

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Физико-технический институт  
Кафедра технической физики

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ФТИ  
О.Ю. Долматов  
\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПО ЕЕ ЭНТАЛЬПИИ**

Методические указания к лабораторному практикуму по курсу  
**Физика плазмы**  
для студентов направления 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»  
Физико-технического института

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1 Определить среднемассовую температуру плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном при различных значениях тока анода, плазмообразующего газа и охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа.

2 Построить графические зависимости среднемассовой температуры плазменной струи от тока анода, расхода плазмообразующего газа и охлаждающего газа кварцевую разрядную камеру.

3 Провести анализ полученных результатов. Определить оптимальные режимы работы ВЧ факельного плазмотрона с максимальными среднемассовой температурой КПД. Сделать выводы.

## 2 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ

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 [4]. Определение энтальпии основано на измерении теплового потока, воспринимаемого датчиком при отборе ионизованного газа через внутренний капилляр (рис.1,а). Зная расход газа через капилляр  $G_T$  и температуру газа на выходе из датчика  $T_T^0$ , можно определить энтальпию плазмы

$$H_T = H_0 + Q/G_T,$$

где  $Q$  - тепловой поток, полученный датчиком при отборе газа;  $H_0$  - энтальпия газа, соответствующая температуре  $T_0$ .

Конструкция датчика (рис.1,а) состоит из коаксиальных тонкостенных трубок, позволяющих охлаждать датчик и отбирать газ в передней критической точке продольно обтекаемого цилиндра.

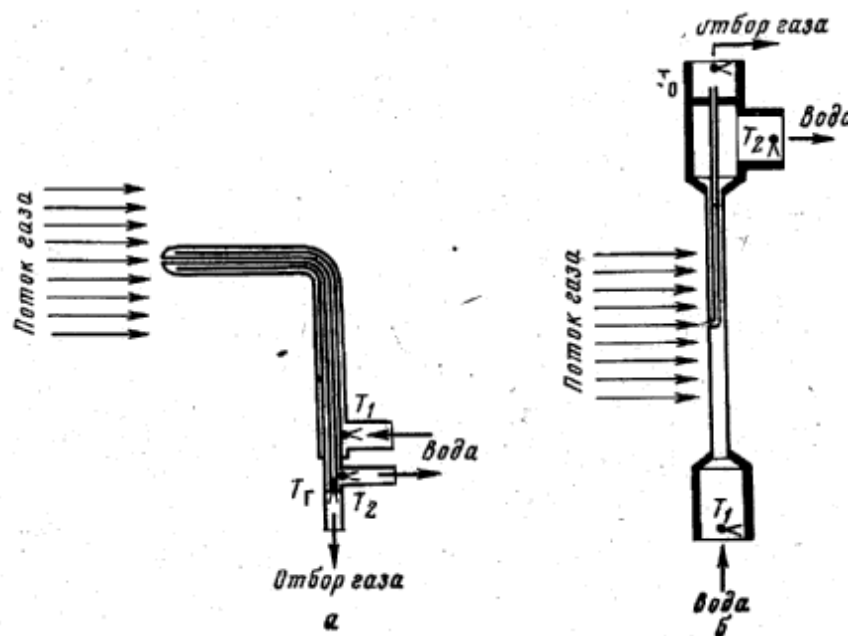


Рис.1. Схема энтальпийных датчиков: *а* — по данным Грея; *б* — с повышенной чувствительностью.

В работе [5] использовался несколько иной энтальпийный датчик с разнесенными входом и выходом охлаждающей воды (рис.1,б). 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, 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.2.

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  $\sigma$  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 [4] 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.

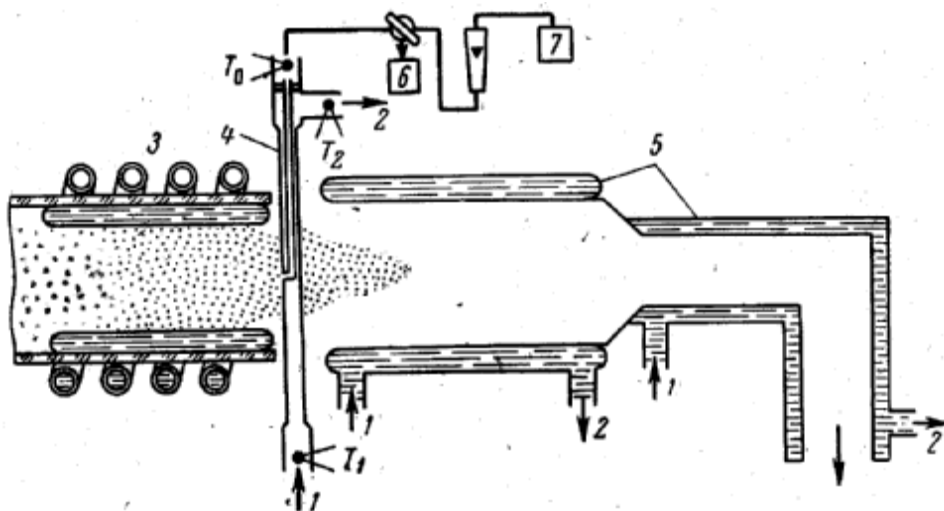


Рис.2. Схема измерения энтальпии плазмы:

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

$$\sigma_{\max} = H \cdot \rho \cdot v \cdot S_K / Q_f,$$

где  $\rho \cdot v$  — 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.3 представлены расчетные зависимости максимальной чувствительности датчика от температуры при разных фиксированных скоростях течения аргоновой плазмы. Полный

тепловой поток  $Q_f$  вычислялся из условий теплообмена датчика с потоком плазмы по критериальной зависимости

$$Q_f = Q_n + H \cdot \rho \cdot v \cdot S_k,$$

где

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

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.

