

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 ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ**

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 тепловые потоки плазменной струи, генерируемой ВЧ факельным плазмотроном, при различных значениях тока анода, плазмообразующего газа и охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа.

2 Построить графические зависимости тепловых потоков 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 максимальным КПД. Сделать выводы.

## 2 ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Существующие методы измерения тепловых потоков плазмы по способам регистрации делятся на стационарные и нестационарные [4]. 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.

**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 [4]

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

где  $T_m$  — температура металла;  $l$  — линейный размер;  $t$  — время;  $a_m$  — коэффициент температуропроводности металла;  $\lambda_m$  — коэффициент теплопроводности металла;  $A$  — отношение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности металла и изоляции:

$$A = \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \sqrt{\frac{a_m}{a_i}}$$

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

$$T_m(l, t) = (2\sqrt{a_i} / \sqrt{\pi\lambda_i}) \cdot qt, \quad (1)$$

где  $q$  — плотность теплового потока к пластине.

Температура тонкой металлической пленки обычно измеряется по изменению ее электрического сопротивления

$$R = R_0(1 + a_R \cdot T_m),$$

где  $R_0$  — электрическое сопротивление пленки при комнатной температуре;  $a_R$  — температурный коэффициент сопротивления. Плотность теплового потока к пластине вычисляется по формуле, получаемой из выражения (1).

**Экспоненциальный (калориметрический) метод (метод массивного термометра сопротивления).** В отличие от тонкопленочного термометра сопротивления в данном методе толщина металлической пластины  $l$  выбирается больше характеристической толщины металла

$$l > \sqrt{a_m \cdot t}.$$

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

$$q = l \cdot \rho_m \cdot C_p \cdot dT/dt \quad (2)$$

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 искривляют линейные характеристики нагрева такого калориметра. В работе [4] приведены результаты расчета потерь тепла к изолятору при идеальном контакте металлической пластины с изолятором из пирекса. На рис. 1 приведена зависимость отношения тепловых потоков, определяемая выражением

$$Q_i / Q = \int_0^t q_i dt / q_0 \cdot t$$

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 [8], 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

$$q = \frac{1}{I \cdot R_0} \cdot \frac{\rho \cdot C_p \cdot l}{\alpha_R} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (3)$$

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

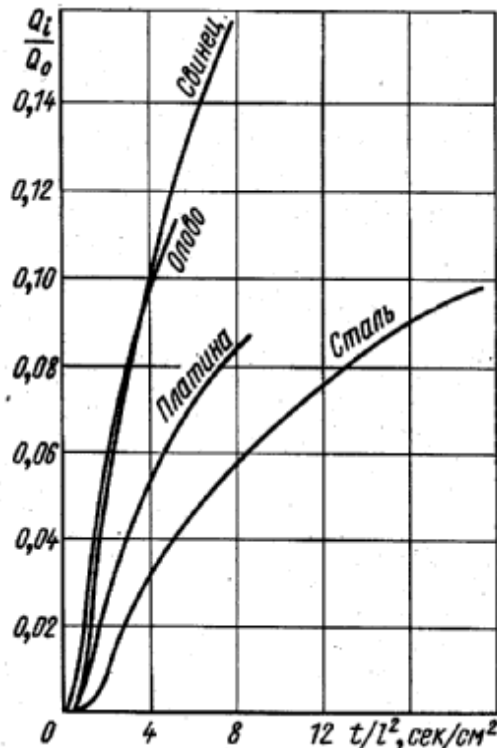


Рис. 1. Утечки тепла от калориметра к изолятору для различных материалов датчика.

Выражение (3) 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 эта время эксперимента и распределение температуры становится нелинейным. Для компенсации нелинейности распределения температуры вводится поправка [2].

Температуру датчика можно регистрировать разными способами в зависимости от того, какое из выражений (2) или (3) используется. Для определения плотности теплового потока в соответствии с выражением (2) датчик заделывается в исследуемую модель, и при известных размерах и физических параметрах датчика изменение температуры во времени регистрируется дифференциальной термопарой.

В работе [4] для измерения  $q$  использовались полые цилиндры с плоскими, сферическими и эллипсоидальными торцами с небольшой толщиной стенки. В работе [2] 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 [3] 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 (2).

Если для определения  $q$  используется выражение (3), то методика проведения эксперимента аналогична методике тонкопленочного термометра сопротивления. Так, в работе [4] 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 [4], 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.

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 [4].

