

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

2 Построить графические зависимости скорости 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 СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Измерение скорости течения газов с очень высокой температурой - сложная и трудоемкая задача. Методов измерения мало и многие из них не обладают достаточной точностью и разрешением, например методы, основанные на измерении реакции струи плазмы или скорости движения ионизационной метки [3,4]. Нами опробовано несколько методов измерения скорости течения плазмы.

Измерение скорости течения плазмы по реакции плохо обтекаемого тела. В качестве такого тела использовался графитовый диск диаметром 5мм. Сила, действующая на диск, определялась с помощью выражения

$$F = C_d \cdot (\rho v^2 / 2) \cdot S,$$

где C_d - коэффициент лобового сопротивления диска; S - его площадь; ρ - плотность газа в плазме; v - скорость течения плазмы. Значение C_d определялось тарировкой на холодном потоке газа и оказалось равным единице. Зная плотность газа в точке измерения силы, действующей на диск, можно вычислить скорость течения плазмы. Однако данный метод не позволял измерять скорость течения плазмы длительное время, так как графитовый наконечник при очень высоких температурах изменял свою форму, что вносило все увеличивающуюся со временем систематическую погрешность. Конструктивные трудности при создании водоохлаждаемой весовой площадки вряд ли могут быть оправданы, так как относительная величина площади диска не позволит измерить радиальное распределение скорости течения плазмы.

Метод треков. Скорость течения плазмы определялась по длине треков угольных частиц, пролетающих через плазму, которые фотографировались с определенным временем экспозиции. По точности измерений метод треков не обладает большими преимуществами, так как скорость движения частиц в большинстве случаев меньше скорости течения газа, а степень отставания трудно поддается оценке.

Метод измерения скорости течения плазмы трубкой полного напора. Этот метод наиболее распространен при измерении скорости течения газов при низких температурах [4]. В последнее время его используют для измерения скорости течения плазмы в открытых струях и

каналовых дугах. Применяют водоохлаждаемые трубки полного напора, стационарно вносимые в определенную область плазменной струи и неохлаждаемые трубки, быстро проносимые сквозь плазменный сгусток [3, 4]. Давление в передней критической точке тела, внесенного в поток, определяют соотношением

$$p = p_0 + (\rho v^2 / 2), \quad (1)$$

где p и p_0 - полное и статическое давление соответственно; ρ - плотность плазмы; v - скорость ее течения.

Если плотность плазмы известна, то из измерений скоростного напора можно вычислить скорость течения плазмы. Насадки, используемые для измерений при нестационарном методе регистрации, приведены на рис.1.

Для измерения полного напора применяют насадки двух конструкций: по типу трубки Пито (рис.1,а) и цилиндрическая насадка с измерительным отверстием на боковой поверхности цилиндра (рис.1,б). По точности измерений данные насадки идентичны, но вторая конструкция насадки позволяет измерять давление через узкую щель каналовой дуги. Для измерения статического давления использовалась дисковая насадка (шайба Сера, см. рис.1,в), которая устанавливалась в потоке так, чтобы плоскость диска была параллельна направлению скорости.

Для регистрации давления в нестационарном случае использовался конденсаторный микрофон МК-5, включенный в плечо моста, собранного по схеме двухтактного генератора на двойном триоде 6Н1П (рис.1,г). Колебательный контур генератора, состоящий из последовательно соединенных индуктивностей L_1 , L_2 и емкостей микрофона C_M , C_3 и C_4 , включен между сетками триодов. Внутренние сопротивления триодов и сопротивление R_I в анодной цепи образуют мост, в диагональ которого включен осциллограф. При отсутствии сигнала давления оба контура настроены на одну частоту (настройка ведется емкостью C_3).

Сигнал давления, воспринимаемый насадкой, передается на мембрану микрофона и вызывает изменение C_M , что приводит к разбалансу моста и появлению сигнала на осциллографе. Для повышения чувствительности схемы необходимо, чтобы емкость C_M была больше емкости монтажа, емкости подсоединяющего кабеля и емкостей C_3 и C_4 . Поэтому микрофон необходимо монтировать на панели генератора.

Для измерения скоростного напора в некоторых случаях удобно пользоваться акустическим зондом ЗА-4, особенно там, где невозможно использовать микрофон с измерительной схемой, так как в этом случае трубка полного напора может соединяться с акустическим зондом резиновой трубкой длиной 2,5 м, при этом сохраняется равномерность частотной характеристики до 4000 Гц [4].

Давление у входного отверстия измерительной трубки в общем случае имеет сложную зависимость:

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot f(\text{Re}, \text{grad } p, M, \text{Pr}, \gamma, \bar{v}^2 / v, \lambda / r, tv / r_i, \theta, r_i / r, \dots),$$

где $\text{grad } p$ - градиент давления в окрестности измерительного отверстия; M - число Маха;
 γ - отношение теплоемкостей при постоянных давлении и объеме; \bar{v}^2 / v - интенсивность турбулентности свободного потока; λ / r - число Кнудсена, характеризующее отношение свободного пути пробега молекул к радиусу датчика и учитывающее эффект скольжения;
 tv / r_i - отношение времени релаксации газа к характерному времени движения молекул газа в окрестности измерительного отверстия; θ - угол атаки; r_i / r - отношение радиуса измерительного отверстия к наружному радиусу трубки.