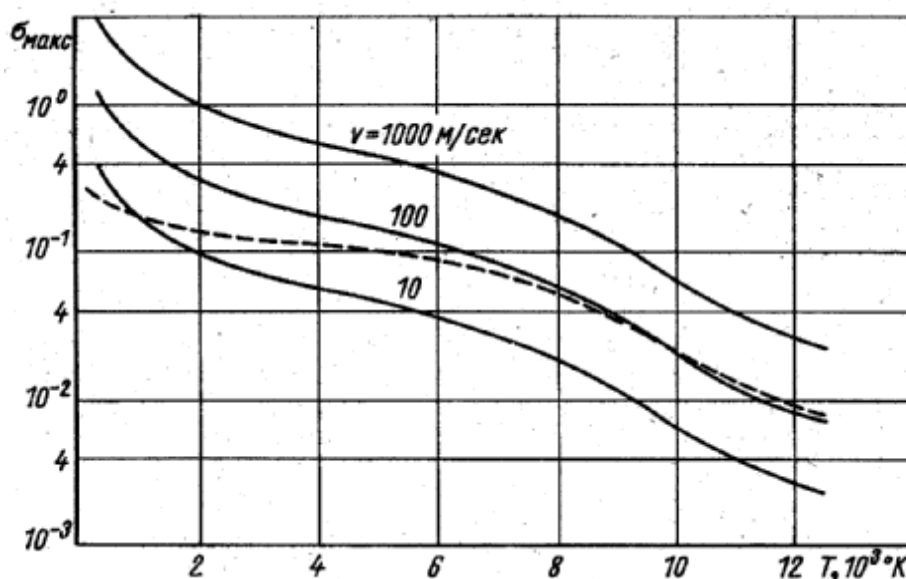


Рис.3. Зависимость максимальной чувствительности энтальпийного датчика от температуры плазмы аргона ( $d=5$  мм,  $l=10$  мм):  
 $v=v_0 T/T_a$  (при  $\Gamma_0=10^3$ °K,  $a=10$  м/сек).

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.3 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. 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 [3, 4]. 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:

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

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.

## **2 ОПИСАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ВЧ ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА**

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

В общем случае экспериментальная установка представляет собой функциональное объединение двух блоков (рис.1):

- высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13 (источник питания);
- высокочастотный (ВЧ) факельный плазмотрон.

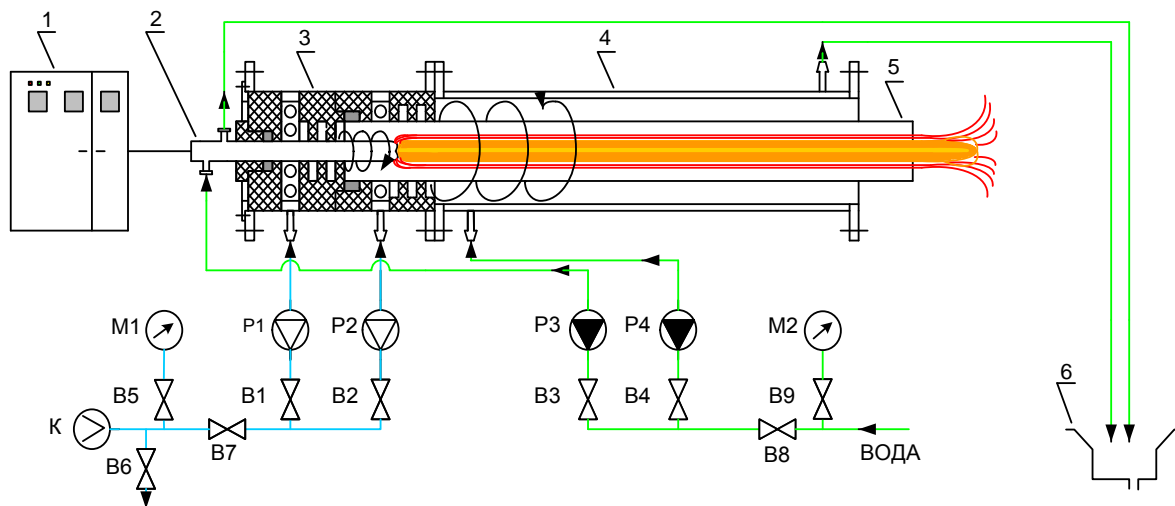


Рис. 1. Схема плазменной установки на базе ВЧ факельного плазматрона.