**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 (1)

$$q = \left( \sqrt{\pi} / 2 \right) \sqrt{\rho \cdot c_p \cdot \lambda} / (t_{пл} \cdot T_{пл})$$

В качестве датчиков для определения плотностей тепловых потоков от воздуха, нагретого в электродуговом подогревателе, использовались медные и алюминиевые цилиндры, защищенные с боковой поверхности стекловолокном [4]. Время до начала плавления измерялось с помощью кино съемки или секундомером.

**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.2. 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 (рис. 2) 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:

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

где  $a$ ,  $\lambda$ , — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности;  $x$  — положение термопары. Значения суммы в зависимости от  $x/l$  и  $at/l^2$  протабулированы в работе [4]. В работе [3] определено время  $t_1$ , по прошествии которого температура на обратной стороне датчика начинает возрастать линейно:

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

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

Из решения уравнения (4) следует, что температура передней поверхности по истечении переходного режима является также линейной функцией времени

$$T = \frac{lq}{\lambda} \left( \frac{a \cdot t}{l^2} + \frac{1}{3} \right)$$

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

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

Исходя из выражений (5) и (6), в работе [4] определена линейная часть температурно-временной характеристики

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

Для измерения высоких тепловых потоков желательно иметь максимальный временной интервал при оптимальной толщине датчика:

$$l_{\text{опт}} = l \cdot T_{\text{макс}} / 1,366q.$$

На рис.6 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 [4] плотность теплового потока измерялась датчиком, где в качестве

калориметра использовался медный цилиндр диаметром 3,2 и длиной 6,4 мм, помещенный в теплоизоляционный материал.

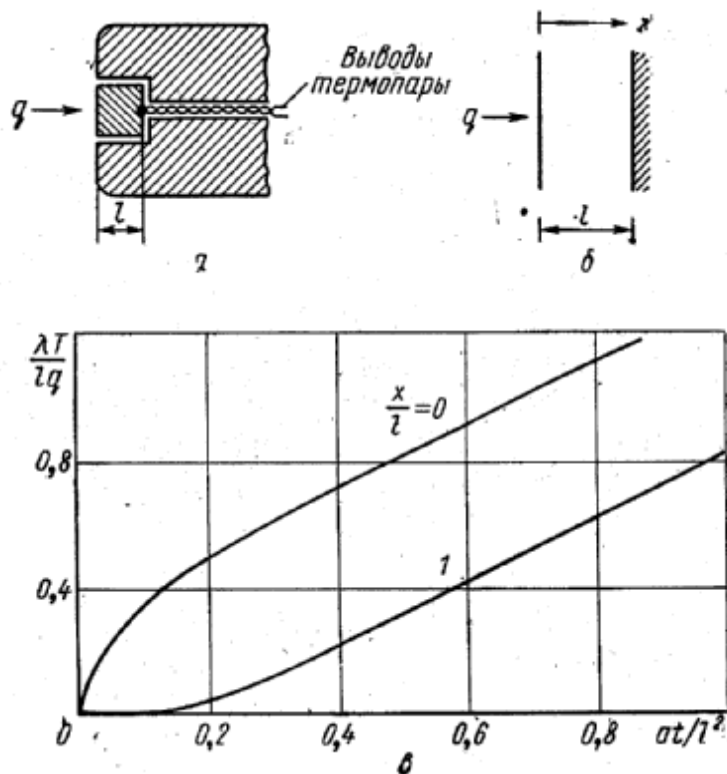


Рис. 2. Схема (а) калориметрического датчика с линейной характеристикой (в) его одномерной модели (б).

**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:

$$q = -\lambda (\partial T / \partial z)_{z=0}, \quad (7)$$

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  $l$  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  $T(l, t) = \varphi_2(t)$  [16, 17], которые могут быть определены экспериментально.

Вычисленная зависимость  $T(z, t)$  подставляется в уравнение (7). Зная температуры передней и обратной поверхностей датчика, можно определить тепловой поток. В работе [4], в качестве датчика использовалась модель, позволяющая приблизить условия опыта к нагреванию бесконечной пластины, в виде стального цилиндра, окруженного двумя кольцами из теплоизоляционного материала

