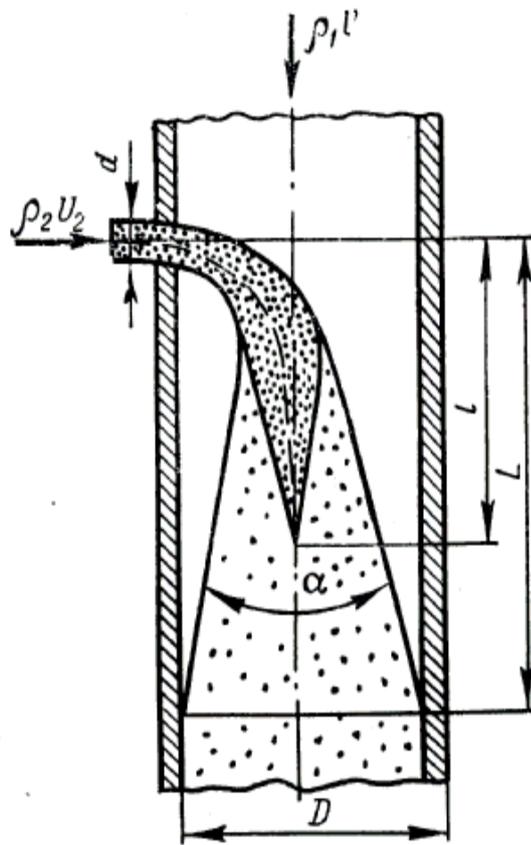
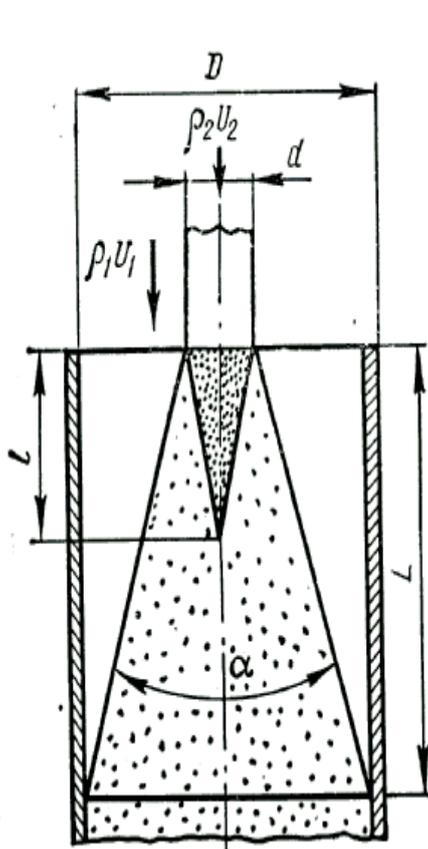


Рис.1.20. Схема перемешивания  
плазменного теплоносителя со  
спутным потоком.  
сырья.

Рис.1.21.Схема перемешивания  
при поперечном вводе  
теплоносителя в поток  
сырья.

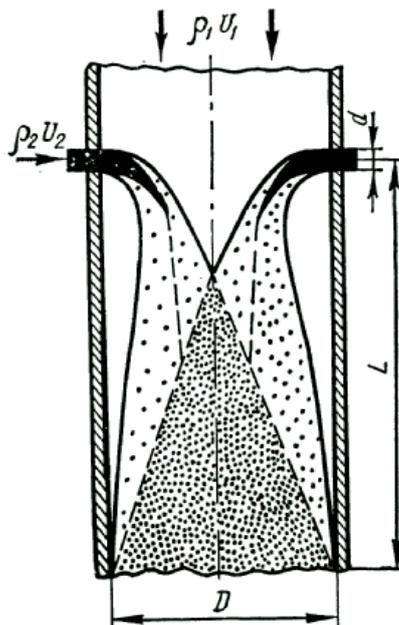


Рис. 1.22. Схема перемешивания при радиальной подаче струй

При радиальной подаче нескольких струй в реактор (рис. 1.22) возможны два варианта.

1. Струи достигают оси смесителя и разворачиваются по потоку.

2. Струи соударяются на оси смесителя.

Во втором варианте перемешивание является более интенсивным вследствие дополнительного дробления сталкивающихся струй. При перемешивании с соударяющимися струями рекомендуется соотношение

$$D \leq (6 \dots 8)d. \quad (43)$$

Перемешивание будет эффективным при  $q > 100$ . Если  $q > 200 \dots 300$ , то длина зоны перемешивания практически не зависит от значения гидродинамического параметра  $q$  и обычно не превышает  $2D$ . При радиальной подаче нескольких струй плазмы пропорционально уменьшается единичная мощность плазмотрона. Это позволяет создавать агрегаты большой единичной мощности за счет работы нескольких плазмотронов на одну камеру смешения.

Большое распространение получил предложенный М. Ф. Жуковым с сотрудниками трехдуговой плазмохимический реактор, в котором струи плазмы вводятся в камеру смешения по нормали или под углом к оси холодного потока. Экспериментально установлено, что смешение плазменных струй с холодным сносящим потоком сырья наиболее интенсивно при соблюдении условия

$$\varphi = \frac{F_{и} \rho_2 U_2^2}{F_{я} \rho_1 U_1^2}, \quad (44)$$

где  $F_{и}$ -площадь сечения канала истечения сносящего потока;  $F_{я}$ -площадь сечения ядра, образовавшегося при соударении плазменных струй.

С достаточной степенью точности можно принять

$$F_{\text{я}}=0,785d^2 \quad (45)$$

где  $d$ -диаметр сопла плазмотрона.

Иногда более целесообразна подача нескольких сырьевых струй в соосный с реактором поток плазмы. В этом случае задают допустимую продолжительность смешения, а также расход сырья. Затем определяют скорость осевого потока на входе в смеситель

$$U_1 = \left[ V_0 \left( \frac{l}{0,004\beta\sqrt{T/P}} \right)^{-2} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (46)$$

где  $V_0$ -объемный расход газа осевого потока при нормальных условиях;  $t$ -заданная продолжительность смешения;

$$\beta = \frac{1+m_2/m_1}{1+m_2/2m_1},$$

здесь  $m_1$ ,  $m_2$ -массовые скорости осевого потока и вводимых в него струй соответственно;  $T$ ,  $P$ -температура и давление в начальном сечении соответственно.

Диаметр осевого потока в начальном сечении определяется по уравнению

$$D = 0,00114 \sqrt{\frac{V_{01}}{U_1} \cdot \frac{T}{P}}. \quad (48)$$

Путь смешения можно легко найти из экспериментальной зависимости

$$L = 3,2D. \quad (49)$$

Использование закрученных струй интенсифицирует перемешивание. Основными отличиями закрученных струй являются более интенсивное расширение струи и быстрое затухание избыточной скорости и других параметров вдоль ее оси. Следует учитывать, что при интенсивной закрутке струи вблизи устья на оси возникает область возвратного течения.

На основе выше описанных формул был проведен расчет зависимости угла раскрытия плазменной струи коаксиального высокочастотного факельного плазмотрона от длины разрядной зоны. Результаты занесены в таблицу 1.1. и представлены графически на рисунке 1.23.

Табл.1.1.

<b>Диаметр разрядной зоны D,м</b>	<b>Длина разрядной зоны L,м</b>	<b>Значения угла раскрытия, <math>\alpha</math>,град</b>
0,048	0,01056	24,81484
0,048	0,01104	25,90553
0,048	0,01152	26,99147
0,048	0,012	28,07249
0,048	0,01248	29,14843
0,048	0,01296	30,21915
0,048	0,01344	31,28449
0,048	0,01392	32,34432
0,048	0,0144	33,39849
0,048	0,01488	34,44687
0,048	0,01536	35,48934
0,048	0,01584	36,52578
0,048	0,01632	37,55607
0,048	0,0168	38,58009
0,048	0,01728	39,59775
0,048	0,01776	40,60895
0,048	0,01824	41,61358
0,048	0,01872	42,61157
0,048	0,0192	43,60282
0,048	0,01968	44,58726
0,048	0,02016	45,56481