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

Высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13 размещён в экранированном металлическом шкафу, обеспечивающем надёжную защиту от электромагнитного излучения. Основные технические характеристики генератора ВЧГ8-60/13 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Величина	Единица измерения	Значение
Напряжение питающей сети	В	380
Частота питающей сети	Гц	50
Потребляемая мощность	кВт	90
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

Генератор выполнен в стальном шкафу, разделенном на два отсека экранированный и неэкранированный. Шкаф генератора имеет двери с двух сторон, что делает удобным доступ ко всему размещенному в нем оборудованию. Двери снабжены электромеханической блокировкой, которая обеспечивает безопасность обслуживания.

Высокочастотный экранированный отсек разделен на две части: анодную и сеточную. В анодной части расположены: генераторная лампа ГУ-66А со стендом охлаждения, водоохлаждаемая регулируемая анодная индуктивность, 2 группы регулируемых вакуумных конденсаторов КП1-3-15/350 для регулирования частоты и мощности генератора, фидер – для связи генератора с нагрузкой, дроссель безопасности, дроссели фильтра.

В сеточной части расположены: сеточная водоохлаждаемая индуктивность, вакуумный конденсатор КП1-3-15/350 с ручной регулировкой сеточного тока, сеточный дроссель, блокировочные конденсаторы и антипаразитные сопротивления.

Электрические выводы из высокочастотного отсека выполнены через проходные конденсаторы.

В неэкранированном отсеке расположены рубильник, контактор, анодный трансформатор, выпрямитель, трансформатор накала, аппаратура управления, контроля и защиты, вентилятор для охлаждения генераторной лампы, приводы вакуумных конденсаторов.

На дверях с лицевой стороны расположены измерительные приборы, сигнальные лампы, кнопки и тумблеры включения и управления генератором, блок стабилизации частоты, гнездо для измерения частоты.

На левой боковой стороне генератора расположен переключатель анодного напряжения (50% и 100%).

На нижней раме имеются трубки для подачи и слива охлаждающей воды, болты для подсоединения генератора к общему заземлению.

ВЧ факельный плазмотрон включает следующие основные узлы (рис. 1): медный водоохлаждаемый электрод (2); узел ввода плазмообразующего и охлаждающего газа (3); водоохлаждаемый корпус ВЧ факельного плазмотрона (4); кварцевая разрядная камера (5).

### **3 ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ РАБОТЕ НА ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ НА БАЗЕ ВЧ ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА**

#### **1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ**

1.1 К работе на плазмохимической установке (далее установка) допускаются лица, не моложе 18-ти лет, прошедшие медосмотр, инструктаж на рабочем месте, имеющие профессиональную подготовку, соответствующую характеру работ, прошедшие проверку знаний по вопросам охраны труда.

Периодичность повторного инструктажа один раз в квартал.

1.2 Работники, осуществляющие пуско-наладочные, ремонтные работы, периодические плановые осмотры, а также отработку плазмохимической технологии в электроустановках выше 1000В, должны иметь IV группу по электробезопасности, остальные работники – III группу.



1.3 Все виды работ на установке производятся группой не менее 2-х человек, один из которых имеет IV квалификационную группу по электробезопасности (при напряжении выше 1000 В).

1.3.1 ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать на установке одному человеку и оставлять включенную установку без присмотра.

1.3.2 Лабораторные работы со студентами проводятся только в присутствии и под руководством преподавателя.

1.4 Работы по наладке, настройке и регулированию технологических режимов работы установки производятся работниками в соответствии с настоящей инструкцией.

1.5 Все работы по наладке и настройке генератора производятся по письменному распоряжению и в соответствии с «Программой пуско-наладочных работ для генератора ВЧГ8-60/13».

1.6 Установка состоит из высокочастотного генератора (источника питания) и технологического блока, которые размещены в металлических корпусах. Технологический блок включает следующие основные узлы: высокочастотный плазмотрон факельного типа, реактор, узел «мокрой» очистки отходящих газов.

1.7 Все работники должны соблюдать правила внутреннего трудового распорядка.

1.8 На рабочем месте возле установки должна быть вывешена краткая инструкция по охране труда, в которой для работников указываются основные требования по безопасным приемам работы, а также требования к защитным, предохранительным и блокировочным устройствам.

1.9 Работа на установке характеризуется следующими вредными и опасными факторами, воздействие которых на работников может привести к несчастному случаю:

- а) высокое напряжение;
- б) электромагнитное излучение;
- в) ультрафиолетовое излучение;
- г) световое излучение;
- д) воздействие вредных веществ (например, окислов азота, серы, углерода и т. п.)

Во избежание несчастных случаев каждый работник должен строго соблюдать требования правил, норм и инструкций.

Для создания безопасных условий труда предусмотрены следующие меры защиты:

1.9.1 Токоведущие части установки изолированы, в результате чего находятся в недоступных для работающих местах. «Поджиг» высокочастотного электрического разряда в плазмотроне, требующий прикосновения проводником к электроду, автоматизирован, что исключает случайное прикосновение персонала к электроду.

Металлические части установки, которые могут вследствие повреждения изоляции оказаться под напряжением, заземлены. Замер сопротивления контура заземления производится ежегодно.

1.9.2 Установка размещена в металлических корпусах, экранирующих электромагнитное и ультрафиолетовое излучение. ЗАПРЕЩЕНО во время работы установки, открывать двери генератора и технологического блока. При соблюдении указанных мер излучение не превышает допустимого.