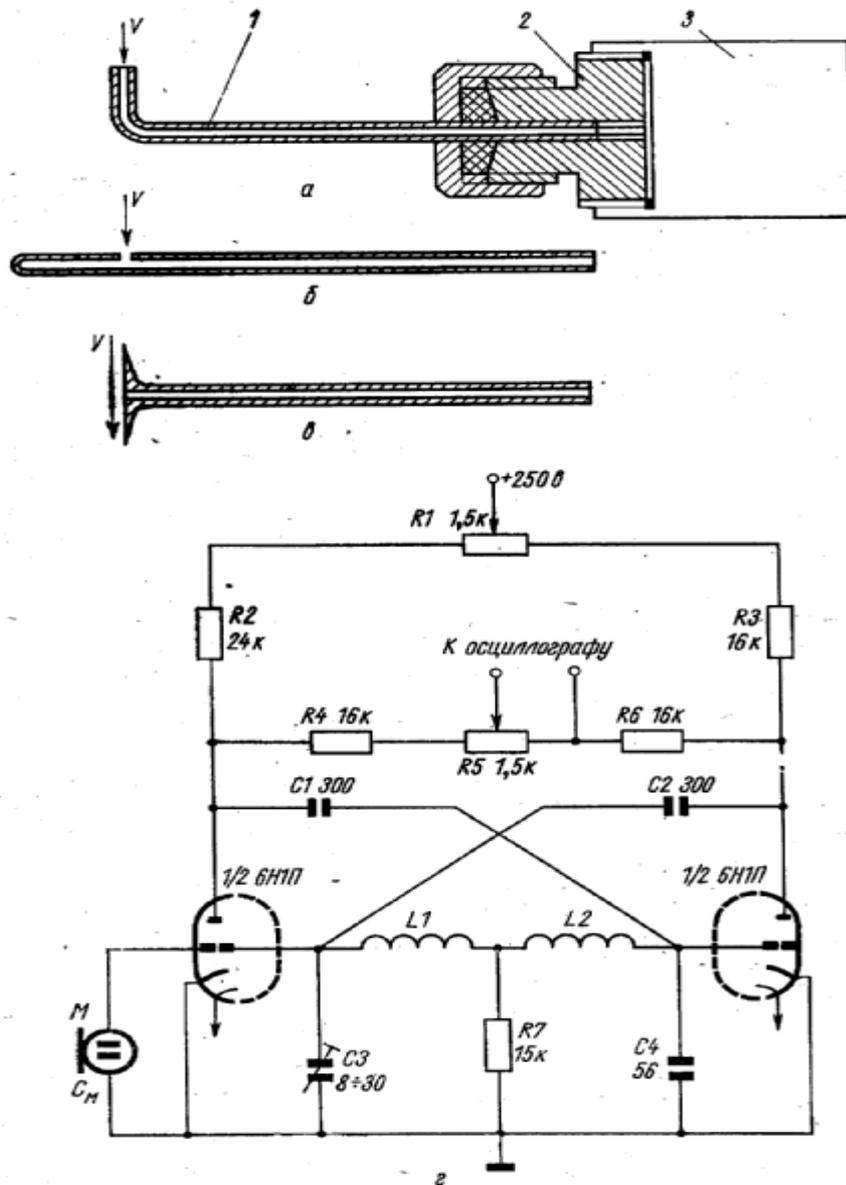


Рис. 1. Измерительные насадки полного (а, б) и статического (в) давлений и схема двухтактного генератора (г): 1 - насадка; 2 - переходная втулка; 3- микрофон.

Для нестационарных датчиков следует добавить зависимость давления от скорости прохождения датчиком потока плазмы, от внутреннего радиуса трубки и ее длины, а также от объема, образующегося между вставкой 2 (рис.1,а) и подвижной мембраной микрофона. Данная зависимость частично учитывает (через определяющие критерии) сильную неизотермичность плазмы в пограничном слое у входного отверстия насадки. Однако, измерения в струе дугового плазмотрона с помощью дисковой насадки (рис.2) показали, что влияние неизотермичности на измеряемое давление не превышает погрешности, обусловленной измерительной схемой, и составляет не более $\pm 5\%$. Эта величина хорошо согласуется с данными работы [3], что позволяет в дальнейшем оперировать соотношениями для изотермического случая.

Рассмотрим погрешности измерений давления при скорости потока значительно ниже скорости звука, когда $M \ll 1$ и атмосферном давлении, когда скольжение газа не существенно.