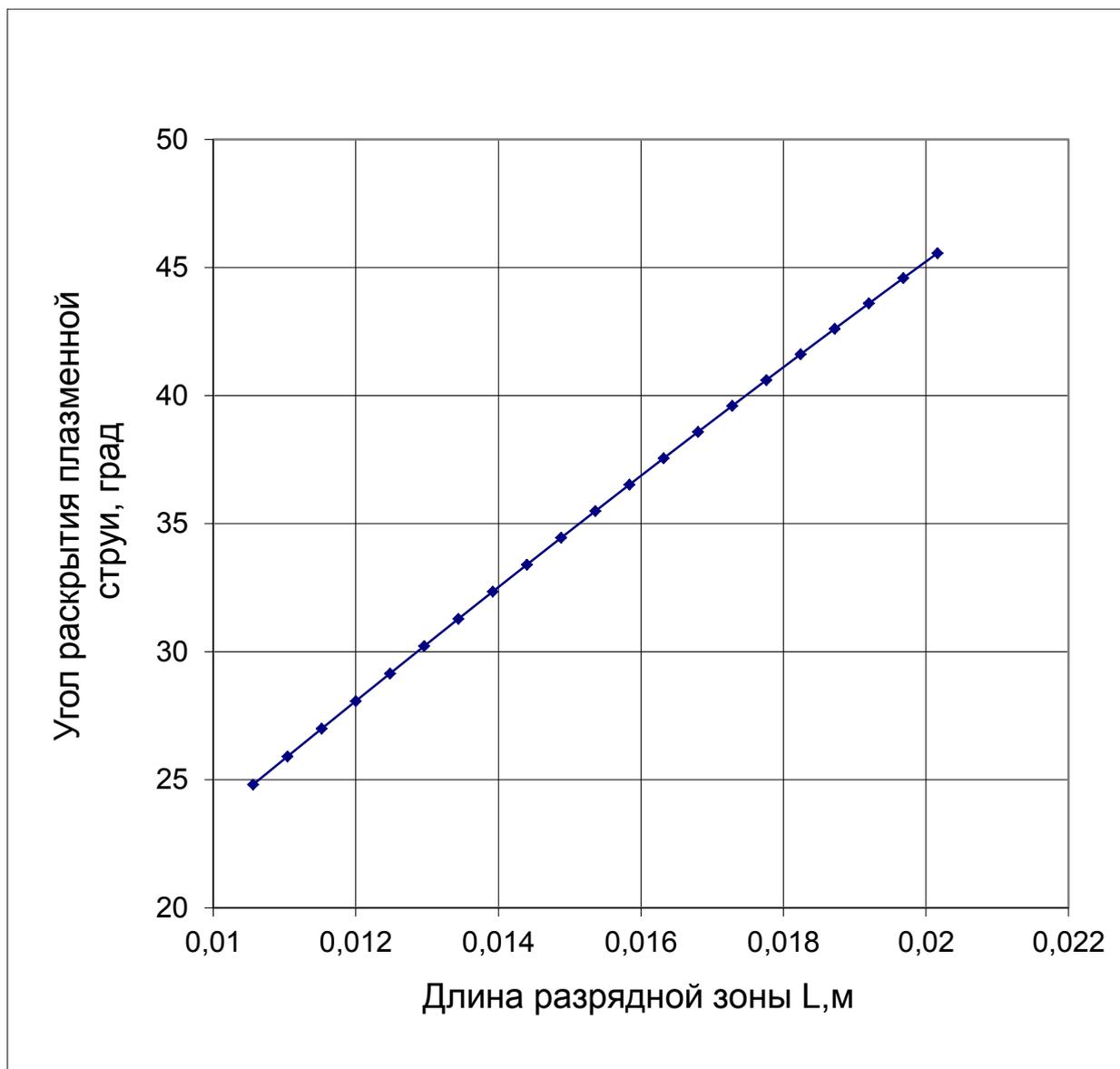


Рис.1.23. Влияние длины разрядной зоны на угол раскрытия плазменной струи ВЧФП.

Таким образом из графика видно, что при увеличении длины разрядной зоны высокочастотного факельного плазмотрона пропорционально будет увеличиваться угол раскрытия плазменной струи.

## Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА

#### 2.1.1. Описание экспериментальной установки на базе ВЧ факельного плазмотрона

Экспериментальная установка на базе высокочастотного факельного плазмотрона предназначена для генерирования потоков неравновесной воздушной плазмы с температурой до 4000К.

Общий вид установки представлен на рисунке 2.1.

В общем случае экспериментальная установка представляет собой функциональное объединение двух блоков:

- высокочастотный генератор (источник питания);
- высокочастотный (ВЧ) факельный плазмотрон.

Высокочастотный генератор (1) размещён в экранированном металлическом шкафу, обеспечивающем надёжную защиту от электромагнитного излучения, и предназначен для питания установки.

Основные технические характеристики генератора ВЧГ8-60/13 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Величина	Ед. изм.	Значение
Напряжение питающей сети	В	380
Частота питающей сети	Гц	50
Потребляемая мощность	кВт	100
Колебательная мощность	кВт	60±6
Рабочая частота	МГц	13,56±0,13
Коэффициент полезного действия	%	не менее 75

Напряжение анодное	кВ	10,4÷10,5
Ток анодный	А	7,6÷7,7
Ток сеточный	А	1,8
Расход охлаждающей воды	м <sup>3</sup> /ч	не менее 1,4

ВЧ факельный плазмотрон включает следующие основные узлы:

медный водоохлаждаемый электрод (2); узел ввода плазмообразующего и охлаждающего газа (3); водоохлаждаемый корпус плазмотрона (4); кварцевая труба (5).

Таблица 2.2

№ поз.	Наименование
1	Высокочастотный генератор ВЧГ 8-60/13
2	Медный водоохлаждаемый электрод
3	Узел ввода газа
4	Водоохлаждаемый корпус плазмотрона
5	Кварцевая труба
6	Слив охлаждающей воды
К	Компрессор
В1-В9	Вентили
М1, М2	Манометры
Р1-Р4	Ротаметры

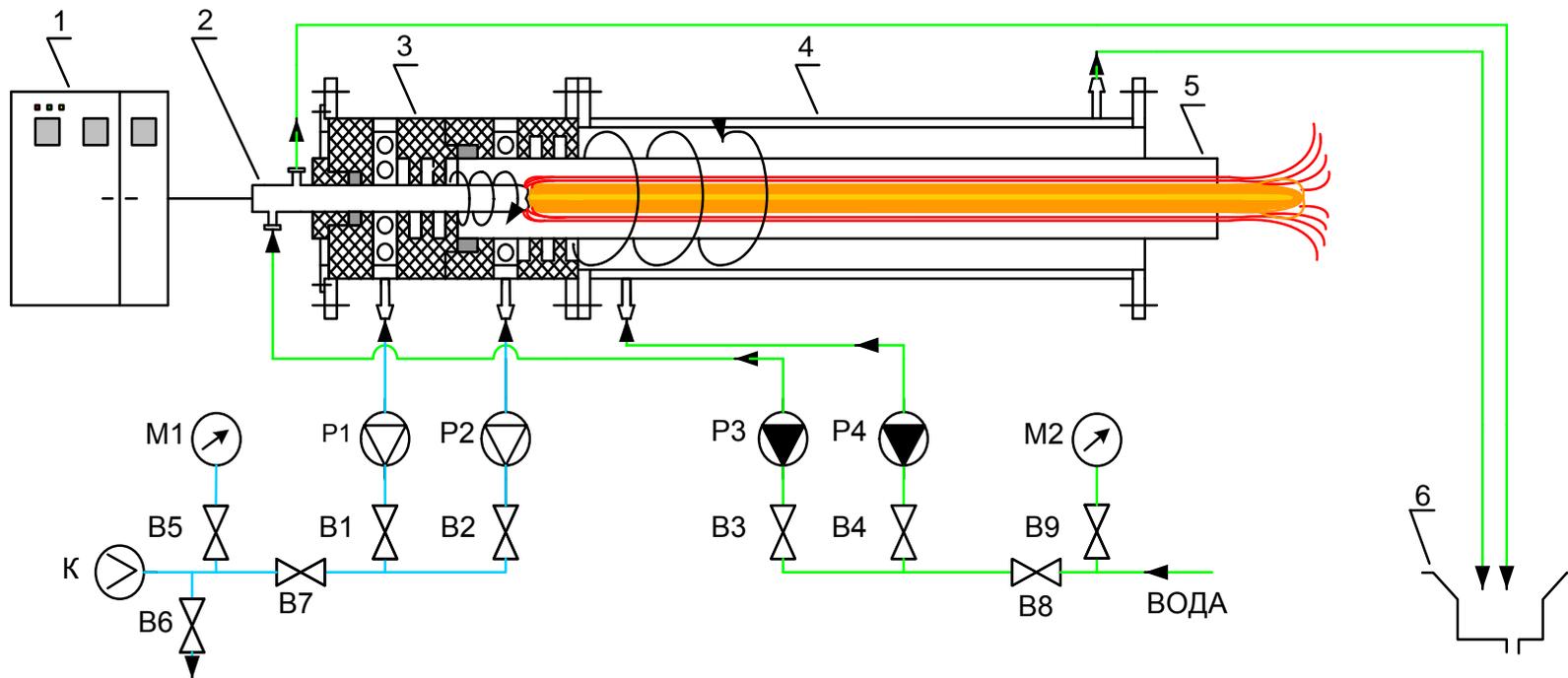


Рис.2.1. Схема экспериментальной установки на базе ВЧФП:

1- высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13; 2- водоохлаждаемый электрод; 3- узел ввода газа; 4- водоохлаждаемый корпус плазматрона; 5- кварцевая труба; 6- слив охлаждающей воды; К- компрессор; М1,М2- манометры; Р1-Р4- ротаметры; В1-В9-вентили.

## 2.1.2. Методика проведения экспериментов

Для решения поставленных задач по оптимизации режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона (ВЧФП) проводились эксперименты по следующей схеме:

5. Вначале, до возбуждения разряда в ВЧФП, измерить температуру охлаждающей воды на водоохлаждаемых элементах установки (аноде генераторной лампы, сеточной индуктивности, электроде и корпусе плазмотрона)

6. Включить компрессор К (рис.2.1.), вентилем В1 установить на ротаметре Р1 требуемый расход плазмообразующего газа  $Q_{пл}$ , который на протяжении всех экспериментов поддерживался постоянным, равным 3,4 г/с (100 дел.). Затем вентилем В2 на ротаметре Р2 установить расход охлаждающего газа  $Q_{ог}$ , значение которого в экспериментах изменялось от 0 до 3,5 г/с.

7. При помощи узла “поджиг” возбудить высокочастотный факельный разряд (ВЧФР), и позиционерами на лицевой стороне высокочастотного генератора (ВЧГ) установить нужный режим работы ВЧФП ( $J_a=2; 2,5; 3; 3,5$  А).