1.9.3 Смотровое окно на дверях технологического блока установки должно быть оснащено экранирующей металлической сеткой.

1.9.4 Установка оснащена вытяжной системой вентиляции, системой очистки отходящих газов, защищающих работников от вредных газообразных и конденсированных веществ, образующихся в процессе работы.

1.10 Защитные ограждения (открывающиеся и съёмные) должны иметь электромеханические блокировки, автоматически отключающие подачу напряжения на установку при их открывании.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ работать на установке при неисправных дверных блокировках, открытых дверях генератора и технологического блока установки.

1.11 Крепление блокировочных устройств должно быть надёжным, исключающим случаи самооткрывания.

1.12 В случае прекращения подачи электроэнергии, во время перерыва в работе или в аварийной ситуации установка должна быть отключена от питающей сети.

1.13 Периодические осмотры и планово-предупредительные ремонты генератора, производятся по графикам, утверждённым руководителем работ.

1.14 Осмотр и ремонтные работы на установке производить при её полном отключении от источников питания. При этом необходимы:

а) видимый разрыв в виде отключения разъединителя входного рубильника с последующим снятием предохранителей;

б) на приводах (рукоятках приводов) коммутационных аппаратов во избежание подачи напряжения на рабочее место должны быть вывешены плакаты «НЕ ВКЛЮЧАТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ»;

г) проверка отсутствия напряжения на отходящих кабельных линиях питающих установку;

д) заземление конденсаторных установок.

1.15 Установка должна быть обеспечена следующими защитными средствами:

а) штанга оперативная на напряжение до 35 кВ – 1 шт.;

б) указатель напряжения УВН-110 на напряжение до 20 кВ – 1 шт.;

- в) клещи токоизмерительные К4570/1Ц – 1 шт.;
- г) диэлектрические перчатки – 2 пары;
- д) диэлектрические боты – 1 пара;
- е) диэлектрические коврики 2 шт.;
- ж) переносное заземление ЗПП-15 – 1 шт.;
- з) защитные очки – 2 пары;
- и) щипцы (пассатижи) – 1 шт.;
- к) халаты – 2 шт.

1.16 Все работники обеспечиваются спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты.

1.17 В случае травмирования работников необходимо оказать доврачебную помощь, если необходимо, вызвать скорую помощь по тел. 03, сообщить руководителю работ.

1.18 Запрещено принимать пищу на рабочем месте.

1.19 Лица, виновные в нарушении требований инструкций по охране труда, несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

## 2 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

2.1 Привести в порядок рабочую одежду, застегнуть рукава, провести внешний осмотр установки, проверить наличие и надёжность заземления и защитных средств.

2.2 Проверить наличие и исправность:

- а) предохранительных устройств;
- б) блокирующих устройств;
- в) наличие напора воды в водопроводе;
- г) работу компрессоров;
- д) системы мокрой очистки отходящих газов;

2.3 Результаты осмотра и принятые меры по ликвидации выявленных нарушений техники безопасности заносятся в рабочий журнал установки.

При осмотре обращать внимание:

- а) на безотказность работы всех блокирующих устройств, обеспечивающих безопасные условия работы персонала, необходимую чёткость и очередность включения всех элементов генератора и установки в целом;
- б) на надёжность экранирования и заземления корпуса генератора и технологического блока и компрессора;
- в) на чистоту контактов пускорегулирующей аппаратуры;
- г) на отсутствие пыли на токоведущих частях и изоляторах.

При обнаружении неисправностей блокировочных устройств до их устранения установку включать категорически ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

2.4 Запрещается работать на установке при обнаружении каких-либо неисправностей работы оборудования, отсутствии защитных средств или истечении сроков их годности.

2.5 Необходимо внимательно ознакомиться с плановым заданием на проведение работ на установке, наличием и состоянием исходных материалов (сырья) и безопасным обращением с ними.

2.6 Персоналу до полного ознакомления с плановым заданием работ на установке категорически ЗАПРЕЩАЕТСЯ включать и выключать рубильники, выключатели, открывать и закрывать вентили, краны, открывать крышки приборов, крутить рукоятки и т.п.

### 3 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1 Для исключения аварийных ситуаций, для безопасного выполнения работ необходимо строго соблюдать указанную последовательность запуска установки:

3.2 Включить в генераторе автоматические выключатели F1, F2.

3.3 Поставить в генераторе переключатель мощности в положение 50, 100 % (в соответствии с плановым заданием).

3.4 Закрыть все двери генератора и технологического блока. Включить рубильник Q1 на генераторном блоке.

3.5 Включить рубильник на питающем щите, при этом включается вентилятор воздушного охлаждения генераторной лампы.

3.6 Подать охлаждающую воду общим краном на водяном коллекторе, при этом на генераторе загорится сигнальная лампа «ОХЛАЖДЕНИЕ».

3.7 Включить на генераторе первую ступень накала кнопкой S2. Через 40 сек кнопкой S1 включить вторую ступень накала. Загорается белая сигнальная лампа «БЛОКИРОВКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ».

3.8 Поставить на генераторе тумблер S10 на генераторном блоке в положение «РУЧНАЯ РАБОТА».

3.9 Включить систему «мокрой» очистки отходящих из реактора газов б.