Влияние инерционности датчика (амплитудное и фазовое искажение сигнала). При прохождении измерительной трубки через поток плазмы на ее входе возникает переменное давление, которое передается мембране микрофона. Выходной сигнал будет зависеть от скорости изменения давления и демпфирования, которое определяется в основном размерами измерительной трубки.

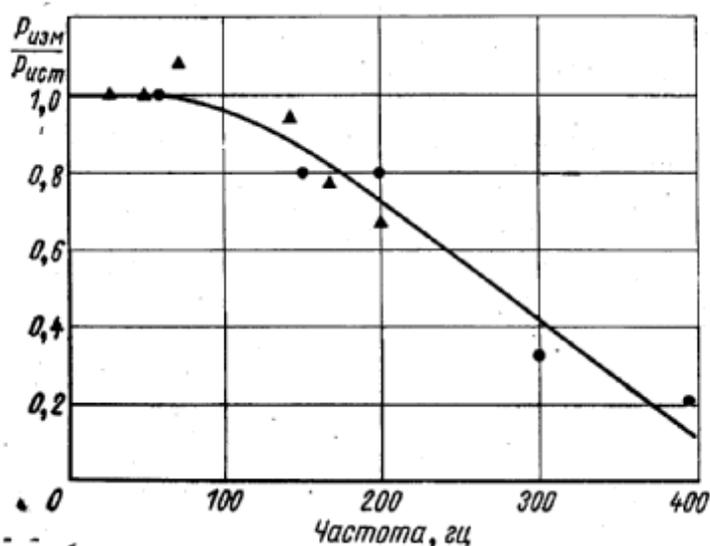


Рис. 2. Частотная характеристика измерительной системы:

◆ —измерения в пульсирующей струе воздуха; • —измерения в звуковом поле колеблющегося диффузора.

Время пребывания датчика в плазме должно быть достаточно малым, чтобы обеспечить сохранность измерительной трубки, и достаточно продолжительным, чтобы обеспечить неискаженную регистрацию давления.

Амплитудные и фазовые искажения сигнала давления подробно рассмотрены в работах [3,4]. Установлено оптимальное соотношение между внутренним диаметром измерительной трубки и зазором h , образующимся между вставкой 2 (рис.1) и мембраной микрофона 3. Оптимальное значение $h = 0,025$ мм получено теоретически из условий изоэнтропийного

сжатия газа [3]. Приведены и частотные зависимости измеряемого давления для различных диаметров измерительной трубки и зазора А.

В работе [3] подробно рассмотрено влияние резонансной частоты датчика на точность измерений. Установлено, что заполнение измерительной трубки гелием сдвигает собственную частоту системы в область больших частот более чем в 2 раза, что значительно расширяет возможные пределы измерений при импульсном давлении.

Для определения частотной характеристики измерительной системы в настоящей работе снималась зависимость отношения измеренного импульса давления к истинному от частоты измерением в струе воздуха, которая прерывалась вращающимся диском со щелью, и в звуковом поле колеблющегося диффузора. В первом случае истинное давление определялось подключенным к измерительной трубке микроманометром, а во втором — измерением амплитуды звукового давления микрофоном без трубки. Как видно из рис. 4.10, экспериментальные точки двух измерений хорошо совпадают.

При частоте 50 гц наблюдается спад измеренного сигнала давления, усиливающийся с увеличением частоты. При измерениях в плазме частота изменения сигнала давления составила не более 30 гц, что обеспечило неискаженное воспроизведение изменения давления на входе измерительной трубки.

Влияние вязкости газа при малых Re. Соотношение (1), связывающее давление и скорость газа в окрестности измерительного отверстия трубки полного напора, получено из решения уравнения Навье - Стокса в пограничном слое без учета вязкости. При некоторых температурах (для аргоновой плазмы при $T \sim 10^4 \text{K}$) вязкость плазмы более чем на порядок превышает вязкость холодного неионизованного газа, и при достаточно малой скорости течения силы, обусловленные вязкостью, становятся сравнимыми, а в некоторых случаях и больше инерционных ($Re < 1$), поэтому их необходимо учитывать. Впервые это установил экспериментально Баркер. Хоманн, решая уравнение Навье - Стокса, учел влияние толщины пограничного слоя при $Re < 100$, сравнимой с радиусом цилиндра, и получил выражение

$$\frac{p - p_0}{0,5 \rho \cdot v^2} = 1 + \frac{4}{Re + 0,457 \sqrt{Re}} = C. \quad (2)$$

Эта зависимость приведена на рис.3 (кривая 1). Экспериментальные точки, полученные Хоманном для цилиндров с внешними диаметрами 1; 1,377 и 2 см и внутренними 0,1 и 0,2 см, хорошо совпадают с теоретической кривой. Данные других авторов значительно отличаются от теории. Это, по-видимому, связано с тем, что при выводе зависимости (2) не учитывалось влияние размеров измерительного отверстия.

С увеличением отношения d_i/d кривые смещаются в область малых чисел Re. Однако определенную зависимость установить не удастся, поэтому необходимы дополнительные тщательные эксперименты, которые позволят уточнить приведенные кривые.

