

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский)
федеральный университет"
Набережночелнинский институт (филиал)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВОГО
ПЛАЗМОТРОНА**
Учебно-методическое пособие

Набережные Челны
2021

УДК 621.36: 621.7/9

Печатается по рекомендации УМК отделения информационных технологий и энергетических систем НЧИ КФУ

Рецензент: доцент, к.т.н. Ф.Ф. Рамазанов

Тазмеев Г.Х., Тазмеев Х.К. Исследование характеристик дугового плазмотрона: учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по дисциплине «Плазменные системы в нанотехнологии». - Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2021 – 16 с.

Учебно-методическое пособие предназначено в помощь студентам для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Плазменные системы в нанотехнологии».

© Набережночелнинский институт КФУ, 2021

Цель работы: получение и исследование электрических и тепловых характеристик дугового плазмотрона с секционированной межэлектродной вставкой.

Теоретические основы работы.

Дуговым разрядом или электрической дугой принято называть газовый разряд при относительно большой силе тока и низком напряжении горения. Его характерным признаком является малое катодное падение потенциала U_k . По длине дуги обычно выделяют три зоны: области катодного I и анодного II падений потенциала и положительный столб III (рис.1). Такое разделение обусловлено различием физических процессов, протекающих в этих областях.

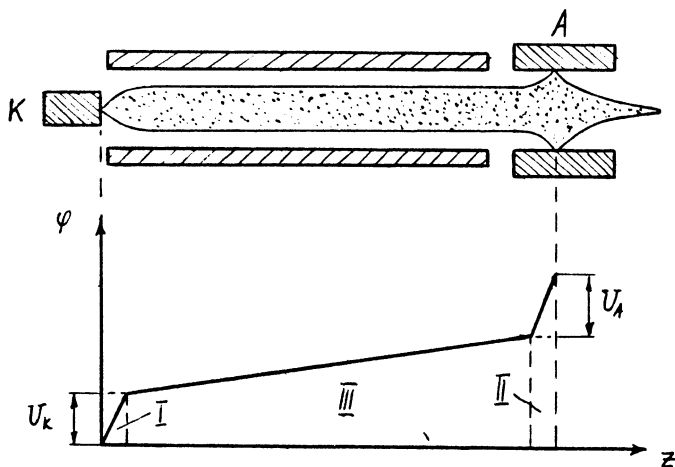


Рис. 1. Схема цилиндрической дуги стабилизированной стенкой и распределение потенциала φ вдоль дуги.

Протяжённость областей I и II малы по сравнению с длиной положительного столба III. В большинстве случаев протяжённость области катодного падения потенциала не превышает средней длины свободного пробега электрона, а протяжённость области анодного падения потенциала составляет несколько длин свободного пробега электрона. Самой протяжённой является зона положительного столба,

следовательно, основная масса газа взаимодействует с положительным столбом дуги. Поэтому свойства дуговой плазмы определяются главным образом свойствами положительного столба.

Область положительного столба дуги представляет собой квазинейтральную термическую плазму, процессы ионизации молекул и атомов в которой уравниваются рекомбинацией и радиальной диффузией заряженных частиц. Вследствие большого различия по массе обмен энергиями между электронами и тяжёлыми частицами происходит относительно медленно. Поэтому температура электронного газа отличается от температуры тяжёлых компонентов плазмы (рис.2). Как следует из эксперимента, говорить о единой температуре плазмы можно только при относительно высоких давлениях, близких к атмосферному.

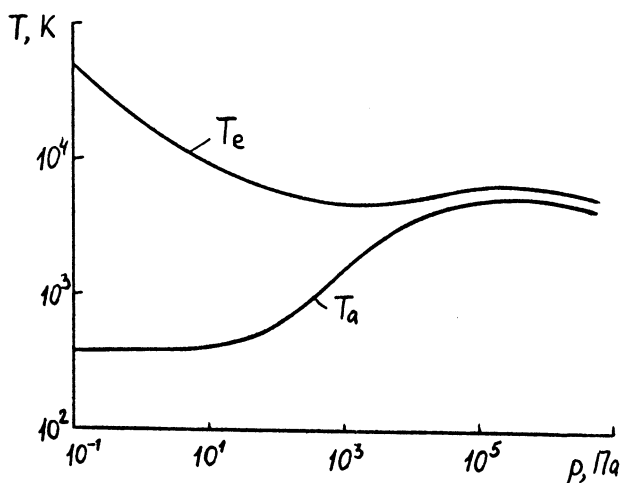


Рис. 2. Зависимость температуры электронов T_e и температуры газа T_a от давления p в ртутном разряде.