8. По истечении нескольких минут при установившемся режиме работы можно проводить замеры температуры охлаждающей воды на водоохлаждаемых элементах установки. Температура охлаждающей воды измерять при изменении степени газодинамического обдува кварцевой трубы и стенок корпуса плазмотрона от 0 до 3,5 г/с.

Целью проведения экспериментов было определение тепловой мощности на водоохлаждаемом корпусе ВЧФП и электроде, а также определение энтальпии и температуры плазменной струи при разных режимах работы ВЧФП.

5. В ходе проведения экспериментов, получаемые данные заносились в таблицы, на основе которых проводился расчет термических параметров ВЧФП.

Мощность, потребляемая ВЧГ от сети, определяем:

$$P_o = I_a \cdot U_a \quad [\text{кВт}], \quad (50)$$

где  $I_a$ - ток анода [А];  $U_a$ - напряжение анода [кВ].

Мощность, выделяемая на аноде:

$$P_a = \dot{m}_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4.186 \quad [\text{кВт}], \quad (51)$$

где  $\dot{m}_a$  - массовый расход воды, [кг/с];  $\Delta t_a$  - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $C_p$  - теплоемкость воды, [кКал/кг].

Мощность, выделяемая на сеточной индуктивности:

$$P_c = \dot{m}_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \cdot 4.186 \quad [\text{кВт}], \quad (52)$$

где  $\dot{m}_c$  - массовый расход воды, [кг/с];  $\Delta t_c$  - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $C_p$  - теплоемкость воды, [кКал/кг].

Мощность, выделяемая на электроде:

$$P_{эл} = \dot{m}_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \cdot 4.186 \quad [\text{кВт}], \quad (53)$$

где  $\dot{m}_{эл}$  - массовый расход воды, [кг/с];  $\Delta t_{эл}$  - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $C_p$  - теплоемкость воды, [кКал/кг].

Мощность, выделяемая на корпусе плазмотрона:

$$P_{кп} = \dot{m}_{кп} \cdot C_p \cdot \Delta t_{кп} \cdot 4.186 \quad [\text{кВт}], \quad (54)$$

где  $m_{kn}$  - массовый расход воды, [кг/с];  $\Delta t_{kn}$  - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [ $^{\circ}$ C];  $C_p$  - теплоемкость воды, [кКал/кг].

Мощность разряда рассчитывается по формуле:

$$P_{разр} = P_0 - (P_a + P_c + P_э) \quad [\text{кВт}]. \quad (55)$$

Соответственно, мощность плазменной струи будет определяться как разность мощности ВЧФР и мощности выделяющейся на корпусе плазмотрона, т.е.:

$$P_{стр} = P_{разр} - P_{кп} \quad [\text{кВт}]. \quad (56)$$

Термический КПД плазмотрона вычисляется по формуле:

$$\eta_n = \frac{P_{стр}}{P_{разр}} \cdot 100\% \quad (57)$$

Установочный КПД вычисляется по формуле:

$$\eta_{уст} = \frac{P_{стр}}{P_0} \cdot 100\% \quad (58)$$

Энтальпия ВЧФР рассчитывается по формуле:

$$H_T = H_0 + \frac{P_{разр}}{Q_g} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right], \quad (59)$$

где  $Q_g$  - массовый расход плазмообразующего газа [кг/с].

Среднемассовую температуру ВЧФР определяем с помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рисунке 2.2..

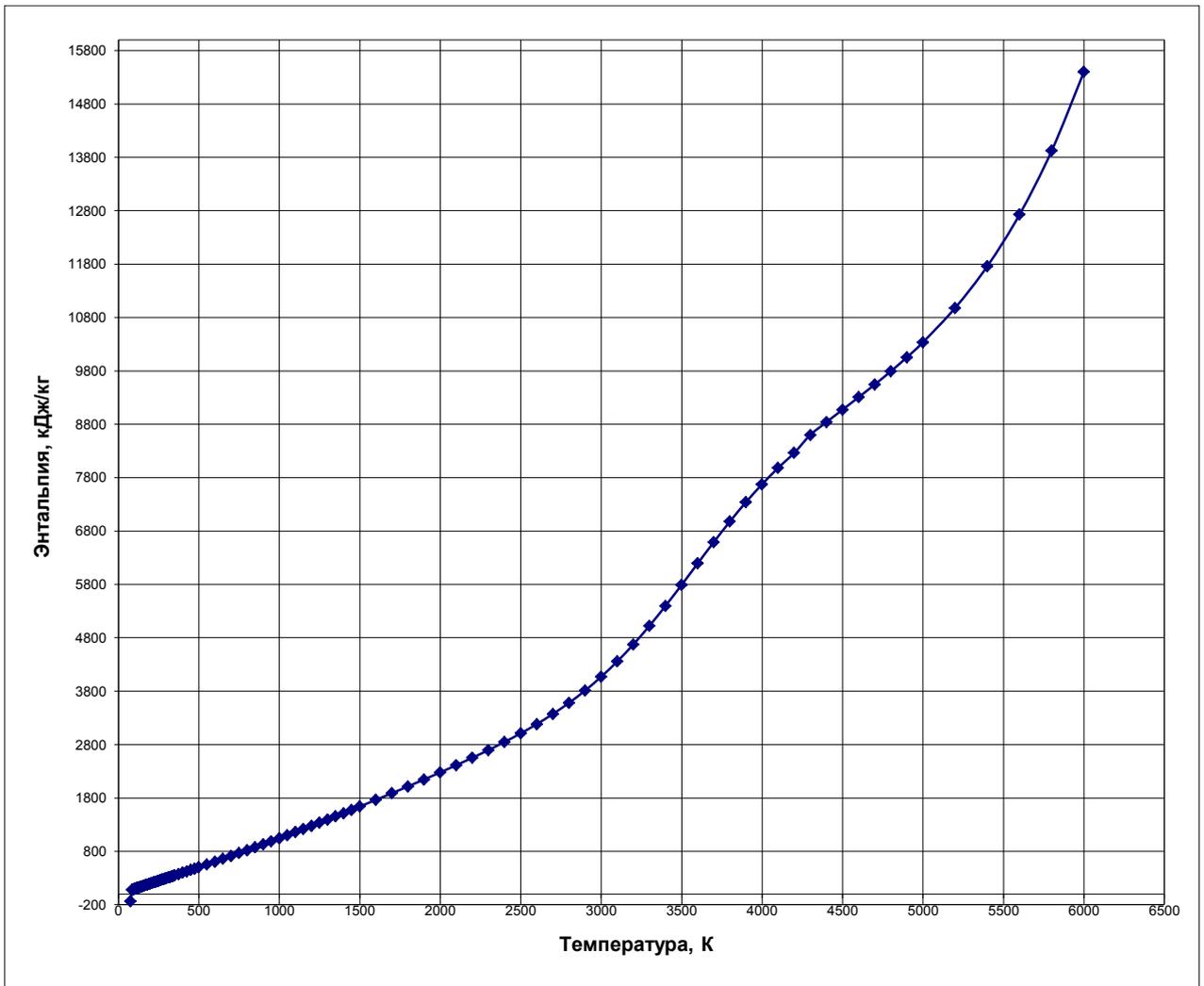


Рис.2.2. Зависимость энтальпии воздуха от его температуры.

6. Обработка результатов экспериментов [24-26].

Для каждой серии измерений ( $n=7$ ) вычисляем среднее значение:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (60)$$

Определяем погрешности отдельных измерений:

$$\Delta t_i^0 = \bar{t} - t_i \quad (61)$$

Для контроля правильности вычислений отклонений результатов измерений от среднего арифметического вычисляем:

$$\sum_{i=1}^n \overset{0}{\Delta t}_i \quad (62)$$

Если результаты равны 0, следовательно ошибок в расчетах не было.

Вычисляем квадраты погрешностей отдельных измерений  $(\overset{0}{\Delta t}_i)^2$ .

Для контроля правильности вычисления сумм квадратов отклонений воспользуемся тождеством:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{t} - t_i)^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2 - n\bar{t}^2 \quad (63)$$

Вычтем правую часть из левой и если результаты проверки равны 0, то расчеты верны.

Вычисляем среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений (среднего арифметического):

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \overset{0}{(\Delta t}_i)^2}{(n-1)}} \quad (64)$$

Для определения границ доверительного интервала воспользуемся неравенством Чебышева:

$$P(\bar{x} - k_\alpha S_x \leq x \leq \bar{x} + k_\alpha S_x) \geq 1 - \frac{1}{k_\alpha^2}. \quad (65)$$

Для доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  коэффициент  $k_\alpha=4,4$ .

Вычисляем границы доверительного интервала:

$$\overset{0}{\Delta t} = k_\alpha S_x \quad (66)$$

и относительную погрешность результата серии измерений:

$$\overset{0}{\delta t} = \frac{\overset{0}{\Delta t}}{\bar{t}} \cdot 100\%. \quad (67)$$

Полученные данные представлены в сводных таблицах .

### 2.1.3. Оценка влияния газодинамического обдува на термические параметры ВЧ факельного плазмотрона.

На основе полученных экспериментальных данных были проведены расчеты термических параметров ВЧФП, результаты которых приведены в таблицах 2.3.- 2.8 и представлены графически.

Табл 2.3.