Для определения поправочной кривой к давлению, соответствующей условиям в плазме, авторами настоящей книги измерялся динамический напор в факеле высокочастотной индукционной горелки и в каналовой дуге. Коэффициент C в индукционной плазме определялся сравнением средних значений скоростных напоров, измеренного трубкой Пито, вычисленного по расходу аргона и распределению температуры по сечению факела.

В каналовой дуге величина C определялась сравнением давлений, измеренных трубками разных диаметров. При вычислении Re характерным размером считался радиус насадки, а плотность и вязкость брали по температуре невозмущенного потока плазмы. Ввиду того что в периферийной части дуга неравновесна, значения C вычислялись для осевой части дуги.

Полученные результаты (рис.3) хорошо согласуются с измерениями, проведенными в факеле индукционной горелки, и с данными Шермана, но несколько сдвинуты в область малых чисел Re относительно теоретической кривой. Измеренные значения коэффициента C использовались при вычислении скорости течения плазмы в каналовой дуге [4] и в струе индукционной горелки.

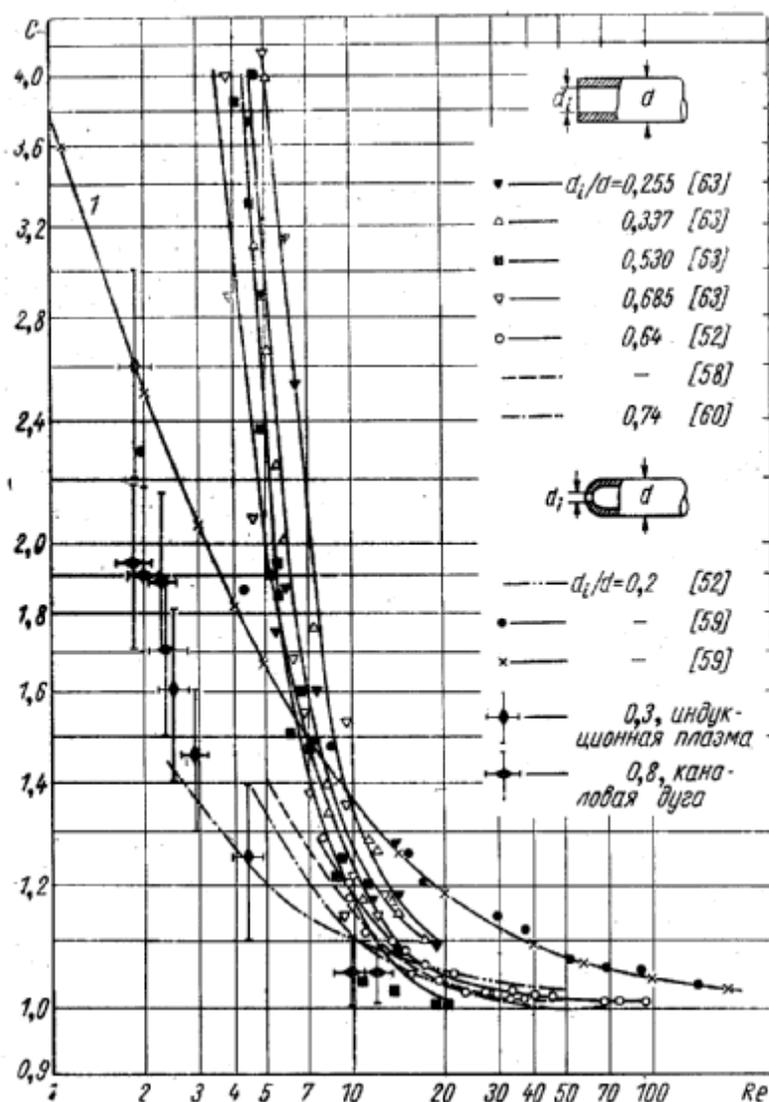


Рис. 3 Зависимость коэффициента C от Re для насадок с плоским и полусферическим концами.

Влияние градиента давления. Как установлено в работах [3, 4], при измерении в потоке с поперечным градиентом давления происходит смещение эффективного центра трубки полного напора относительно ее геометрической оси в сторону больших давлений. В работе [3] оценено влияние смещения эффективного центра на измеряемое давление путем анализа уравнения Навье - Стокса. В результате получено выражение

$$\frac{\delta}{d} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{d \operatorname{grad} p}{p + \delta \operatorname{grad} p}} \quad (3)$$

где δ - смещение эффективного центра трубки относительно ее геометрической оси;
 $\operatorname{grad} p$ - градиент скоростного напора в направлении, перпендикулярном движению газа;
 d - диаметр насадки.