Известно, что температура в столбе дуги повышается с увеличением плотности тока. Поскольку в свободно горящих дугах с увеличением подводимой мощности растёт диаметр столба дуги, а плотность тока при этом остаётся почти постоянной, в них трудно получить высокие температуры. Поэтому с точки зрения электроду-

гового нагрева газов наибольший интерес представляют стабилизированные дуги, в которых размеры положительного столба ограничены. На практике применяются различные способы стабилизации дуги: твёрдой стенкой, газовым вихрем, магнитным полем и т.д. В открытых дугах температура не превышает ~ 6...7 тысяч градусов, а в стабилизированных дугах можно достичь температур до несколько десятков тысяч градусов. Кроме того, высокая плотность энергии, выделяемой в столбе дуги, позволяет передавать нагреваемому газу большое количество тепла в течение относительно короткого времени. Такие достоинства стабилизированных дуг, а также широкие возможности управления режимом горения позволяют создавать на их основе множество разнообразных электродуговых устройств, называемых **плазмотронами**.

Процессы, происходящие в плазмотронах, очень сложные и многообразные. В положительном столбе дуги протекают такие процессы, как термическая диссоциация молекул, ионизация нейтральных частиц электронным ударом и световыми квантами, рекомбинация электронов и ионов в тройных столкновениях, фото-рекомбинация с излучением квантов света, взаимная диффузия заряженных частиц и нейтральных атомов и молекул, а также взаимодействие столба дуги с собственным магнитным полем, плазмообразующим газом, со стенкой дуговой камеры и т.д. В областях катодного и анодного падения потенциалов процессы осложняются дополнительно явлениями эмиссии электронов с поверхности электродов, взаимодействием частиц и световых квантов с поверхностью катода и анода, а также термическим разрушением материала поверхности электродов. В связи с этим теоретическое исследование процессов в электрической дуге представляет собой очень сложную и трудоемкую задачу. Поэтому физические процессы в плазмотронах ещё полностью не изучены. В настоящее время наиболее успешно развиваются экспериментальные методы исследования. В данной работе предлагается ознакомиться с наиболее простыми экспериментальными методами исследования стабилизированной электрической дуги.

Распределение потенциала и напряженности электрического поля.

Как показывают многочисленные исследования, имеется связь между потенциалами стенки дуговой камеры плазматрона и дуги. В частности, это подтверждается существованием несамостоятельного разряда между столбом дуги и секциями дугового канала (2). Носители тока, поддерживающие несамостоятельный разряд, образуются в относительно холодном пристеночном слое газа за счёт ионизации нейтральных атомов электронным ударом и световыми квантами, а также за счёт проникновения в пристеночный слой заряженных частиц из столба дуги и со стенки дуговой камеры. Несамостоятельный разряд выравнивает потенциалы секций стенки и дуги. Поскольку ток несамостоятельного разряда мал и электропроводность материала стенки велика, то потенциал секции стенки ϕ можно считать постоянным. Таким образом, секционированная стенка позволяет изучить распределение потенциалов вдоль столба дуги. На рис. 3 представлена схема плазматрона с секционированным каналом.

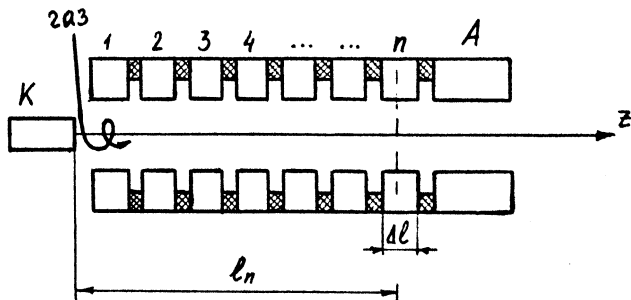


Рис. 3. Схема плазматрона с секционированным каналом.