$Q_{ог}$ , Г/с	$J_a=2$ А	$J_a=2,5$ А	$J_a=3$ А	$J_a=3,5$ А
	$P_{кп}$ , кВт	$P_{кп}$ , кВт	$P_{кп}$ , кВт	$P_{кп}$ , кВт
3,5	0,308508	0,354136	0,64297	1,406496
3,0	0,351265	0,344089	0,663062	1,434124
2,5	0,378893	0,339066	0,670597	1,464263
2,0	0,39468	0,364182	0,793666	1,416542
1,5	0,402574	0,374228	0,866502	1,406496
1,0	0,39468	0,364182	0,758503	1,496914

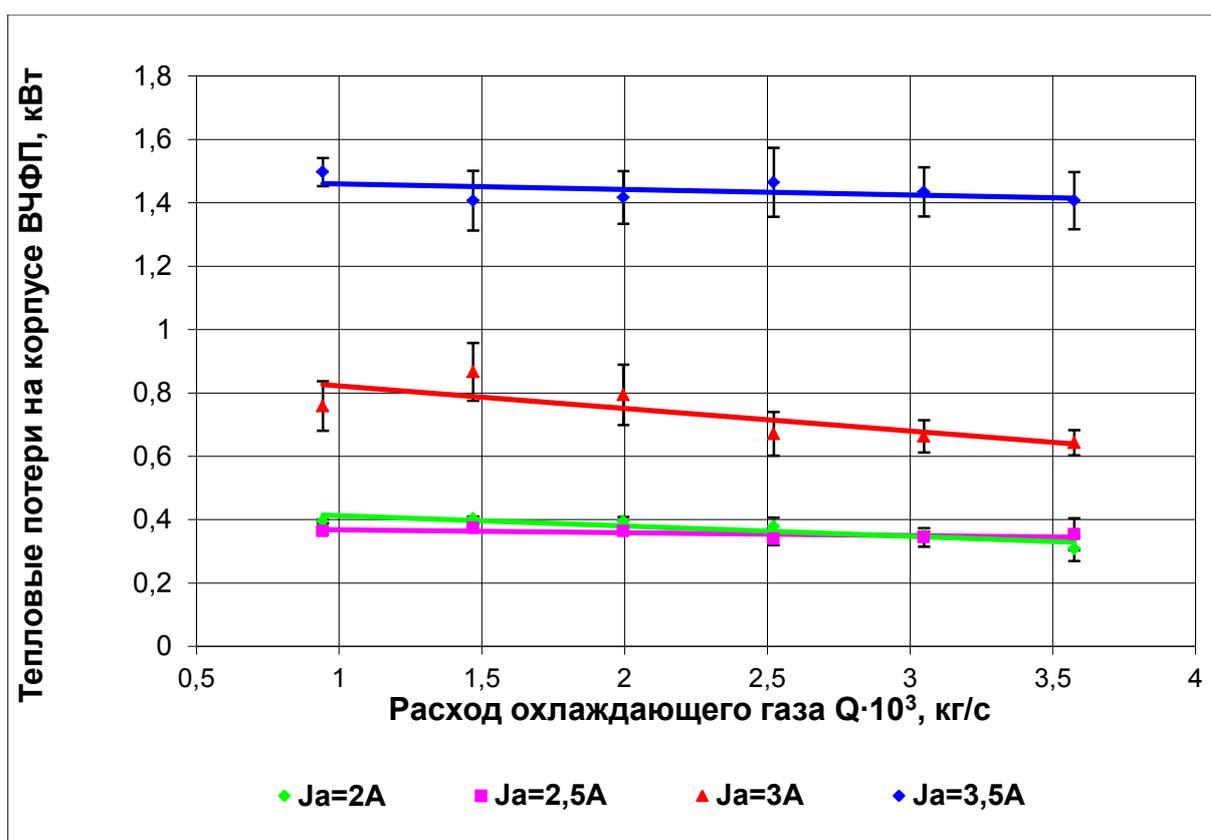


Рис.2.3. Влияние газодинамического обдува на тепловые потери на корпусе ВЧФП.

На рис.2.3. показано влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на потери тепловой мощности в корпус ВЧ факельного плазмотрона при разных значениях тока анода (мощности ВЧ факельного разряда).

Из рисунка видно, что:

– при неизменной мощности ВЧ факельного разряда повышение расхода охлаждающего газа с 1,0 г/с до 3,5 г/с слабо влияет на нагрев корпуса плазмотрона.

– при увеличении анодного тока с 2А до 3,5А (или мощности разряда с 7 кВт до 24 кВт) характер зависимостей практически не изменяется.

Это говорит о том, что передача тепла на корпус осуществляется, в основном, за счет излучения от ВЧ факельного разряда, а передача тепла за счет теплопроводности и конвективного теплообмена не играет существенной роли.

Табл.2.4.

$Q_{ог}, \text{ г/с}$	$J_a = 2\text{А}$	$J_a = 2,5\text{А}$	$J_a = 3\text{А}$	$J_a = 3,5\text{А}$
	$\eta_{пл}, \%$	$\eta_{пл}, \%$	$\eta_{пл}, \%$	$\eta_{пл}, \%$
3,5	84,10529	83,8083	85,72285	85,80243
3,0	81,48283	84,41411	85,52636	86,16829
2,5	79,45227	84,04015	85,48383	85,72324
2,0	77,49144	82,85893	84,15769	86,55756
1,5	77,22608	81,76299	84,05119	86,24109
1,0	75,98801	81,75396	84,51748	85,4594

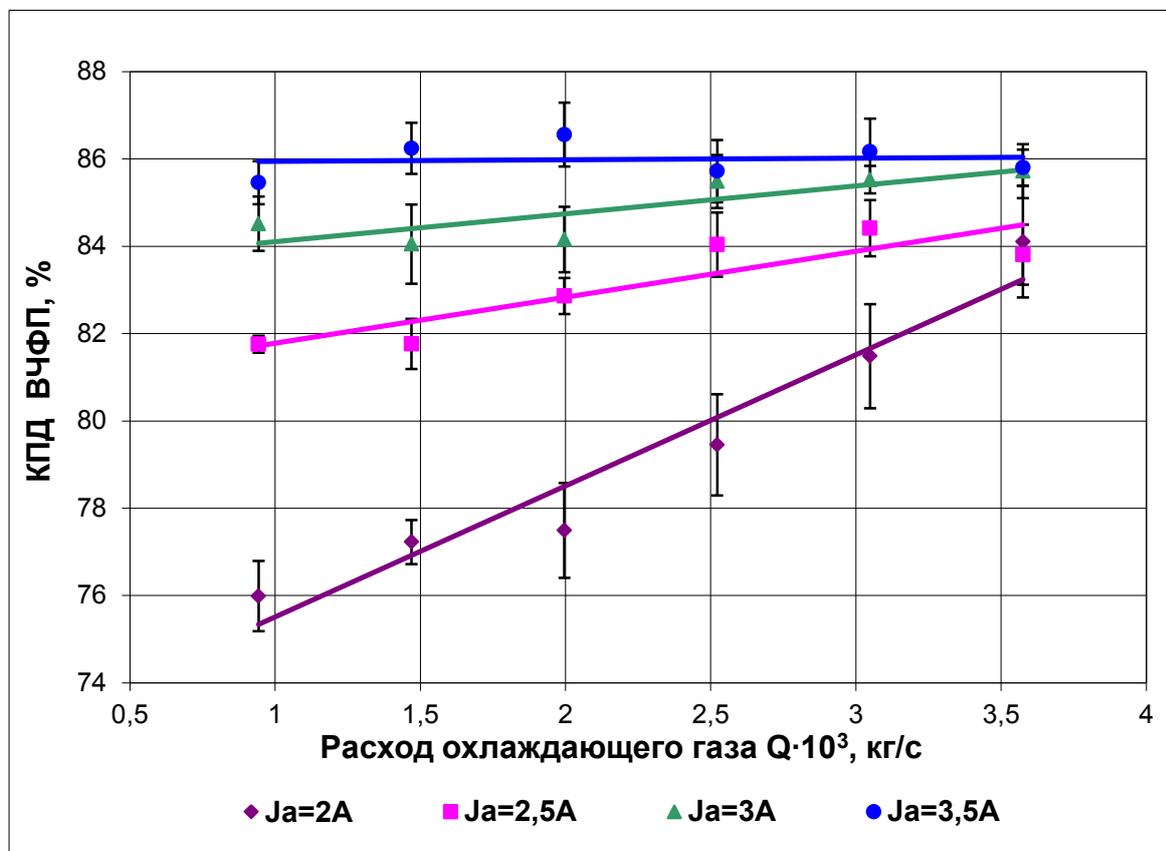


Рис.2.4. Влияние газодинамического обдува на КПД ВЧФП.

На рис.2.4. показано влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на КПД ВЧ факельного плазмотрона.

Из рисунка видно, что:

- при малых мощностях ВЧ факельного разряда  $7 \div 13$  кВт ( $J_A = 2 \div 2,5A$ ) повышение расхода охлаждающего газа с  $1,0$  г/с до  $3,5$  г/с сильно влияет на КПД ВЧ факельного плазмотрона.

- при повышении мощности разряда до  $18 \div 25$  кВт ( $J_A = 3 \div 3,5A$ ) влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на КПД ВЧ факельного плазмотрона существенно снижается.

Табл.2.5.

$J_{a}, A$	$Q_{ог} = 3,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 3,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 2,5 \text{ г/с}$	
	Т,К	$P_{кп}, кВт$	Т,К	$P_{кп}, кВт$	Т,К	$P_{кп}, кВт$
2	2660	0,308508	2530	0,252652	2430	0,288893
2,5	3010	0,354136	3010	0,344089	2990	0,339066
3	3440	0,64297	3430	0,663062	3430	0,670597
3,5	3820	1,406496	3870	1,434124	3820	1,464263

продолжение табл. 2.5.