3.10 Включить компрессор 7 и подать в плазмотрон 3 плазмообразующий газ.

3.11 Нажатием кнопки S3 на генераторе включить «НАГРЕВ» и подать высокое напряжение на электрод плазмотрона, одновременно «поджечь» разряд в плазмотроне 7 с помощью автоматического устройства.

3.12 Во время работы установки запрещается открывать, снимать ограждения, отключать предохранительные и блокирующие устройства. Все работы производить при закрытых дверях генератора и технологического блока.

3.13 Во время работы установки следить за индикаторными лампами «ОХЛАЖДЕНИЕ», «НАКАЛ», «НАГРЕВ» на генераторе и датчиками расхода плазмообразующего газа, охлаждающей воды на пульте управления технологического блока.

3.14 Периодически снимать режимные параметры работы установки и заносить их в рабочий журнал. При необходимости производить корректировку этих параметров в соответствии с плановым заданием.

3.15 Во время работы установки следить за сигнальной лампой режима «РАБОТА», расположенной на пульте управления и контроля за технологическим процессом, при сбое технологического режима, автоматически выключается режим «НАГРЕВ» генератора и электроприводы подачи шлама, что сопровождается сигналом звонка.

3.16 В случае возникновения аварийной ситуации: локальный прогар стенок реактора при «закорачивании» высокотемпературного канала высокочастотного факельного разряда на металлическую поверхность внутренних стенок реактора, – термомпара показывает всплеск температуры, необходимо выполнить требования п.4.

#### 4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

4.1 В случае возникновения аварийной ситуации необходимо незамедлительно кнопкой S5 отключить подачу высокого напряжения на установку.

4.2 Кнопкой S4 отключить накал генераторной лампы.

4.3 Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, перекрыть кран на водяном коллекторе, подающим охлаждающую воду.

4.4 Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, отключить вентилятор обдува генераторной лампы рубильником Q1.

4.5 Отключить компрессор 7, прекратить подачу плазмообразующего газа в плазмотрон 3.

4.6 Не менее, чем через 10 минут после отключения накала, отключить систему мокрой очистки отходящих из реактора газов 6.

4.7 Отключить трёхфазный рубильник на питающем щите.

4.8 Принять меры по ликвидации аварии, немедленно сообщить руководителю работ.

4.9 В случае травмирования работников, немедленно после вызова скорой помощи по телефону **03**, приступить к оказанию доврачебной помощи, сообщить руководителю работ.

4.10 Устранить воздействие на организм пострадавшего повреждающих факторов, угрожающих его здоровью и жизни (освободить от действия электрического тока, погасить горящую одежду); вывести пострадавшего на свежий воздух, обеспечить полный покой, усадить в удобное кресло или уложить, предохраняя от охлаждения.

4.11 **При поражении электрическим током** необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от действия электрического тока, так как от продолжительности этого действия

зависит тяжесть электротравмы, поэтому необходимо немедленно отключить ту часть установки, которой касается пострадавший.

Если невозможно произвести быстрое отключение установки, то необходимо отделить пострадавшего от токоведущих частей (палкой, доской, оттянуть за полы пиджака, руками, обмотанными шарфом и т. п.)

4.12 После освобождения пострадавшего от действия повреждающих факторов необходимо оценить его состояние:

- а) сознание: ясное, отсутствует;
- б) дыхание: нормальное, отсутствует;
- в) пульс на сонных артериях: хорошо определяется, плохо определяется.

4.13 Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в обмороке с сохранившимся устойчивым дыханием и пульсом, следует выполнить следующие действия:

- а) уложить пострадавшего на подстилку, например из одежды;
- б) расстегнуть одежду, стесняющую дыхание;
- в) обеспечить приток свежего воздуха;
- г) освободить помещение от посторонних людей и создать полный покой, наблюдая за пульсом и дыханием.

4.14 Если пострадавший дышит очень редко и судорожно, но у него прощупывается пульс, необходимо сразу же начать делать искусственное дыхание. Для этого, прежде всего, необходимо обеспечить проходимость верхних дыхательных путей (пальцем, обвёрнутым бинтом или тканью удалить из полости рта инородное содержание). Затем оказывающий помощь располагается сбоку от головы пострадавшего, одну руку подсовывает под пострадавшего, а ладонью другой руки надавливает на его лоб, запрокидывая голову.

Оказывающий помощь делает глубокий вдох открытым ртом, плотно охватывает губами открытый рот пострадавшего и делает энергичный выдох, с некоторым усилием вдувая воздух в его рот; одновременно он закрывает нос пострадавшего щекой. Как только грудная клетка поднялась, нагнетание воздуха приостанавливают.

4.15 Если у пострадавшего отсутствует сознание, дыхание, пульс, кожный покров синюшный, необходимо немедленно кроме искусственного дыхания делать наружный массаж сердца.

Оказывающий помощь располагается сбоку от пострадавшего, и, наклонившись, делает два быстрых вдувания, затем поднимается, оставаясь на этой же стороне от пострадавшего, ладонь одной руки кладёт на нижнюю половину грудины (отступив на два пальца выше от её нижнего края), а пальцы приподнимает. Ладонь второй руки он кладёт поверх первой, поперёк или вдоль и надавливает, помогая наклоном своего корпуса.