Как следует из опытов, при достаточно больших расходах газа, потенциал секции равен потенциалу дуги в среднем сечении секции, т.е. середина секции (по оси z) принимает потенциал, равный потенциалу столба дуги в данном сечении. Это обстоятельство сильно упрощает задачу исследования распределения потенциалов. На опыте измеряются потенциалы секций и строится график ϕ от z . Затем по

наклону кривой $\varphi(z)$ определяется напряжённость электрического поля (рис.4).

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \varphi}{\Delta z} . \quad (1)$$

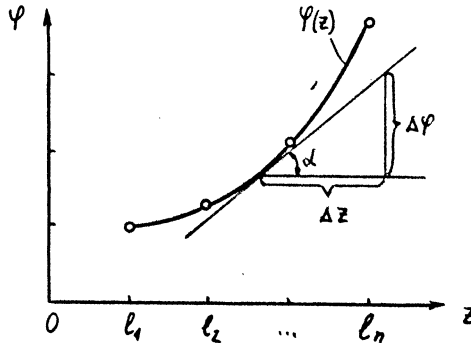


Рис. 4. Распределение потенциала вдоль дуги.

Если угол наклона кривой $\varphi(z)$ постоянен, это означает, что напряжённость электрического поля не меняется вдоль столба дуги. Такое распределение E от z наблюдается на выходном конце каналов длинных плазмотронов при малых расходах газа G и небольшом токе I . При больших расходах газа напряжённость электрического поля E с увеличением z или остаётся постоянной по всей длине канала или растёт в зависимости от рода газа и тока. Следует отметить, что напряжённость электрического поля E зависит от множества факторов: диаметра качала d , рода газа, тока, расхода газа, условий течения, давления и т.д. На рис. 5 приведён график E от z для воздушной дуги при малом расходе газа. Высокое значение E около катода объясняется тем, что проводящая область здесь является узкой и расширяется по мере удаления от катода. С расширением проводящего канала уменьшается плотность тока, соответственно уменьшается и напряжённость электрического поля (вспомните закон Ома в дифференциальной форме).

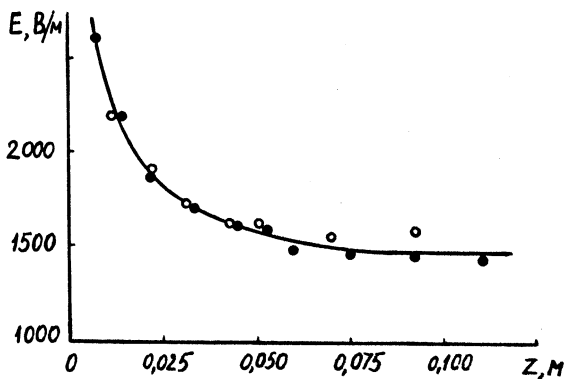


Рис. 5. Распределение напряжённости электрического поля по длине дуги в воздухе: $d = 0,01$ м, $\ell = 0,13$ м, $G = 4 \cdot 10^{-4}$ кг·с⁻¹, $I = 90$ А (°) и $I = 140 \dots 220$ А (●).

Распределение тепловых потерь через стенку дуговой камеры.

Стенки дуговой камеры находятся под воздействием больших тепловых потоков и поэтому успешное решение задачи повышения эффективности работы плазматронов тесно связано с изучением теплообмена дуги со стенками. Тепло передаётся к стенкам из плазмы дуги за счёт теплопроводности, конвекции и излучения, а к катоду и аноду - дополнительно заряженными и диссоциированными частицами. При различных условиях преобладающую роль в процессе теплообмена дуги со стенкой играет тот или иной механизм передачи тепла. При малых давлениях, меньше 1 атм., и при давлениях больше 10 атм. преобладает излучение, а при давлениях, близких к атмосферному, существенную роль играет теплопроводность.