$Q_{ог} = 2,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,0 \text{ г/с}$	
Т,К	$P_{кп}, кВт$	Т,К	$P_{кп}, кВт$	Т,К	$P_{кп}, кВт$
2310	0,20468	2280	0,262574	2190	0,23468
2940	0,364182	2870	0,374228	2870	0,364182
3370	0,793666	3360	0,866502	3360	0,758503
3850	1,416542	3820	1,406496	3790	1,496914

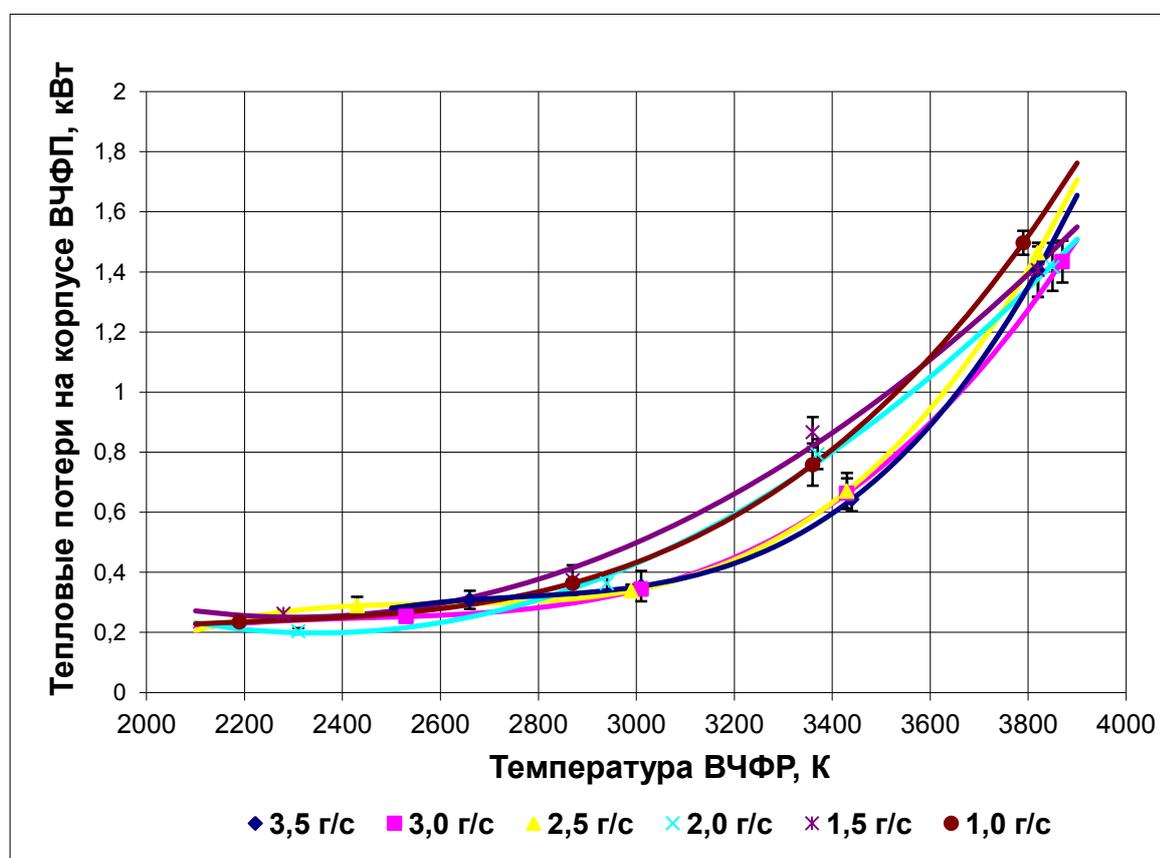


Рис.2.5. Влияние температуры ВЧФР на тепловые потери на корпусе ВЧФП.

На рис.2.5. показано влияние температуры ВЧ факельного разряда на нагрев корпуса ВЧ факельного плазмотрона.

Из рисунка видно, что повышение температуры ВЧ факельного разряда приводит к росту потерь тепловой мощности на корпус плазмотрона во всем диапазоне изменения расхода охлаждающего газа. Это подтверждает то, что теплообмен между ВЧ факельным разрядом и корпусом ВЧ факельного плазмотрона обусловлен, в основном, излучением разряда.

J <sub>a</sub> , А	Q <sub>ог</sub> = 3,5 г/с		Q <sub>ог</sub> = 3,0 г/с		Q <sub>ог</sub> = 2,5 г/с	
	Т,К	η <sub>пл</sub> ,%	Т,К	η <sub>пл</sub> ,%	Т,К	η <sub>пл</sub> ,%
2	2660	83,8083	2530	81,48283	2430	79,45227
2,5	3010	84,60529	3010	84,41411	2990	84,04015
3	3440	85,72285	3430	85,52636	3430	85,48383
3,5	3820	85,80243	3870	86,16829	3820	85,72324

Та  
бл.2.6.

Q <sub>ог</sub> = 2,0 г/с		Q <sub>ог</sub> = 1,5 г/с		Q <sub>ог</sub> = 1,0 г/с	
Т,К	η <sub>пл</sub> ,%	Т,К	η <sub>пл</sub> ,%	Т,К	η <sub>пл</sub> ,%
2310	77,49144	2280	77,22608	2190	75,98801
2940	82,85893	2870	81,76299	2870	81,75396
3370	85,15769	3360	84,05119	3360	84,51748
3850	85,55756	3820	85,24109	3790	85,4594

Продолж  
ение  
табл.2.6.

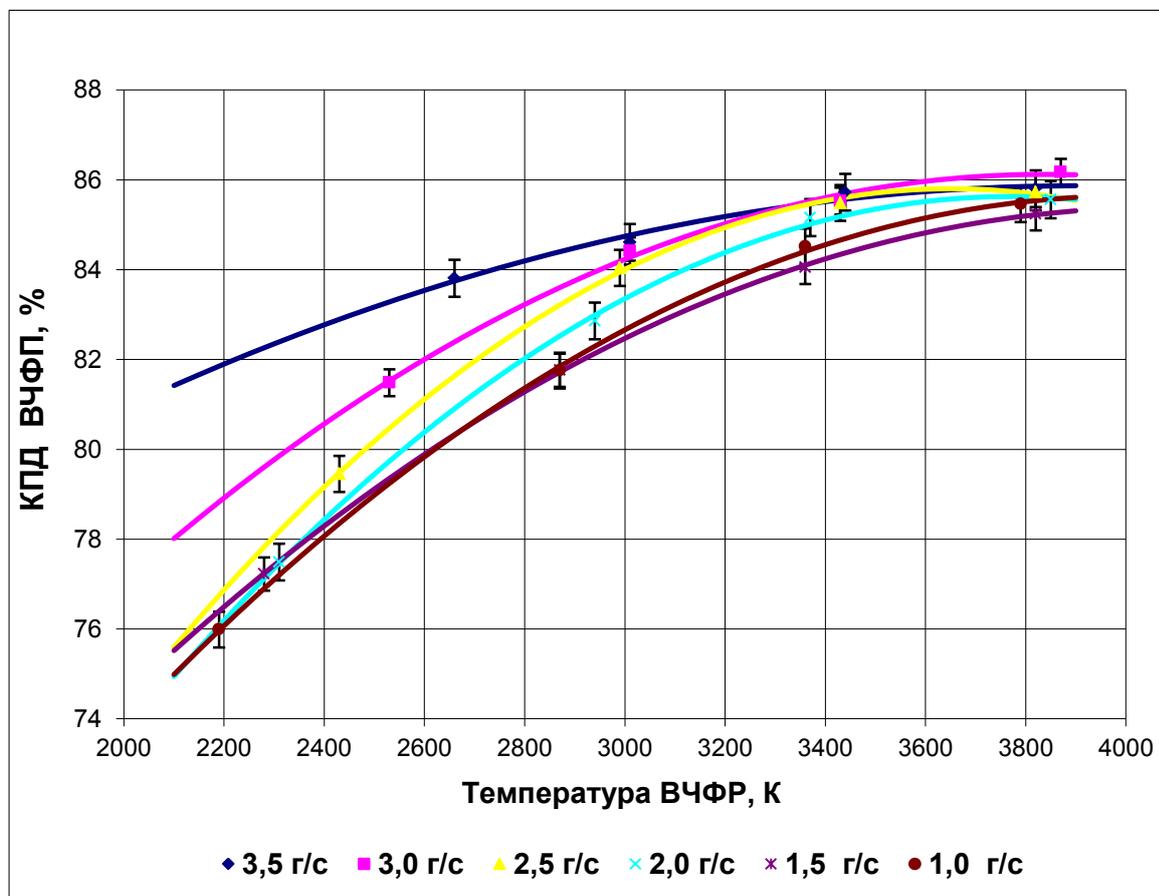


Рис.2.6. Влияние температуры ВЧФР на КПД ВЧФП.

На рис.2.6. показано влияние температуры ВЧ факельного разряда на КПД ВЧ факельного плазмотрона.

Из рисунка видно что, при прочих равных условиях с увеличением температуры разряда КПД ВЧФП плавно возрастает (примерно до 86%), при дальнейшем увеличении температуры КПД остается на прежнем уровне.

Табл.2.7.

$Q_{ог} = 3,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 3,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 2,5 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$	$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$	$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$
10,44948	0,278508	9,552329	0,252652	8,997115	0,288893
13,46853	0,354136	13,46406	0,344089	13,23383	0,339066
18,67355	0,64297	18,52844	0,663062	18,53081	0,670597
24,12885	1,406496	24,7529	1,434124	24,25225	1,464263

продолжение табл.2.7.