Эта зависимость (рис.4) удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными работы [3], хотя при ее выводе не учитывалось влияние измерительного отверстия в трубке полного напора на давление в точке торможения. В работе [3] из измерений в пограничном слое установлено, что $\delta/d = 0,15 \div 0,18$. Учитывая влияние измерительного отверстия, в работе [4] экспериментально получено соотношение $\delta/d = 0,131 \div 0,082 d_i/d$ при $d \operatorname{grad} p/p = 0,1 \div 1,2$. При малых числах Re смещение эффективного центра трубки полного напора увеличивается. Однако это пока еще никем не изучено.

На смещении эффективного центра сказывается поперечное движение трубки полного напора. Однако это влияние знакопеременное, так как при входе трубки в поток смещение увеличивает измеряемое давление, а при выходе уменьшает. Следовательно, распределение давления по сечению потока окажется несимметричным, что довольно просто можно учесть.

Влияние турбулентности потока. Турбулентность в потоке газа может значительно увеличить давление, измеряемое трубкой полного напора. Голдстейн [3] на основе теории изотропной турбулентности получил выражения для измеренных полного

$$p = p_0 + \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho \overline{(v')^2}$$

и статических давлений

$$p_0^* = p_0 + \frac{1}{6} \rho \overline{(v')^2}$$

Фейдж на основе измерений, проведенных в работе [3], также вывел формулу для статического давления

$$p_0^* = p_0 + \frac{1}{4} \rho \overline{(v')^2}$$

Турбулентность увеличивает не только полное давление, но и статическое. Поэтому при измерениях в турбулентных потоках, которые наблюдаются в периферийных областях дуг и

плазменных струй, где степень турбулентности потока близка к единице, погрешность измерений может достигать $\pm 100\%$.

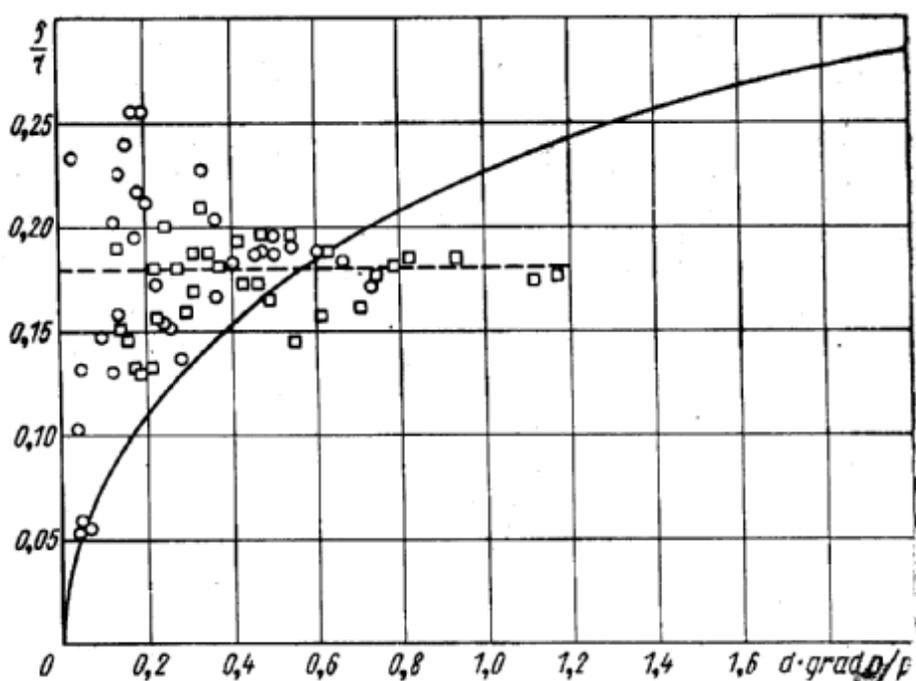


Рис. 4. Смещение эффективного центра трубки полного напора в зависимости от поперечного градиента давления:

◆ и ● - измерения при скорости потока плазмы 18,3 и 22,9 м/сек соответственно; - - - - - результирующая прямая по данным работы[3]; — зависимость(3), полученная из решения уравнения Навье - Стокса.

Как указывалось выше, скорость течения плазмы измерялась в струях, получаемых с помощью индукционной горелки и дугового плазмотрона, а также в канальной дуге. Некоторые результаты измерений скорости приведены в работах [3,4].

На рис.4 приведено наиболее характерное распределение давления, позволяющее показать систематические ошибки, возникающие при измерении скорости течения плазмы, трубкой полного напора. Данные получены для катодной области канальной дуги (на расстоянии 8 мм от катода, расход аргона 1,25 г/сек), характеризующейся большими градиентами давления.

На этом же рисунке приведены систематические погрешности, обусловленные смещением эффективного центра трубки полного напора (Δp_δ) и влиянием сил вязкости (Δp_{Re}). Смещение эффективного центра трубки полного напора в области максимального поперечного градиента давления вызывает увеличение измеренного давления по сравнению с истинным на 30%. Погрешность Δp_{Re} , характеризующая влияние сил вязкости при малых числах Re , обусловлена относительно высокой температурой катодной области дуги и составляет $\pm 10-15\%$. Следовательно, при измерении в потоках плазмы с большими градиентами

давления, высокой температурой и малой скоростью течения газа погрешность измерений становится значительной.