Соотношение между потоками тепла, передаваемыми к стенке различными механизмами, сильно зависит и от режима течения газа. На основе анализа многочисленных исследований в (4) построена следующая картина течения газа в плазматроне с подачей газа в начальном сечении дуговой камеры (рис.б). На начальном участке до сечения С, пока тепловой слой 1 не достигает стенки канала, на стенку попадает только энергия излучения. Начиная с сечения С стенки канала воспринимают вместе с излучением и тепловой поток, отводимый от дуги теплопроводностью и конвекцией. В сечении Д

турбулентно-вихревой пограничный слой достигает столба дуги и, начиная с этого сечения основная часть теплового потока переносится конвекцией. 140...220 А (●).

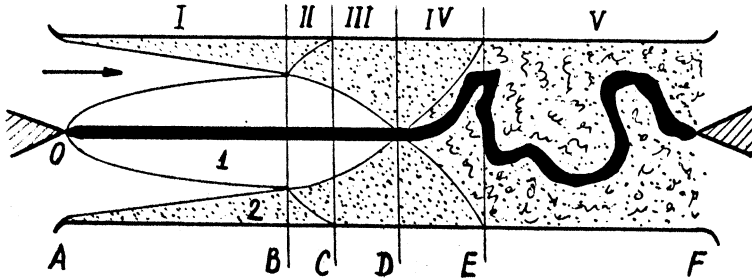


Рис. 6. Схема течения газа в плазмотроне.

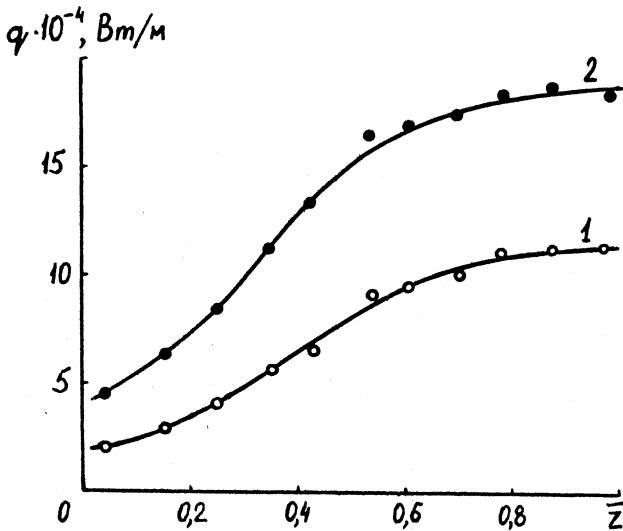


Рис. 7. Распределение потока тепла к стенке дуговой камеры: 1 – 135, 2 – 220 А; $G = 6 \cdot 10^{-4}$ кг·с⁻¹; $d = 0,015$ м, $\ell = 0,196$ м ($\bar{z} = z / \ell$ - относительная координата по оси канала).

На рис. 7 приведено характерное для малых расходов газа распределение тепловых потоков вдоль канала. В случае водоохлаждаемой стенки тепло снимается со стенки проточной водой, т.е. потоки тепла к стенке являются тепловыми потерями, понижающими тепловой КПД плазмотрона. Как видно из рис.7, тепловые потоки к стенке возрастают вдоль канала. Такой характер изменения тепловых потоков удовлетворительно согласуется с рассмотренной выше картиной течения газа.

Расчётные формулы.

Потери тепла через водоохлаждаемые элементы:

через катод и анод

$$Q_k = 4,18m_k(t_k - t_0), \quad Q_A = 4,18m_A(t_A - t_0), \quad (2)$$

через i -ю секцию

$$Q_i = 4,18m_i(t_i - t_0), \quad (3)$$

где m_k, m_A, m_i -массовые расходы воды через катод, анод и секции.

Общие потери тепла

$$Q = Q_A + Q_k + \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (4)$$

Электрическая мощность плазмотрона

$$N = IU \quad (5)$$

Полезная мощность

$$N_p = N - Q \quad (6)$$

Тепловой КПД плазмотрона

$$\eta = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{Q}{IU} \quad (7)$$

Среднемассовая энтальпия струи газа, истекающей из плазмотрона

$$h_c = \frac{IU - Q}{G} \quad (8)$$

Описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка состоит из системы электроснабжения, пневмогидросистемы, измерительных приборов и экспериментальных плазмотронов. Функциональная электрическая схема системы электроснабжения представлена на рис.8.