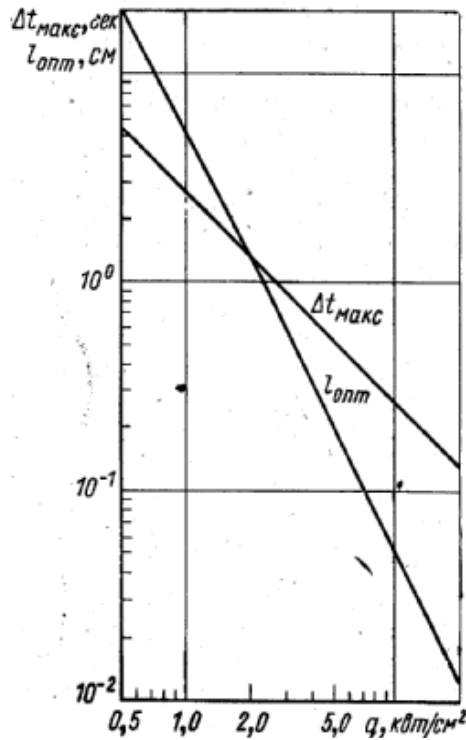


Рис. 6. Зависимость  $l_{opt}$  и  $\Delta t_{max}$  от плотности теплового потока.

**Метод цилиндрического термометра сопротивления.** В работах [3, 4] для измерения тепловых потоков использовался калориметрический метод цилиндрического (проволочного) термометра сопротивления. Тепловой поток на единицу цилиндрического датчика (проволоки) определяется выражением

$$Q_t = C_p \cdot m_l \cdot dT/dt,$$

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

$$U_t(x) = (R_t - R_0)I.$$

Учитывая, что

$$R_0 = 4\rho_R \cdot l/\pi d^2,$$

где  $\rho_R$  — удельное электрическое сопротивление проволоки;  $l$  — ее длина, плотность потока



$$q(x) = \frac{\pi^2 \cdot \rho \cdot c_p \cdot d^4}{16\alpha_R \cdot \rho_R \cdot I} \cdot \frac{dU_t(x)}{dt},$$

где  $q(x)$  — плотность теплового потока в зависимости от положения датчика в потоке плазмы;  $p$  — 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.

**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 [4] термопара вводилась в плазму с помощью электромагнита. На рис.7 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. Характерная осциллограмма кривой нагрева спая термопары приведена на рис.8. Плотность теплового потока вычислялась с помощью выражений для цилиндра и сферы соответственно

$$q = \rho \cdot C_p \frac{d}{4} \cdot \frac{dT}{dt} \text{ и } q = \rho \cdot C_p \frac{d}{6} \cdot \frac{dT}{dt},$$

где  $d$  — диаметр;  $p$  — плотность;  $C_p$  — теплоемкость термопары. Данный метод позволяет измерять непосредственно локальную плотность теплового потока.

**Стационарные методы измерения тепловых потоков (методы охлаждаемого калориметра).** Имеется три стационарных метода измерения тепловых потоков, различающихся типами охлаждаемых калориметров: метод точечного калориметра, измеряющего локальные значения теплового потока, усредненные по площади датчика; метод линейного (цилиндрического) калориметра, измеряющего тепловой поток на линии, перпендикулярной оси потока, и метод поверхностного калориметра, измеряющего тепловой поток к плоскости.

**Метод точечного калориметра.** Метод назван так потому, что величина тепловоспринимающей поверхности датчика мала по сравнению с общим сечением плазменного потока, что дает возможность пренебречь градиентом температуры по его сечению и измерять тепловой поток в отдельной точке. Плотность теплового потока, измеряемая с помощью точечного калориметрического датчика, как и в других стационарных методах, определяется по нагреву и массовому расходу охлаждающей воды в соответствии с выражением

$$q = C_p \cdot G \cdot \Delta T / S,$$

где  $C_p$  - теплоемкость воды;  $G$  и  $\Delta T$  - расход и повышение температуры охлаждающей воды.