При измерении в потоках с большой скоростью течения, что характерно для плазменных струй дуговых плазмотронов, погрешности, обусловленные проявлением сил вязкости, становятся пренебрежимо малыми [3,4]. Однако погрешности, обусловленные смещением эффективного центра трубки полного напора, остаются, хотя и несколько уменьшаются. Статическое давление в струе плазмы по измерениям дисковой насадкой оказалось равным нулю. Следовательно, измеренное давление в струе плазмы в зонах, близких к оси, является динамическим напором и позволяет прямо по формуле (1) вычислить скорость течения газа. В периферийных зонах струи плазмы, где происходит смещение плазмообразующего газа с окружающим воздухом, возникает турбулентность, создающая дополнительное давление, и поэтому точность определения скорости течения плазмы снижается.

Измерение скорости течения плазмы по реакции поперечно обтекаемого цилиндра. Этот метод аналогичен методу измерения скорости с использованием плохо обтекаемого тела (диска). Суть метода заключается в следующем: тугоплавкий цилиндр помещают перпендикулярно к потоку плазмы и по реакции, которую испытывает цилиндр, определяют силу или давление, действующее на него. Зная давление p , можно вычислить скорость течения плазмы из выражения $p = C_d (\rho v^2 / 2)$. Коэффициент C_d зависит от условий обтекания цилиндра.

В работе [3] для вычисления скорости течения плазмы использовались значения лобового сопротивления C_d , полученные из измерений в газовых потоках при низких температурах по данным работы [4], а в работе [2] коэффициент лобового сопротивления принимался равным 1,2 по данным работы [3].

Непосредственные измерения C_d в высокотемпературных потоках отсутствуют. В связи с этим была предпринята попытка провести такие измерения. Для измерений использовался дуговой плазмотрон с внутренним диаметром сопла 7 мм (подробно исследование характеристик плазменной струи описано в работе [3]). Для регистрации отклонения цилиндра под действием плазменной струи использовался конденсаторный микрофон, аналогичный по конструкции микрофону МК-5 (рис.1). Диаметр цилиндра составлял 0,6 мм (вольфрам) или 0,82 мм (кварц). Для придания жесткости и улучшения частотной характеристики цилиндр с микрофоном соединялся с помощью легкого титанового стержня.

Конструкция микрофона позволяла регулировать чувствительность датчика путем изменения расстояния между мембраной и неподвижным электродом. Изменение емкости микрофона регистрировалось с помощью схемы, приведенной на рис.1, и осциллографа. Датчик тарировался на известном потоке воздуха и путем подвешивания образцовых гирь к цилиндру.