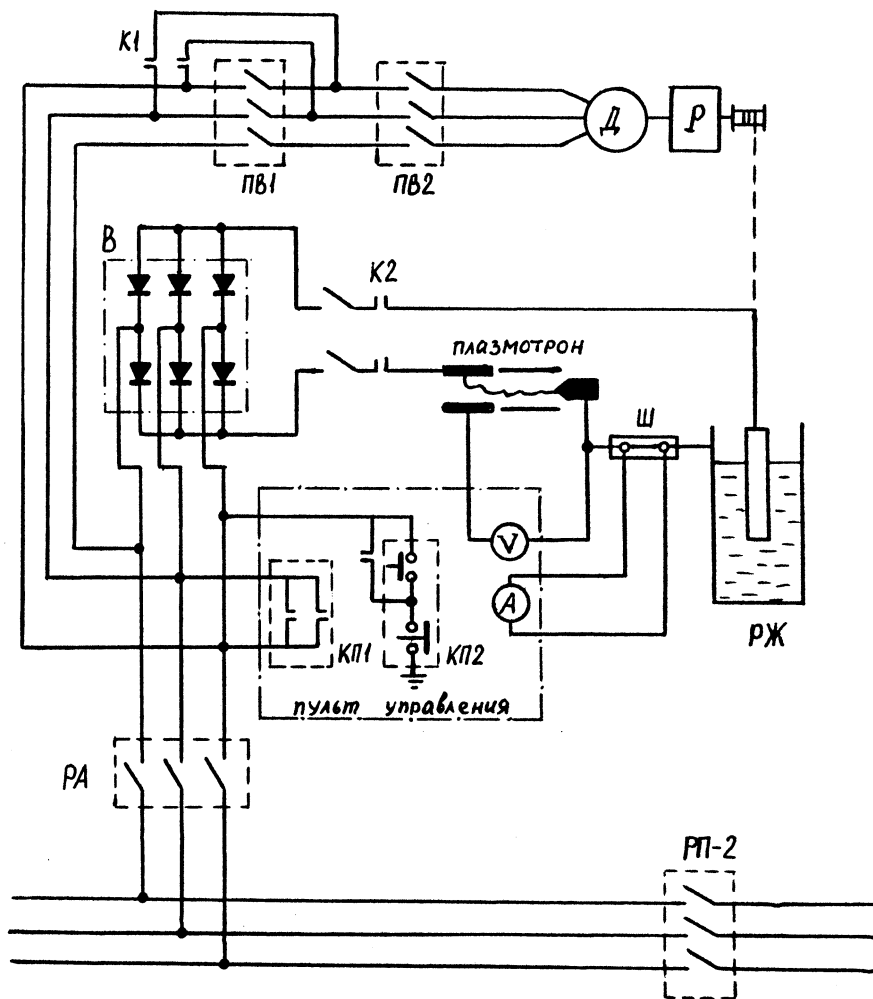


Рис. 8. Схема электрическая функциональная.

Система электроснабжения обеспечивает электрической энергией дуговой плазматрон, измерительные приборы и вспомогательное оборудование. Трёхфазный электрический ток с напряжением 380 В и частотой 50 Гц подаётся на установку от распределительного щита РП-2. Переменный ток подаётся на выпрямитель В, собранный по схеме Ларионова из шести полупроводниковых вентилей типа ВЛ-200. Выпрямитель имеет выходное напряжение 500 В. Ток ограничивается РА расцепителем-автоматом типа АЗ71, который рассчитан на 160 А. Для обеспечения устойчивого горения дуги последовательно с плазматроном включено балластное сопротивление РЖ, представляющее собой жидкостный реостат с подвижным электродом. Изменение уровня погружения подвижного электрода и связанное с этим изменение сопротивления реостата достигается с помощью реверсивного электромеханизма, который состоит из электродвигателя Д и редуктора Р. Дистанционное управление реостатом и включение плазмотрона осуществляется с помощью кнопочных постов КП1 и КП2, установленными на пульте управления. Пакетные выключатели ПВ1 и ПВ2 позволяют менять направление вращения вала электродвигателя путём переключения фазы подаваемого напряжения. Для измерения напряжения и тока дуги используются приборы V и A типа М2016 класса точности 0,2 и шунт Ш на 500 А класса точности 0,5. Приборы U и A также расположены на пульте управления.