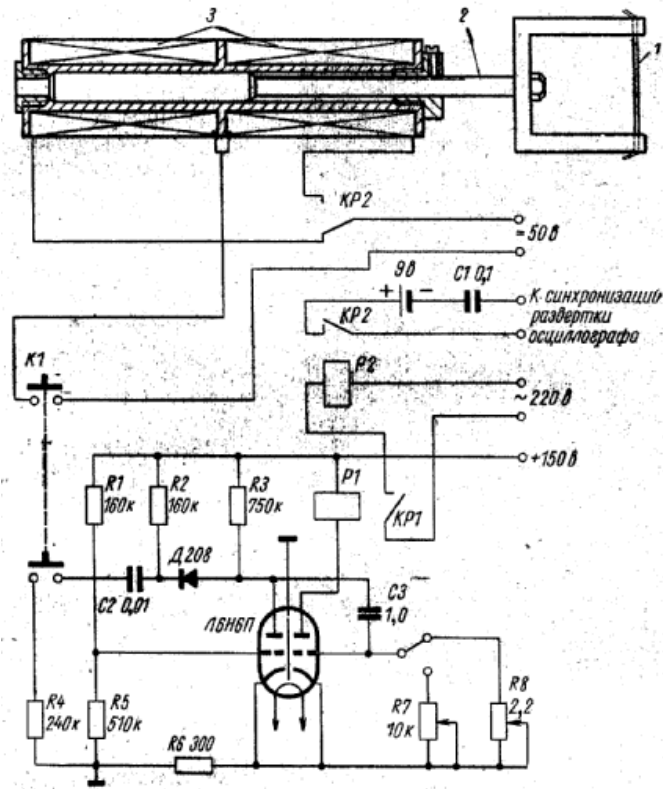


Рис. 7. Схема динамической термопары:

1 — бескорольковая термопара; 2 — подвижный шток; 3 — электромагнит;

К1 — кнопка пуска; P1 — реле управления (PCM-2); P2 — реле переключения обмоток магнита (МКУ-48)

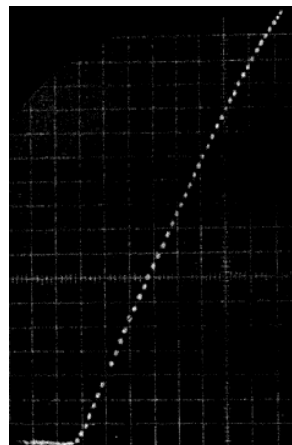


Рис. 8. Осциллограмма нагрева спая бескорольковой термопары.

**Метод линейного цилиндрического калориметра.** Исследование радиального распределения плотности теплового потока  $q(r)$  в работах [3, 4] производилось с помощью цилиндрического калориметрического датчика путем перемещения его в плоскости, расположенной нормально к потоку. В работе [2] для измерений использован медный охлаждаемый водой капилляр диаметром 1,35 мм. Измеренное распределение теплового потока

$q(x)$ , где  $x$  - координата, перпендикулярная оси потока, преобразовывается в радиальное распределение  $q(r)$  точно таким же образом, как и радиальное распределение интенсивности излучения по Абелю [4]. При этом вводилась нормировка

$$N = (n/r) \cdot (1/2 \pi R),$$

где  $n$  — число зон, используемых в пересчете;  $r$  — радиус струи плазмы;  $R$  — радиус датчика.

**Метод поверхностного калориметра.** Экспериментальное исследование процессов теплоотдачи, происходящих при торможении нагретого газа на плоской поверхности, в работе [4] проводилось с помощью поверхностного (плоского) калориметрического датчика. Этот метод, помимо полной тепловой мощности струи, позволяет определять распределение плотности теплового потока по радиусу нагретого газа. В последнем случае используется плоский водоохлаждаемый зонд, разделенный на два участка тепловым барьером. Температура охлаждающей воды измеряется отдельно по обоим участкам. Тепловой поток  $Q(x)$ , полученный датчиком, где  $x$  — координата, определяющая положение датчика, связан с радиальным распределением плотности теплового потока  $q(r)$  выражением

$$Q(x) = 2 \int_x^R \frac{q(r) \cdot r dr}{\cos(x/r)}$$

В работе [4] предложен способ пересчета данных  $Q(x)$  посредством разделения абсциссы  $r$  на  $2n$  равных участков шириной  $b$  и вычисления  $q(r)$  численным методом на основе выражения

$$q_k(r) = \frac{1}{\pi b^2} \sum_{i=k-1}^{n-1} C_{k,i} \cdot Q_i(x).$$

### 3 ОПИСАНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ВЧ ФАКЕЛЬНОГО ПЛАЗМОТРОНА

Экспериментальная установка на базе ВЧ факельного плазмотрона предназначена для генерирования потоков воздушной плазмы с температурой до 6000К.