Надавливание следует производить быстрыми толчками, так чтобы смещать грудину на 4-5 см, продолжительность надавливания не более 0,5с. За 1 минуту необходимо сделать не менее 60 надавливаний и 12 вдуваний.

**4.16 Первая помощь при ожогах:** на обожжённый участок кожи наложить стерильную повязку. Нельзя обожжённый участок кожи смазывать мазями, присыпать пищевой содой, вскрывать пузыри, удалять прилипшие вещества. Обожжённое лицо необходимо закрывать стерильной марлей.

При ожогах глаз ультрафиолетовым излучением разряда следует делать холодные примочки из раствора борной кислоты (½ чайной ложки на 1 стакан воды).

При обширных ожогах кожи пострадавшего необходимо завернуть в чистую простынь, не раздевая, напоить тёплым чаем и создать покой до прибытия врача.

## 5 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТ

- 5.1. Через 5 – 10 минут кнопкой S5 отключить подачу высокого напряжения на установку.
- 5.2. Кнопкой S4 отключить накал генераторной лампы.
- 5.3. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, перекрыть кран на водяном коллекторе, подающим охлаждающую воду.
- 5.4. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, выключить вентилятор обдува генераторной лампы рубильником Q1.
- 5.5. Отключить компрессор 7 и прекратить подачу плазмообразующего газа в плазмотрон 3.
- 5.6. Не менее, чем через 10 минут после выключения накала, отключить работу системы «мокрой» очистки отходящих из реактора газов 6.
- 5.7. Поставить в исходное положение все переключатели.
- 5.8. Выключить трёхфазный рубильник на питающем щите.
- 5.9. Привести в порядок рабочее место.
- 5.10. О замеченных неисправностях сообщить руководителю работ и занести в рабочий журнал.

## 4 ПОРЯДОК ЗАПУСКА ВЧ ГЕНЕРАТОРА ВЧГ8-60/13

- 1 Включить в генераторе автоматические выключатели F1 и F8.
- 2 Поставить в генераторе переключатель мощности в положение (50,100 %).
- 3 Закройте все двери.
- 4 Включите рубильник Q1.
- 5 Включите рубильник на питающем щите, при этом включается вентилятор воздушного охлаждения генераторной лампы.

- 6 Подайте охлаждающую воду общим краном на водяном коллекторе, при этом на генераторе загорится сигнальная лампа «ОХЛАЖДЕНИЕ».
- 7 Включите первую ступень накала кнопкой S2. Через 40 с. кнопкой S1 включите вторую ступень накала. Загорается жёлтая сигнальная лампа «БЛОКИРОВКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ».
- 8 Поставьте тумблер S10 на генераторном блоке в положение «РУЧНАЯ РАБОТА».
- 9 Нажатием кнопки S3 включить «НАГРЕВ». Загорится белая сигнальная лампа «НАГРЕВ».
- 10 В процессе работы нагрев выключайте кнопкой S5.

## **5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1 До возбуждения разряда в ВЧ факельном плазмотроне, измерить температуру охлаждающей воды на водоохлаждаемых элементах установки (анод генераторной лампы, сеточная и анодная индуктивность, электрод и корпус ВЧ факельного плазмотрона плазмотрона). Результаты измерений занести в таблицу 2

2 Включить компрессор К (рис.2.1.) и вентилем В1 установить на ротаметре Р1 необходимый расход плазмообразующего газа  $Q_{ПГ}$ , а вентилем В2 на ротаметре Р2 установить расход охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ОГ}$ . При помощи узла “поджиг” возбудить ВЧ факельный разряд в разрядной камере ВЧ факельного плазмотрона и позиционерами на лицевой стороне ВЧ генератора установить заданный режим работы генератора ( $J_A=2,0 \dots 5,0$  А).

3 Через 10 минут, после установления режимов, проводить замеры температуры охлаждающей воды на водоохлаждаемых элементах установки.

4 Используя данные, полученные в лабораторной работе «Градуировка датчиков расхода жидкости и газа», рассчитать потери тепловой мощности, выделяемые на водоохлаждаемых элементах системы ВЧ генератор – ВЧ факельный плазмотрон.

5 Определить мощность плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном, при различных значениях анодного тока  $J_A$ , расхода плазмообразующего газа  $Q_{ПГ}$  и расхода охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ОГ}$ .

6 Определить КПД ВЧ факельного плазмотрона.

7 Провести математическую обработку полученных результатов. Построить графические зависимости среднемассовой температуры плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном от анодного тока  $J_A$ , расхода плазмообразующего газа  $Q_{ПГ}$  и расхода охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ОГ}$ .



8 Провести анализ полученных результатов. Определить оптимальные режимы работы ВЧ факельного плазмотрона с максимальными среднemasсовой температуры плазменной струи и КПД. Сделать выводы.

### РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ:

1 Мощность, потребляемая ВЧ генератором от электрической сети:

$$P_0 = I_A \cdot U_A, \text{ [кВт]},$$

где  $I_A$ - ток анода [А];  $U_A$ - напряжение на аноде генераторной лампы [кВ].