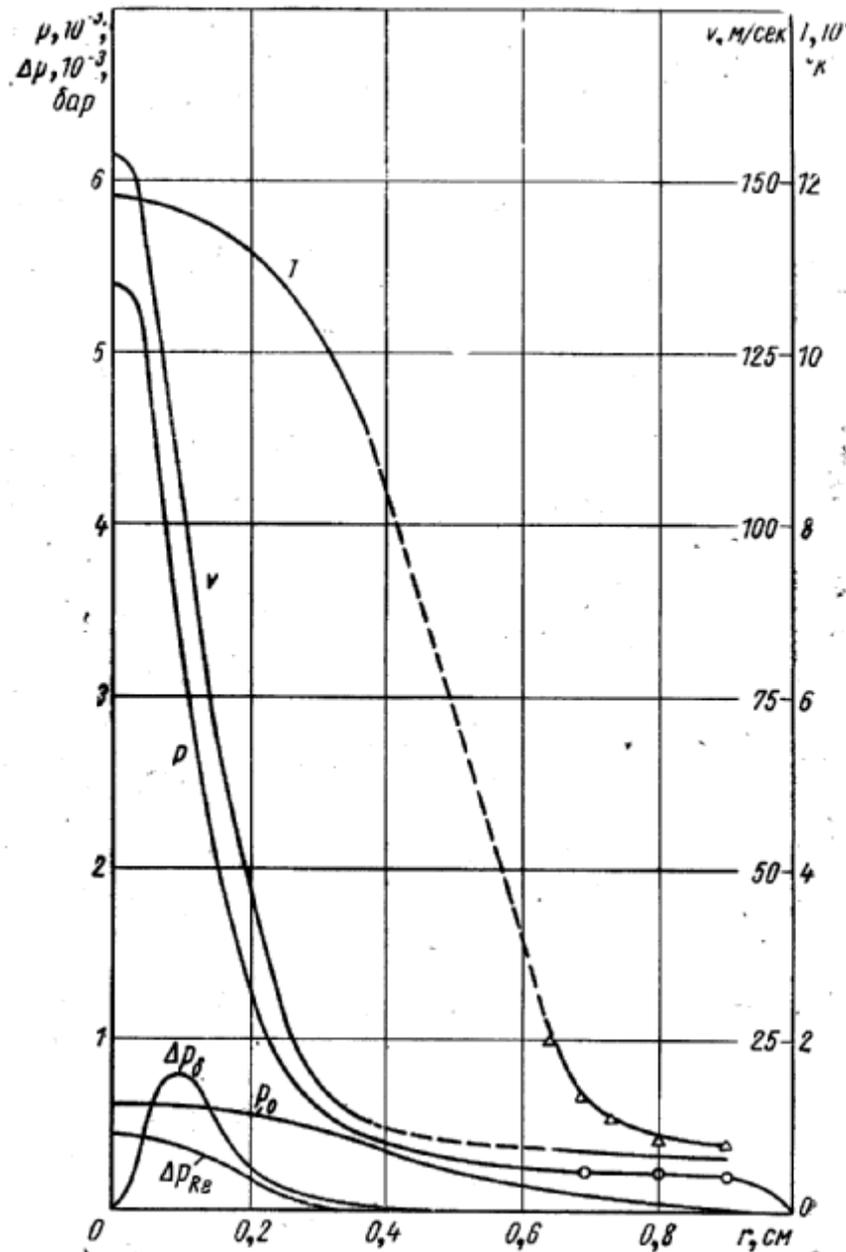


Рис. 5. Радиальные распределения температуры (T), полного (p) и избыточного статического (p_0) давлений, скорости (v), систематических погрешностей (Δp_δ) и (Δp_{R0}) Δ — температура, измеренная термопарой хромель—алюмель; \circ — давление измеренное стационарной трубкой полного напора.

Для измерения давления, действующего на поперечно обтекаемый цилиндр, датчик «простреливался» через плазменную струю с помощью маятникового устройства. Полученное поперечное распределение давления пересчитывалось в радиальное по методу Пирса [3]. Скоростной напор плазменной струи измерялся трубкой полного напора (рис.5). Сравнивая давление, измеренное обтекаемым цилиндром, и скоростной напор, вычисляли коэффициент лобового сопротивления C_d .

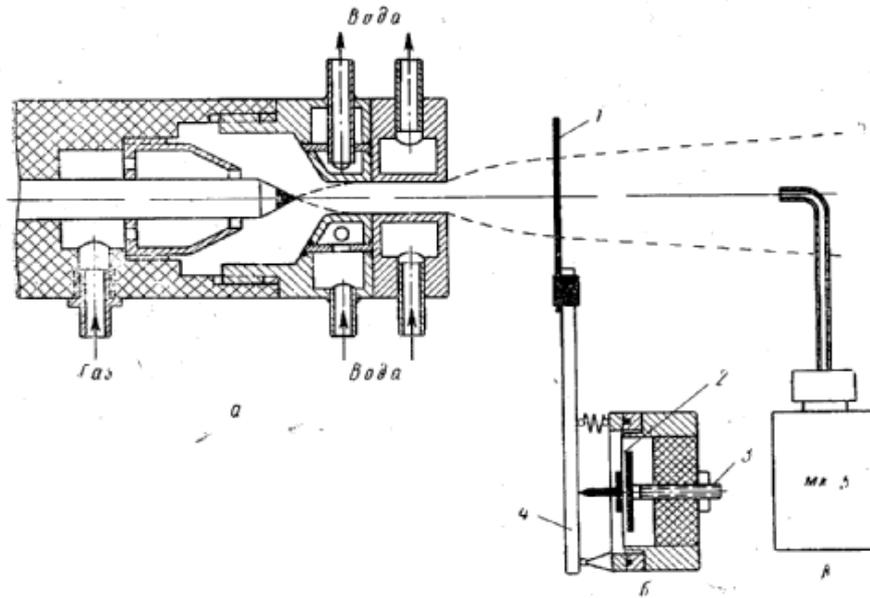
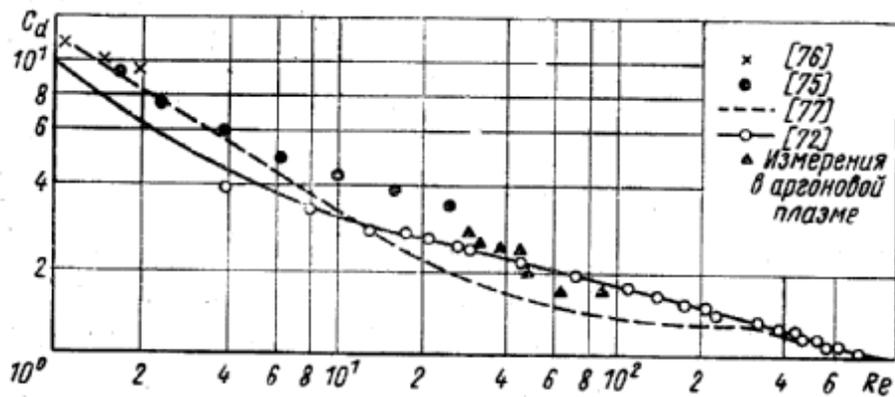