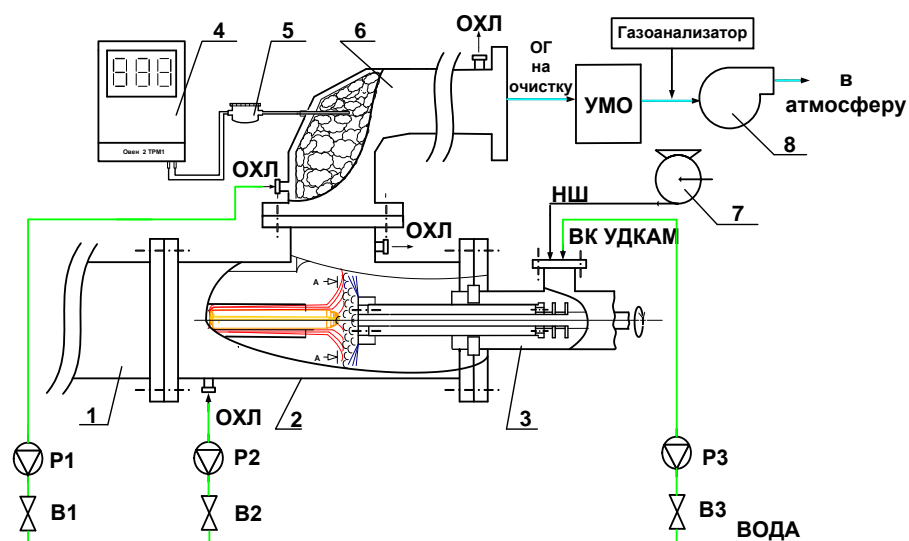
В общем случае экспериментальная установка представляет собой функциональное объединение двух блоков (рис.1):

- высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13 (источник питания);
- технологический блок.

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.

Генератор выполнен в стальном шкафу, разделенном на два отсека экранированный и неэкранированный. Шкаф генератора имеет двери с двух сторон, что делает удобным доступ ко

### Схема экспериментальной установки



1 - ВЧ факельный плазмотон; 2 - реактор; 3 - форсунка; 4 - регулятор и измеритель температуры; 5- термопара; 6 - газоход; 7 - погружной насос; 8 - вытяжной вентилятор

Рис.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

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, две группы регулируемых вакуумных конденсаторов КП1-3-15/350 для регулирования частоты и мощности генератора, группа укорачивающих конденсаторов К61-4-50, 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 незранированном 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.

Технологический блок включает следующие основные узлы (рис. 1): ВЧ факельный плазмотрон **1**, реактор **2**, форсунка **4**, регулятор-измеритель температуры **5**, газоход **6**, узел «мокрой» очистки отходящих газов (УМО), погружной насос **7**, вытяжной вентилятор **8**.

## **4 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 очерёдность 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 Закрывать 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.

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

4.11. 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.

4.12. **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.)

4.13. 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.

4.14. 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.

4.15. 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.

4.16. 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 0,5 с. За 1 минуту необходимо сделать не менее 60 надавливаний и 12 вдуваний.

4.17. **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 ( $\frac{1}{2}$  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.

## 5 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.

## 6 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). Результаты измерений занести в таблицу 2

2 Включить компрессор К (рис.2.1.) и вентилем В1 установить на ротаметре P1 необходимый расход плазмообразующего газа  $Q_{ПГ}$ , а вентилем В2 на ротаметре P2 установить расход охлаждающего кварцевую разрядную камеру газа  $Q_{ОГ}$ . При помощи узла “поджига” 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 – технологический блок.

5 Определить тепловые потоки 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  $Q_{ОГ}$ .

7 Провести математическую обработку полученных результатов. Построить графические зависимости тепловых потоков плазменной струи 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, обеспечивающие максимальный тепловой поток плазменной струи. 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:

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

8 Термический КПД ВЧ факельного плазмотрона:

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

9 Энтальпия плазменной струи :

$$H_T = H_0 + \frac{P_{стр}}{Q_2} \cdot 10^3, \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right],$$

где  $Q_2$  - 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 рисунке 2.

11 Тепловой поток плазменной струи:

$$Q = (P_{стр} + P_{pp} + P_{20}) \cdot \Delta\tau + Q_{умо} [\text{кВт} \cdot \text{ч}],$$

где  $Q_{умо}$  – тепловая энергия, уловленная узлом «мокрой» очистки отходящих газов,  $\Delta\tau$  – время измерения теплового потока, час.