$Q_{ог} = 2,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,0 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$	$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$	$P_p, \text{кВт}$	$P_{кп}, \text{кВт}$
8,402882	0,26468	8,240704	0,282574	7,824706	0,26468
12,75691	0,364182	12,20436	0,374228	12,20868	0,364182
17,91686	0,793666	17,93123	0,866502	17,85591	0,758503
24,55629	1,416542	24,1769	1,406496	23,80044	1,496914

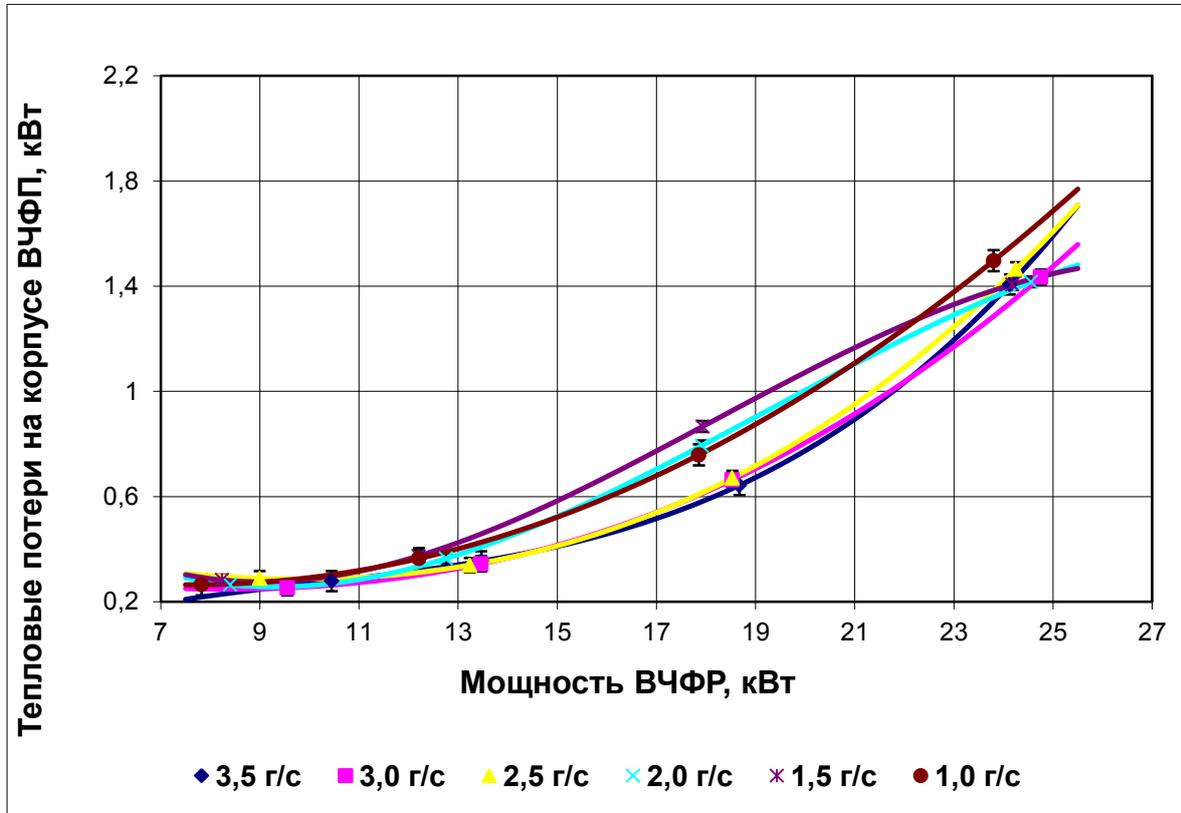


Рис. 2.7. Влияние мощности ВЧФР на нагрев корпуса ВЧФП.

На рис.2.7. представлена зависимость потерь тепловой мощности на корпус ВЧФП от мощности ВЧФР.

Из рисунка видно что, нагрев корпуса плазмотрона возрастает с увеличением мощности разряда.

Табл.2.8.

$Q_{ог} = 3,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 3,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 2,5 \text{ г/с}$	
$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$	$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$	$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$
10,44948	1,707424	9,552329	1,738386	8,997115	1,846744
13,46853	2,039232	13,46406	2,078489	13,23383	2,109744
18,67355	2,359788	18,52844	2,359788	18,53081	2,362299
24,12885	2,353369	24,7529	2,308719	24,25225	2,400765

продолжение табл.2.8.

$Q_{ог} = 2,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,0 \text{ г/с}$	
$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$	$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$	$P_{р}, \text{кВт}$	$P_{эл}, \text{кВт}$
8,402882	1,930344	8,240704	1,948816	7,824706	1,951872
12,75691	2,197929	12,20436	2,264347	12,20868	2,279277
17,91686	2,429694	17,93123	2,371788	17,85591	2,373581
24,55629	2,46672	24,1769	2,395836	23,80044	2,417835

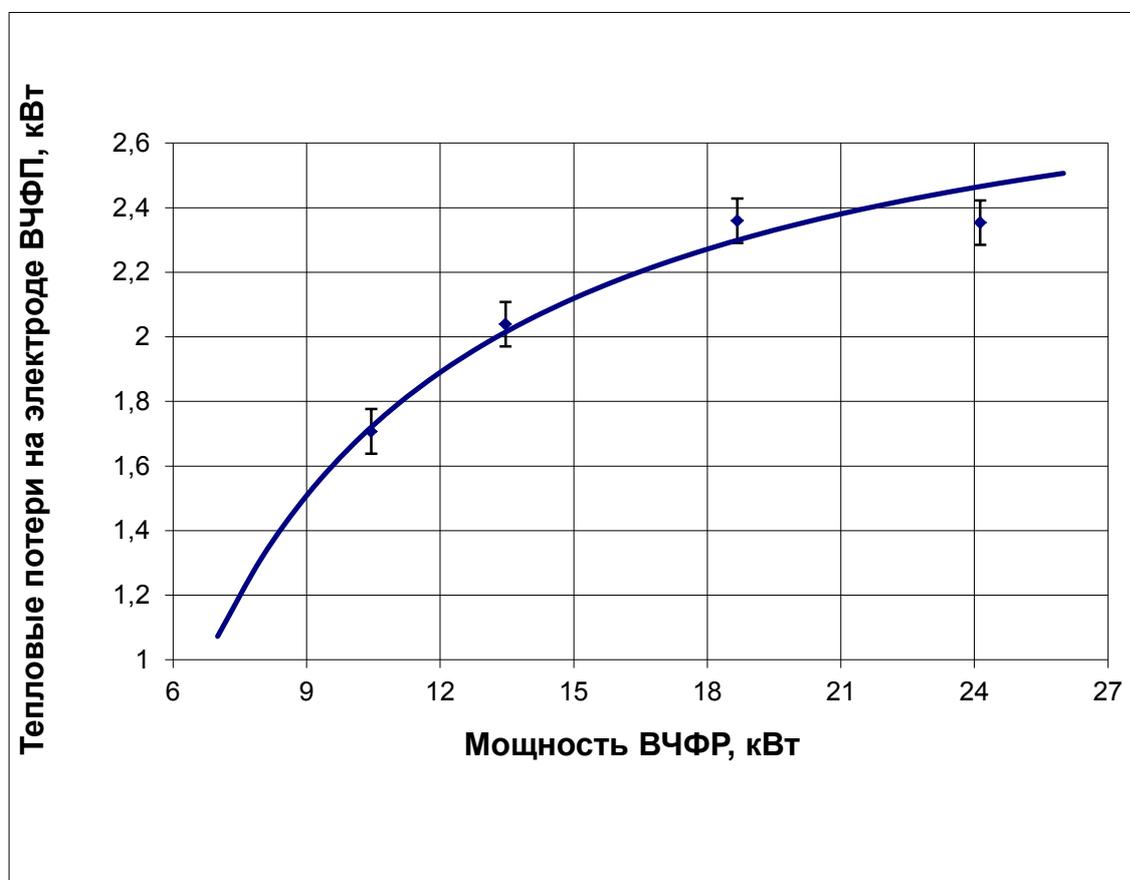


Рис 2.8. Влияние мощности ВЧФР на нагрев водоохлаждаемого электрода.

На рис. 2.8. показано влияние мощности ВЧФР на потери тепловой мощности на водоохлаждаемом электроде.

Из рисунка видно что, при прочих равных условиях с увеличением мощности разряда тепловые потери плавно возрастают.

Таким образом, из графиков можно увидеть, что достигнутые максимальные параметры работы ВЧФП могут быть сохранены при минимальном газодинамическом обдуве.

Дальнейшее повышение этих характеристик возможно за счет нанесения светоотражающего покрытия на внутренние стенки корпуса плазмотрона для снижения тепловых потерь мощности за счет излучения от ВЧФР.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведен обзор и анализ различных типов высокочастотных генераторов каталитически активной плазмы. По его результатам выбран ВЧ факельный плазмотрон.

2. Проведены экспериментальные исследования влияния газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на термические параметры ВЧ факельного плазмотрона.

Показано, что при мощности ВЧ факельного разряда от 7 до 25 кВт повышение расхода охлаждающего газа с 1 г/с до 3,5 г/с не оказывает существенного влияния на потери тепловой мощности в водоохлаждаемый корпус ВЧ факельного плазмотрона. Это указывает на то, что теплопередача осуществляется через прозрачную кварцевую разрядную камеру, в основном, за счет излучения от ВЧ факельного разряда.