На рис. 9 представлена функциональная схема пневмогидросистемы установки. Эта система включает в себя компрессор типа СО-7А, пульты пневматический и гидравлический, регулирующую и запорную трубопроводную арматуру. Компрессор нагнетает воздух давлением до $6 \cdot 10^5$ Н/м². Для очистки воздуха используется фильтр Ф с влагоотделителем. Избыточное давление стравливается через вентиль В₁, установленный на пневмопульте. Расход газа через плазматрон измеряется с помощью ротаметров РС-ЗА, РС-З и образцовых манометров типа МО (100 делений шкалы на $6 \cdot 10^5$ Н/м²). Гидросистема установки предназначена для охлаждения водой жидкостного реостата и плазмотрона. Вода подаётся на гидропульт от водопроводной сети. От гидропульта она через вентили и резиновые шланги подводится к РЖ и плазматрону. В линии охлаждения плазмотрона установлены ртутные термометры с ценой

деления 1°C , необходимые для калориметрических исследований. Из всех узлов установки вода сливается в бак, который подсоединён к водопроводной сети.

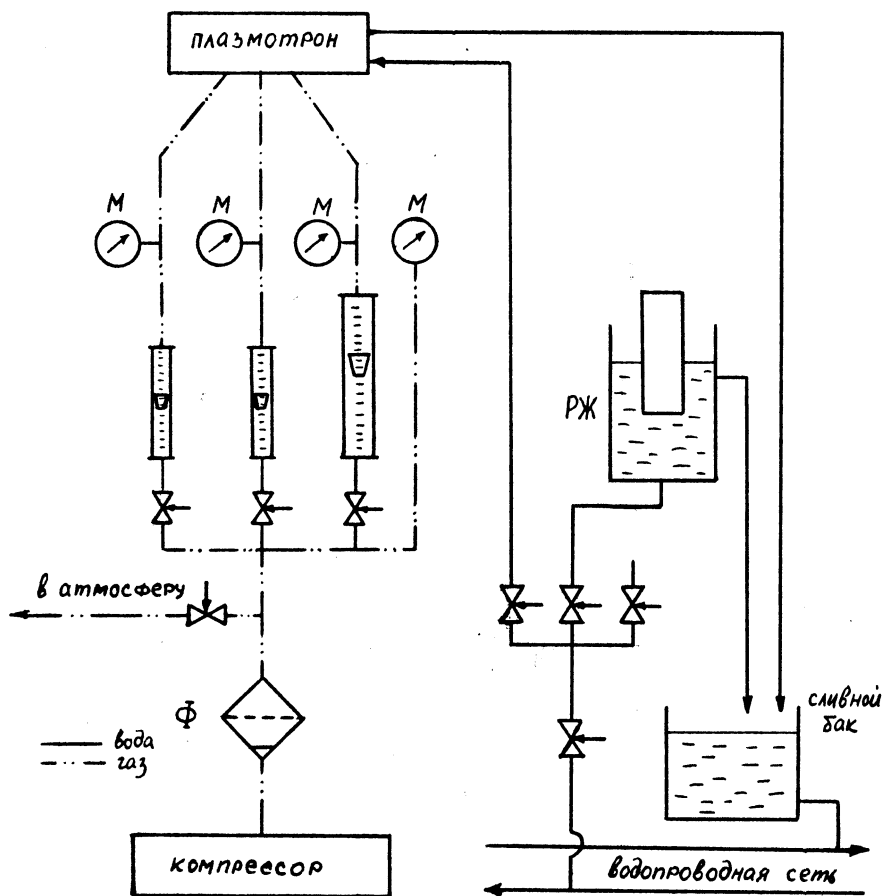


Рис. 9. Пневмо-гидросистема установки.