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	$J_a, \text{А}$	$J_c, \text{А}$	$U_a, \text{кВ}$	$Q_Г, \text{г/с}$	$Q_a, \text{г/с}$	$\Delta t_a, \text{}^{\circ}\text{C}$	$Q_{Лс}, \text{г/с}$	$\Delta t_{Лс}, \text{}^{\circ}\text{C}$	$Q_{эл}, \text{г/с}$	$\Delta t_{эл}, \text{}^{\circ}\text{C}$	$Q_{кп}, \text{г/с}$	$\Delta t_{кп}, \text{}^{\circ}\text{C}$	$Q_{pp}, \text{г/с}$	$\Delta t_{pp}, \text{}^{\circ}\text{C}$
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	$P_{pp}$ , кВт	$P_{гд}$ , кВт	$Q$ , кДж	$\eta_{пл}$ , %	$H_T$ , кДж/кг	$T_{стр}$ , К
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
$M_{cp}$											
$\Delta M$											

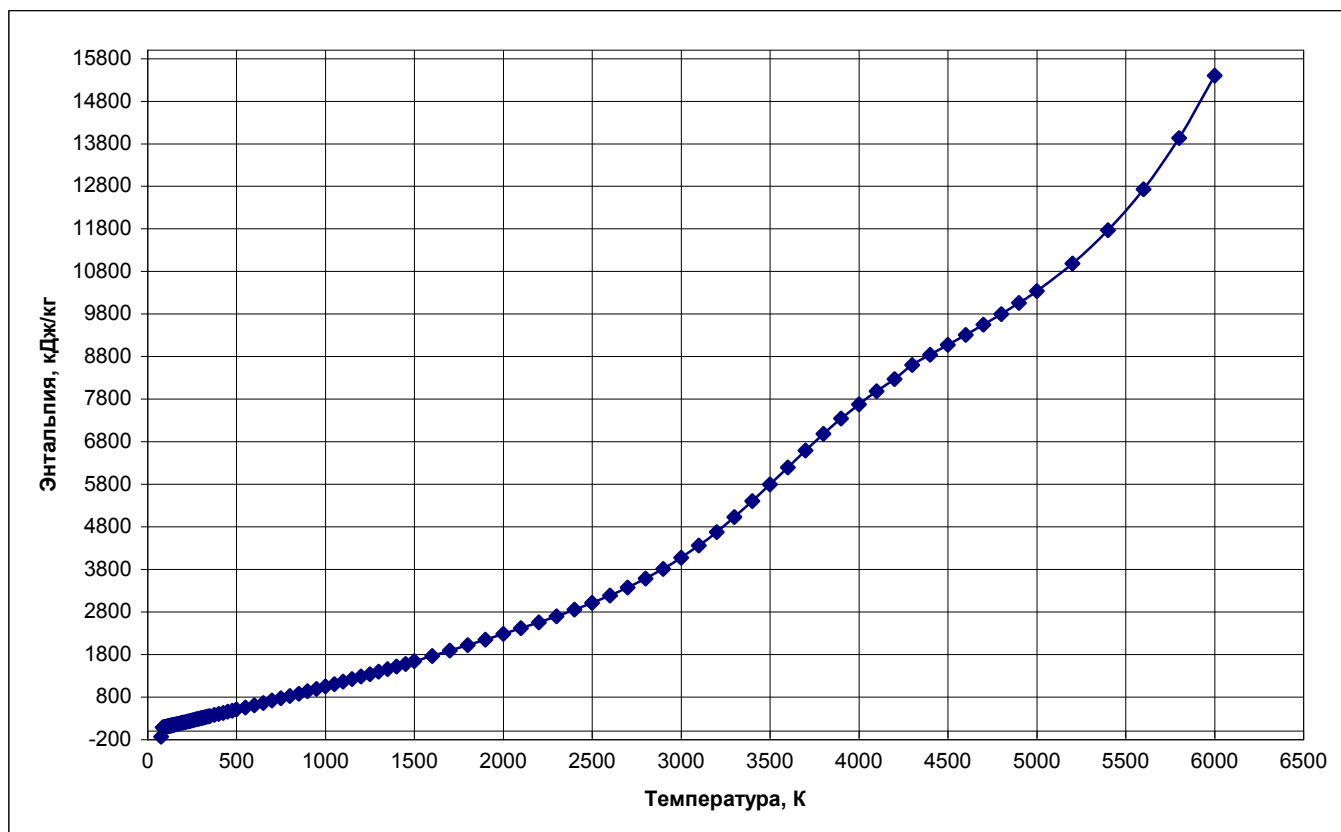


Рис. 2. Зависимость энтальпии воздуха от его температуры



## 6 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1 Цель проведения работы.

2 Принципиальную 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 тепловых потоков, генерируемых 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 тепловых потоков плазменной струи, генерируемых 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 Как определяется скорость плазменной струи?
- 10 Перечислите требования безопасности перед началом работы установки?

- 11 Перечислите требования безопасности во время работы установки?
- 12 Перечислите требования безопасности по окончании работы установки?
- 13 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.).