Установлено, что при низкой температуре ВЧ факельного разряда (2000-3000К) повышение расхода охлаждающего газа с 1 г/с до 3,5 г/с существенно повышает КПД ВЧ факельного плазмотрона (с 75 до 85%). При дальнейшем увеличении температуры ВЧ факельного разряда (до 4000К) КПД достигает максимального значения 86%.

3. Проведены экспериментальные исследования влияния мощности ВЧ факельного разряда на потери тепловой мощности в водоохлаждаемый медный электрод.

Установлено, что с ростом мощности ВЧФР от 7 до 20 кВт происходит повышение потерь тепловой мощности в электрод с 1,1 до 2,3 кВт. Затем этот рост прекращается достигнув величины 2,4 кВт.

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

В процессе очистки пресной воды на Томском подземном водозаборе образуется в год около 600 т осадков после водоподготовки воды (ОВП), которые из-за отсутствия технологии переработки сбрасываются в реку Томь, что приводит к существенному ухудшению экологической обстановки в регионе.

Эффективная и экологически безопасная утилизация таких отходов может быть достигнута при плазменной утилизации оптимальных по составу горючих водно-органических композиций на основе ОВП, имеющих адиабатическую температуру горения  $T_{ад} \approx 1200^{\circ}\text{C}$ .

В данной работе проводится исследование процесса плазменной утилизации отходов после очистки воды.

Для эффективного использования научного потенциала научно-исследовательской работы (НИР) необходимо прилагать усилия не только к непосредственно её разработке, но и к проведению её анализа с точки зрения экономических требований.

– В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» части выпускной квалификационной работы рассмотрены следующие вопросы:

– оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

– планирование научно – исследовательской работы;

### **3.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

#### **3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Целевой рынок. Министерство ЖКХ, промышленные предприятия по водоочистке и водоподготовке, предприятия по производству строительных материалов и лакокрасочной продукции, металлургия (окатыши).

#### **3.1.2 Технология QuaD**

На сегодняшний день, несмотря на все возрастающие экологические проблемы, большинство предприятий, у которых так или иначе присутствует стадия водоочистки, выбрасывают отходы водоочистки в реку, либо производят их захоронение. Данные действия не только создают экологические проблемы, но и не рациональны с точки зрения ресурсоэффективности. Отходы можно использовать как новые продукты, например такие, как химические реактивы или пигменты.

Так одним из перспективных решений данной проблемы может быть прямая утилизация таких отходов в условиях воздушной плазмы, что делает разрабатываемую технологию уникальной.

Проведем оценку эффективности научной работы и определим направления для ее будущего повышения.

С помощью технологии *QuaD* (QUality ADvisor) проведем оценку таких показателей как:

1) *Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:*

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;

- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.
- 2) *Показатели оценки качества разработки:*
- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

В соответствии с технологией QuaD (таблица В1, приложение В) каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \sum B_i \cdot B_i, \quad (68)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя[17].

### 3.1.3 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[17].

SWOT – анализ состоит из трех этапов. В первом этапе мы анализируем сильные и слабые стороны исследовательской работы (внутренняя среда), а так же возможности и угрозы (внешняя среда). Описание выполняется с помощью факторов, не имеющих количественной оценки (таблица В2, приложение В).

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа построили интерактивную матрицу проекта (таблица 4.1). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT.

Таблица 4.1 – интерактивная матрица проекта

<b>Сильная сторона</b>	<b>Слабая сторона</b>
С1. Одностадийность процесса.	Сл1. Опытное оборудование не является ядерно-безопасным.
С2. Малое время протекания процесса (десятое доли секунды).	Сл2. Отсутствие экономической мотивации у предприятий к переходу на плазменную переработку промышленных отходов.
С3. Затраты электрической энергии на процесс не более 0,1 кВт*ч/кг.	

С4. Получение дополнительной тепловой энергии ( до 2кВт*ч/кг) на бытовые технологические нужды.	
С5. Экологичность метода. При работе на установке не происходит загрязнение окружающей среды.	
С6. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания предлагаемой технологии.	
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Создания рынка по переработке жидких радиоактивных отходов.	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства из-за малой известности метода и ограниченности дополнительных финансовых ресурсов на использование нового у организаций.
В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.	У2. Несвоевременное финансовое обеспечение.

Далее проведем поиск соответствий сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды и построим итоговую матрицу SWOT – анализа. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 4.2 Итоговая матрица SWOT-анализа.

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>C1. Одностадийность процесса.</p> <p>C2. Малое время протекания процесса (десятыи доли секунды).</p> <p>C3. Затраты электрической энергии на процесс не более 0,1 кВт*ч/кг.</p> <p>C4. Получение дополнительной тепловой энергии (до 2кВт*ч/кг) на бытовые технологические нужды.</p> <p>C5. Экологичность метода. При работе на установке, не происходит загрязнения окружающей среды.</p> <p>C6. Наличие необходимого оборудования для проведения испытания предлагаемой технологии.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <p>Сл1. Опытное оборудование не является ядерно-безопасным. Сл2. Отсутствие экономической мотивации у предприятий.</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>V1. Создание рынка по переработке жидких радиоактивных отходов.</p> <p>V2. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p>	<p>V1C1C2C3C4C5, V2C1C2C3C5.</p> <p>Из данной комбинации видим, что вышеперечисленные сильные стороны благотворно влияют на возможность создания рынка по переработке жидких радиоактивных отходов и появление дополнительного спроса на продукты, которые появляются после переработки. Исследуемый метод является более экологичным, а также способствует быстрому времени протекания процесса.</p>	<p>V1Сл2, V2Сл1Сл2.</p> <p>Анализ показывает, что создание рынка появление дополнительного спроса могут существенно улучшить сложное финансовое положение и повысить интерес компаний, оказывающих инженеринговые услуги.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Несвоевременное финансовое обеспечение.</p>	<p>У1С1С3С5, У2С1С3С5С6. Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта, а именно использование экологически чистых технологий, одностадийность процесса и проведение экспериментов в строго ограниченном технологическом месте способствуют понижению процента угроз исследования.</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>

## 3.2 Планирование научно-исследовательской работы

### 3.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

– Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке: определение структуры работ в рамках научного исследования;

- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления. Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ.

### 3.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

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

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (4.68)$$

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

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее

неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (69)$$

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

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

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел[17].

### 3.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, включая производственную практику, и дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (70)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (71)$$

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

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

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

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

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} \approx 1.22$$

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – 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	$t_{\text{ож}}i$ , чел-дни			
1	0,5	1,5	0.9	руководитель	0.9	1
2	1	2	1.4	инженер	1.4	2
3	3,5	4,5	3.9	инженер	3.9	5
4	0,5	1,5	0.9	инженер	0.9	1
5	3	3.5	3.2	руководитель, инженер	1.6	2
6	3	3.5	3.2		1.6	2
7	2.5	3	2.7		1.35	2
8	1.5	2	1.7	руководитель, инженер	0.85	1
9	2	2.5	2.2		1.1	1
10	4	5.5	4.6	инженер	4.6	6
11	2.5	3.5	2.9	руководитель, инженер	1.45	2
12	4.5	6.5	5.3	инженер	5.3	7
13	3.5	5	4.1	инженер	4.1	5
Итого:			37		29.05	37

### **3.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

Целью планирования бюджета для проведения НТИ является экономически обоснованное определение величины затрат на ее выполнение.

В формирование НТИ включаются все затраты, связанные с ее выполнением независимо от источника финансирования. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Рассчитаем те, которые имеются в нашей работе.

#### **3.3.1 Расчет материальных затрат**

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

К категории материалов относят:

- сырьё, основные и вспомогательные материалы;
- покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия;
- электроэнергия и вода на технологические цели.

Некоторые материалы: ВЧ-генератор, масла и реагенты являются собственностью кафедры Технической физики, поэтому в расчет показателей

затрат не берутся.

Эксперименты проводились 2 дня по 8 часов (16 часов), мощность установки 100 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м<sup>3</sup>/час

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (4.6)$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (3,25 руб за 1 кВт\*ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

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

$$C_{эл} = 3,25 \cdot 100 \cdot 16 = 5200 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле:

$$C_{вд} = C_{вд} \cdot Q \cdot F_{об} , \quad (73)$$

где  $C_{вд}$  – тариф на промышленное водоснабжение (8 руб за 1 м<sup>3</sup>);

$Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>;

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

$$C_{вд} = 8 \cdot 1,8 \cdot 16 = 230,4 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_{м} = C_{эл} + C_{вд} , \quad (74) \quad (4.8)$$

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_{м} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} , \quad (75)$$

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

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

$C_i$  – 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.

$$З_{\text{м}} = 5200 + 230,4 = 2430,4 \text{ руб.}$$

Транспортно – заготовительные расходы не учитывались, поэтому не было умножения на коэффициент  $k_T$ .

### 3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

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

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (76)$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $З_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $З_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (77)$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 4.6.);

$З_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (78)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада дипломника выступает стипендия, которая составляет 2500 руб и 22300 руб для доцента, кандидата наук);

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

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.3).

Баланс рабочего времени представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	
-выходные дни	52
-праздничные дни	14
Потери рабочего времени	
-отпуск	48
-невыходы по болезни	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (79)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб. (для доцента  $Z_{\text{тс}}$  составляет 26300 руб.);

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{\text{тс}} = 6690$ );

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{\text{тс}}$ );

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Разряд	З <sub>тс</sub> , руб.	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель		26300	0,3	-	1,3	44447	1983,29	11	21816,21
Итого З <sub>осн</sub>									21816,21

### 3.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Дипломная работа выполнялась с 12.05.2018 по 26.06.2018. С 01.01.2010 страховые взносы осуществляются в государственные внебюджетные фонды. На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1% [16].