Рис. 5. Схема измерения скорости течения плазмы по реакции поперечно обтекаемого цилиндра: *a* — плазмотрон; *б* — датчик с цилиндром; *в* — трубка полного напора; *1* — поперечно обтекаемый цилиндр; *2* — мембрана; *3* — неподвижный электрод; *4* — титановый стержень.;

Полученные значения (рис.6) хорошо согласуются с вычисленными для изотермических потоков и измеренными в холодных потоках газа [3,4]. При этом следует отметить, что числа Re вычисляли по диаметру цилиндра, а за определяющую температуру, по которой выбирали теплофизические свойства аргона, принимали температуру потока.



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 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.

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 ³ /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.

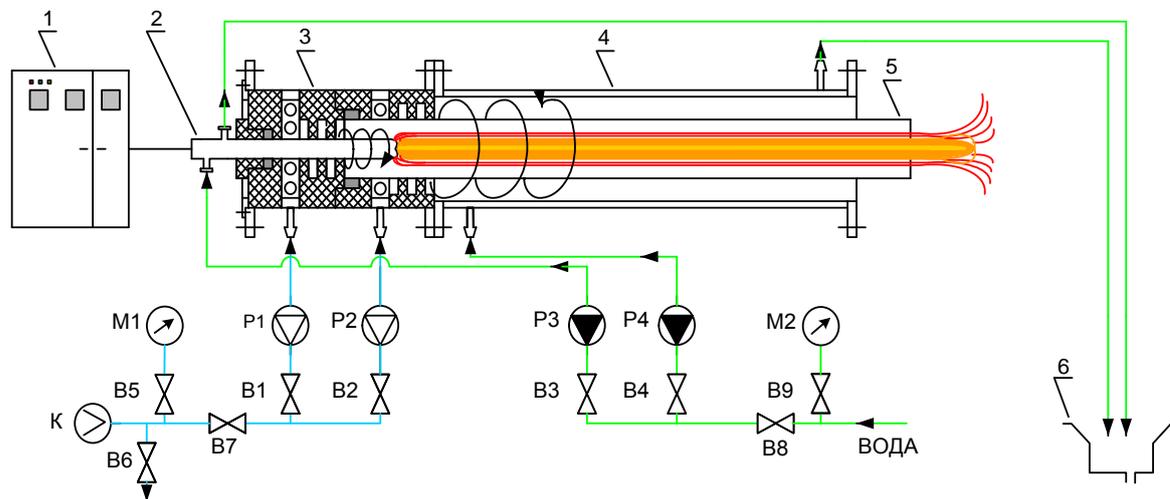


Рис.1. Схема плазменной установки на базе ВЧ факельного плазмотрона.

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

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.

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).

4 ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ РАБОТЕ НА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ 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 избежании 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 или 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 б.

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 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 “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 – 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 КПД ВЧ факельного плазмотрона 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 максимальным КПД. Сделать выводы.

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ:

1 Мощность, потребляемая ВЧ генератором от сети:

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

где J_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]; Δt_a - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [$^{\circ}$ С]; 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]; Δt_c - разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [$^{\circ}$ С]; C_p - теплоемкость воды, [кКал/кг].

4 Мощность, выделяемая на электроде:

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

где $\dot{m}_{эл}$ - 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:

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

где $\dot{m}_{кп}$ - 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:

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

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.

Таблица 2. Начальные параметры

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

Таблица 3

№ п/п	$J_a,$ А	$J_c,$ А	$U_a,$ кВ	$Q_{Г},$ г/с	$Q_a,$ г/с	$\Delta t_a,$ $^{\circ}C$	$Q_{Lc},$ г/с	$\Delta t_{Lc},$ $^{\circ}C$	$Q_{эл},$ г/с	$\Delta t_{эл},$ $^{\circ}C$	$Q_{кп},$ г/с	$\Delta t_{кп},$ $^{\circ}C$	$Q_{pp},$ г/с	$\Delta t_{pp},$ $^{\circ}C$
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
M_{cp}														
ΔM														

Таблица 4

№ п/п	$P_o,$ кВт	$P_a,$ кВт	$P_{Lc},$ кВт	$P_{эл},$ кВт	$P_{кп},$ кВт	$P_{pp},$ кВт	$P_{пол},$ кВт	$\Sigma P_i,$ кВт	$\eta_{пл},$ %	$H_T,$ кДж/кг	$T_{стр},$ К
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
M_{cp}											
ΔM											

7 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 КПД ВЧ факельного плазмотрона 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.

8 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

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

2 Определить погрешности отдельных измерений:

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

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.

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.

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

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

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 Вычислить границы доверительного интервала:

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

8 Вычислить относительную погрешность результата серии измерений:

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

9 Построить по итогам проведенной обработки результатов измерений графические зависимости скорости 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 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.).