2 Мощность, выделяемая на аноде генераторной лампы:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \cdot 4.186 \cdot 10^{-3}, \text{ [кВт]},$$

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

3 Мощность, выделяемая на сеточной и анодной индуктивности:

$$P_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \cdot 4.186 \cdot 10^{-3}, \text{ [кВт]},$$

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

4 Мощность, выделяемая на электроде:

$$P_{эл} = m_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \cdot 4.186 \cdot 10^{-3}, \text{ [кВт]},$$

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

5 Мощность, выделяемая на корпусе ВЧ факельного плазмотрона:

$$P_{кп} = m_{кп} \cdot C_p \cdot \Delta t_{кп} \cdot 4.186 \cdot 10^{-3}, \text{ [кВт]},$$

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

6 Мощность ВЧ факельного разряда:

$$P_{разр} = P_0 - (P_a + P_c + P_{эл}), \text{ [кВт]}.$$

7 Мощность плазменной струи:

$$P_{стр} = P_{разр} - P_{кл}, \text{ [кВт]}.$$

8 Термический КПД ВЧ факельного плазмотрона:

$$\eta_{пл} = \frac{P_{стр}}{P_{разр}} \cdot 100\%$$

9 Энтальпия плазменной струи :

$$H_T = H_0 + \frac{P_{стр}}{Q_g} \cdot 10^3, \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right],$$

где  $Q_g$  - массовый расход плазмообразующего газа [кг/с],  $H_0 = 300,3$  кДж/кг.

10 Среднемассовую температуру плазменной струи определять с помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рис. 2.

Таблица 2. Начальные параметры

	Плазмообр. газ	Охлажд. газ	Анод	Сетка	Электрод	КП	Реактор
$t_{нач}, \text{C}^\circ$							
$Q, \text{г/с}$							

Таблица 3

№ п/п	$J_a,$ А	$J_c,$ А	$U_a,$ кВ	$Q_g,$ г/с	$Q_a,$ г/с	$\Delta t_a,$ $^\circ\text{C}$	$Q_{Лс},$ г/с	$\Delta t_{Лс},$ $^\circ\text{C}$	$Q_{эл},$ г/с	$\Delta t_{эл},$ $^\circ\text{C}$	$Q_{кп},$ г/с	$\Delta t_{кп},$ $^\circ\text{C}$	$Q_{рр},$ г/с	$\Delta t_{рр},$ $^\circ\text{C}$
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
$M_{ср}$														
$\Delta M$														

Таблица 4

№ п/п	$P_o$ , кВт	$P_a$ , кВт	$P_{Lc}$ , кВт	$P_{эл}$ , кВт	$P_{кп}$ , кВт	$P_{рр}$ , кВт	$P_{пол}$ , кВт	$\sum P_i$ , кВт	$\eta_{пл}$ , %	$H_T$ , кДж/кг	$T_{стр}$ , К
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
$M_{ср}$											
$\Delta M$											