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 (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таким образом, выплаты в страховые фонды составят:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 26179,45 = 7906,19 \text{ руб.}$$

### 3.3.5 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

Так как при проведении научно-технических исследований все подготовительно-отладочные работы, технологические операции и расчеты были осуществлены на базе кафедры № 23 ФТИ ТПУ с имеющимся оборудованием и расходными материалами только научным руководителем и дипломником без привлечения сторонних организаций, то в данном случае можно говорить, что контрагентные расходы отсутствуют.

### 3.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35% от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (81)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$Z_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 26179,45 = 7853,83 \text{ руб.}$$

### 3.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

На основании выше сказанного составим бюджет затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения, приведен в таблица 4.6.

Таблица 4.6. – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
	Исполнители	
1. Материальные затраты НИИ	2430,4	Пункт 4.3.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей	21816,21	Пункт 4.3.2

темы		
3. Отчисления во внебюджетные фонды	7906,19	Пункт 4.3.4
4. Накладные расходы	7853,83	30 % от суммы ст. 1-5
5. Бюджет затрат НТИ	40006,63	Сумма ст. 1- 6

Для выполнения данных исследований были задействованы два исполнителя: научный исполнитель и дипломник. Из вышеизложенной калькуляции видно, что для реализации данного проекта необходимо 37 календарных дней, суммарный бюджет научно-технического исследования составил 40006,63 рубля.

### 3.4 Определение ресурсоэффективности исследования

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (82)$$

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

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

$b_i^a, b_i^p$  – 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 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

4. Материалоемкость	0,1	4
ИТОГО	1	

$$I_{p-исл} = 5*0,2 + 5*0,5 + 4*0,2 + 4*0,1 = 4,7;$$

Вывод:

В процессе исследования экономической части данного проекта были проведены ряд расчетов. В процессе проведения расчетов были рассчитаны материальные затраты проекта которые составили 2430,4 руб, рассчитана основная зарплата руководителя проекта 21816,21 руб, выплаты в страховые фонды составили 7906,19 руб, накладные расходы составили 7853,83 руб, суммарный бюджет состава НТИ составил 40006,63 руб, интегральный показатель ресурсоэффективности равен 4,7. А так же был исследован SWOT-анализ проекта.

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

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [1].

Правила по охране труда и техники безопасности [2] вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководителями, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

#### 4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 1), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические [3].

Таблица 1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с установкой (сборка) и ПЭВМ, ОЯТЦ ТПУ	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	–	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

На бакалавра, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **4.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

## 4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 1.

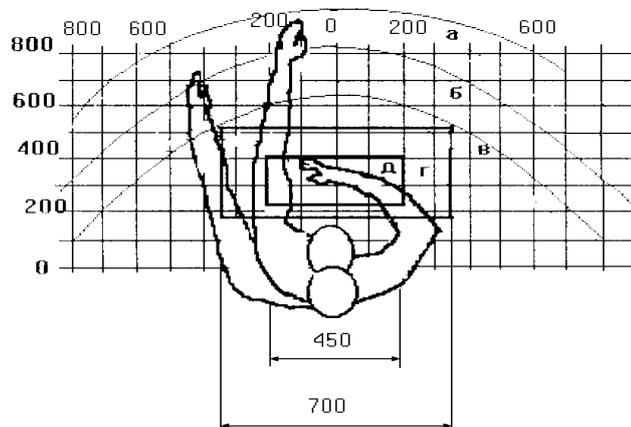


Рисунок 1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

– документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони в (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься 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.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её

размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубых цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

#### **4.2.3 Условия безопасной работы**

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость [2].

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с и приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

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 ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 2,5В/м.
- Плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 25нТл.
- Существуют следующие способы защиты от ЭМП:
- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

### **4.3 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [4].

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.
- Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

#### **4.4 Пожарная и взрывная безопасность**

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий [5].

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
  - соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
  - правильное размещение оборудования;
  - своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.
- 
- При возникновении аварийной ситуации необходимо:
  - сообщить руководителю;
  - позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
  - принять меры в соответствии с инструкцией.

## Список использованной литературы

- 1) Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М.: Высшая школа, 1999. – 318с.
- 2) Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4
- 3) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М.: Российская газета, 2003. – 3 с.
- 4) ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
- 5) СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты проведенных исследований были использованы при создании мощного ВЧ факельного плазмотрона (60 кВт) для установки плазмокаталитической утилизации нефтяных шламов. По результатам приемочных и сертификационных испытаний Установки получены сертификат соответствия Госстандарта России на серийное производство и разрешение Госгортехнадзора России на применение установок на опасных производственных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивина С. А. Физика низкотемпературной плазмы.- Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1978, 86 с.
2. Крапивина С. А. Основы плазмохимии.- Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1971, 104с.
1. Генераторы низкотемпературной плазмы Коротеев А. С, Коба В. В. и др. Под ред. В. М. Иевлева. М., Наука, 1969, 128 с.
2. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны), М., Науки, 1973. 232 с.
3. Mac Kinnon J.M., Wichens A.J.- Chem.a.Ind., 1983, № 16, p. 800-801.
4. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск, Наука, 1975. 296 с.
5. Экспериментальные исследования плазмотронов /Под ред. М, Ф. Жукова, Новосибирск, Наука, 1977. 392 с.
6. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена/ Под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск, Наука, 1977. 312 с.
7. Физика и техника низкотемпературной плазмы /Дресвин С. В., Донской А. В., Гольдфарб В. М., Клубникин В. С. Под ред. С. В. Дресвина. М., Атомиздат, 1972. 352 с.
8. Рыкалин Н. Н., Кулагин И. Д., Сорокин Л. М. и др. — Физика и химия обработки материалов, 1975, № 1, с. 3—6; №4, с. 3—6.
9. Sprealman M. L., Rodebush W.H.- J.Am.Chem.Soc., 1985, V.57.
10. Генераторы низкотемпературной плазмы. Труды III Всесоюзной научно-технической конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. М., Энергия, 1969. 608 с.
11. Тихомиров И.А., Власов В.А., Луценко Ю.Ю. Физика и электрофизика высокочастотного факельного разряда и плазмотроны на его основе.- М.: Энергоатомиздат, 2002.

12. Крапивина С. А. Основы плазмохимии. Плазмохимические реакторы и закалочные устройства. Л., ЛТИ им. Ленсовета, 1976. 65 с.
13. Теоретическая и прикладная плазмохимия /Полак Л. С., Овсянников А. А., Словецкий Д. И., Вурзель Ф. Б. Под ред. Л. С. Полака. М., Наука, 1975. 637 с.
14. Овсянников А. А., Полак Л. С., Сафонова М. Б. — Теор. основы хим. технол., 1971, т. 5, №6, с. 891—894.
15. Goldberger W. M. —Brit. Chem. Eng., 1963, v. 8, p. 610—613. Chem. Eng., 1966, v. 73, №6, p. 173—176.
16. Do Pount. New Burner Opens Door to Arc. —Chem. Week. Jan., 1954, v. 18, p. 64—66.
17. Синкевич О. А., Стахалов И. П. Физика плазмы. - М.: Высшая школа, 1991.-190с,
18. Дресвин С. В. Физика и техника низкотемпературной плазмы. - М.: Атомиздат, 1972.- 352с.
19. Жуков М. Ф. Свойства низкотемпературной плазмы и методы её диагностики. - Новосибирск: Наука, 1977.- 295с.
20. Русанов В. Д. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. -М.: Атомиздат, 1985,- 387с.
21. И.Крапивина С. А. Плазмохимические технологические процессы. - М.: Химия, 1981.- 247с.
22. Пархоменко В.Д., Цыбулев П.Н., Краснорутский Ю.И. Технология плазмохимических производств: Учебное пособие.- К.: Выща шк.,1991.
23. И.Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. - М.: Атомиздат, 1977. -195с.
24. Н.Ясельский В.К., Кузнецов А.И., Дядик В.Ф. Обработка результатов измерений. // Учебное пособие. - Томск: ТПИ, 1977-95с.

25. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 277с.
26. Теплотехнический справочник./ Под ред. В. Н. Юренева. М.: Энергия, 1975.
27. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Изд. 2-е, доп. и перераб.-М.:Наука, 1972.-720с.
28. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат,1990.
29. Коротеев А.С. и др. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.
30. Калафати Д.Д., Поналов В.В. Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена.- М.: Энергоатомиздат,1986.
31. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах.- Л.: Энергоатомиздат,1985.
32. Бажан П.И. и др. Справочник по теплообменным аппаратам.- М.: Машиностроение,1989.
33. Лыков А.В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности.- М.: Энергоатомиздат,1990.
34. Годик Е.И. и Хаскин А.М. Справочное руководство по черчению. Изд.4-е, перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1984.
35. Богданов В.И., Малежик И.Ф., Верхола А.П. и др. Справочное руководство по черчению.- М.: Машиностроение, 1989.
36. Батский В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.И. СВЧ генераторы плазмы: Физика, техника, применение.- М.:Энергоатомиздат, 1987, 320 с.
37. Sennewatd K., Schallus E., Pohl F.- Chem. Ing. Techn.,1963, Т. 35.
38. Моссэ А. Л., Печковский В. В. Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ. Минск, Наука и техника, 1973. 216 с.