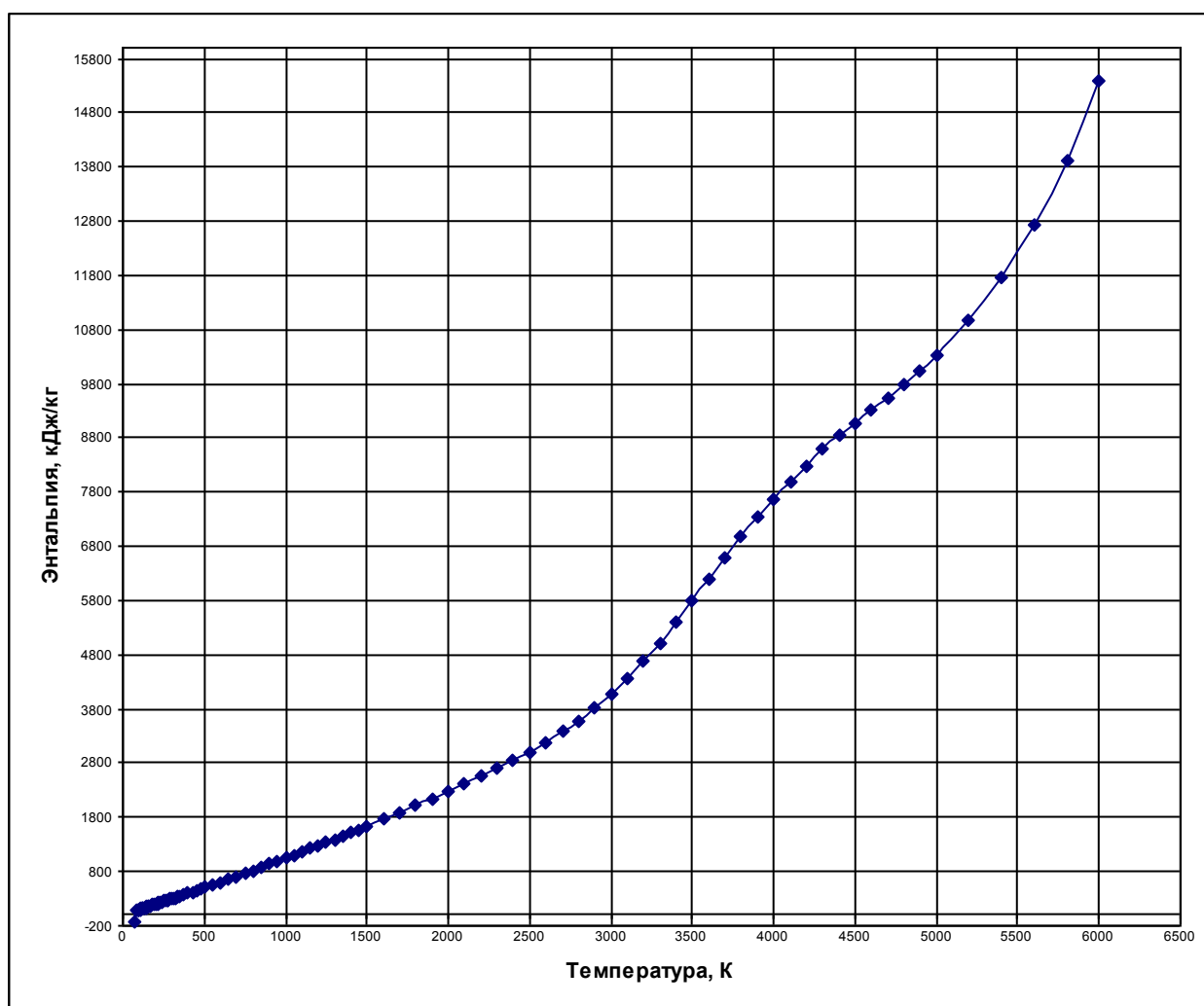


Рис. 2. Зависимость энтальпии воздуха от его температуры

## 6 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1 Цель проведения работы.
- 2 Принципиальную электрическую схему плазменной установки на базе ВЧ факельного плазмотрона и ее краткое описание.
3. Основные требования по технике безопасности при работе на ВЧ генераторе ВЧГ8-60/13 перед началом работы, во время работы, в аварийных ситуациях и по окончании работ.
- 4 Табличные данные и графические зависимости среднемассовой температуры плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном от анодного тока  $J_A$ , расхода плазмообразующего газа  $Q_{ПГ}$  и расхода охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ОГ}$ .
- 5 Анализ полученных результатов. Оптимальные режимы работы ВЧ факельного плазмотрона с максимальным КПД. Выводы.

## 7 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i .$$

7.2 Определить погрешности отдельных измерений:

$$\Delta t_i^0 = \bar{t} - t_i .$$

7.3 Для контроля правильности вычислений отклонений результатов измерений от среднего арифметического вычислить:

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i^0 .$$

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

7.4 Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений  $(\Delta t_i^0)^2$ .

Для контроля правильности вычисления сумм квадратов отклонений воспользоваться тождеством:

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

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

7.5 Вычислить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений (среднего арифметического):

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}{(n-1)}}.$$

7.6 Для определения границ доверительного интервала воспользоваться неравенством Чебышева:

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

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

7.7 Вычислить границы доверительного интервала:

$$\Delta t = k_\alpha S_x$$

7.8 Вычислить относительную погрешность результата серии измерений:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\bar{t}} \cdot 100\%.$$

7.9 Построить по итогам проведенной обработки результатов измерений графические зависимости среднемассовой температуры плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном от анодного тока  $J_A$ , расхода плазмообразующего газа  $Q_{пг}$  и расхода охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ог}$ .

## 8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Из каких основных узлов состоит плазменная установка?
- 2 Последовательность включения плазменной установки?
- 3 Последовательность выключения плазменной установки?
- 4 Каким способом определяются потери тепловой мощности на водоохлаждаемых узлах плазменной установки?
- 5 Как определяется мощность, подведенная от ВЧ генератора к ВЧ факельному плазмотрону?
- 6 Как определяется мощность плазменной струи (полезная мощность), генерируемая ВЧ факельным плазмотроном?
- 7 Как определяется энтальпия плазменной струи, генерируемая ВЧ факельным плазмотроном?
- 8 Как определяется среднемассовая температура плазменной струи?

- 9 Перечислите требования безопасности перед началом работы установки?
- 10 Перечислите требования безопасности во время работы установки?
- 11 Перечислите требования безопасности по окончании работы установки?
- 12 Перечислите требования безопасности при аварийных ситуациях на установке?

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

- 1 Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы – Л.: Химия, 1981. – 248с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
- 2 Артамонов А.Г., Володин В.М., Авдеев В.Г. Математическое моделирование и оптимизация плазмохимических процессов.– М.: Химия, 1989. – 224с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
- 3 Пархоменко В.Д., Цыбулев П.Н., Краснокутский Ю.И. Технология плазмохимических производств. – Киев: Выща школа, 1991. – 253с. (НТБ – 2 экз., кафедра ТФ – 1 экз.).
- 4 Грей Дж. и др. Приборы для научных исследований, т. 29, 1962.
- 5 Дресвин С.В. Физика и техника низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1972.- 352с. (НТБ - 2 экз., кафедра ТФ - 1 экз.).
- 6 Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. - М.: Атомиздат, 1977. -195с. (НТБ - 2 экз., кафедра ТФ - 1 экз.).
- 7 Ясельский В.К., Кузнецов А.И., Дядик В.Ф. Обработка результатов измерений. Учебное пособие. - Томск: ТПИ, 1977-95с. (НТБ - 2 экз., кафедра ТФ - 1 экз.).