Экспериментальная установка позволяет исследовать тепловые и электрические характеристики плазматронов различных конструкций.

Конструкция одного из исследуемых плазмотронов представлена на рис. 10.

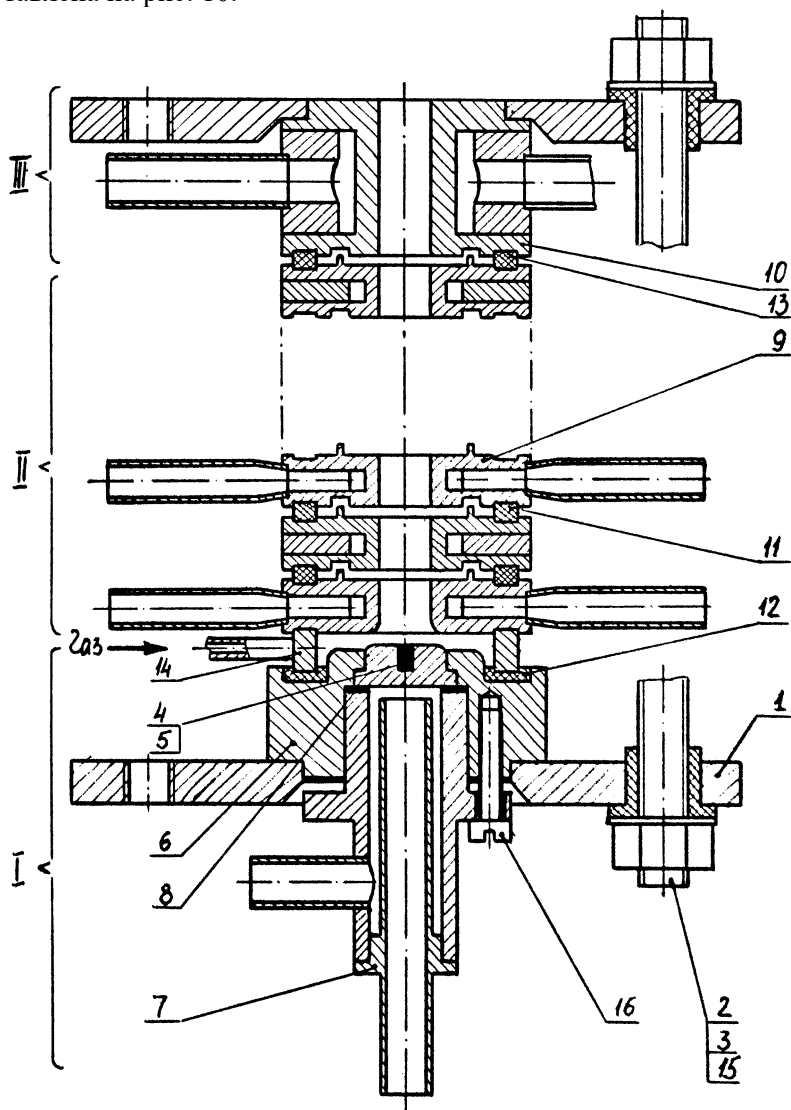


Рис. 10. Плазмотрон.

Плазмотрон - однокамерный, с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ). Он состоит из трёх основных частей: катодного узла I, МЭВ - II и анода - III, стянутыми между собой фланцами 1, шпильками 2 и гайками 3. Катодом служит гафниевый стержень 4, впрессованный в медный катододержатель 5, который в свою очередь вставлен в латунный корпус 6. Катодный узел охлаждается водой. Штуцеры подвода и отвода воды спаяны в один узел 7. Стык между деталями 5, 6 и 7 уплотняется резиновой прокладкой 8, которая прижимается к уплотняемому стыку с помощью винтов 16.

Секции 9 МЭВ выполнены водоохлаждаемыми. Они изолируются друг от друга, а также от катода и анода 10 фторопластовыми прокладками 11, 12 и 13. Материал секций и анода - медь. Около катода смонтировано кольцо закрутки 14, через тангенциальные отверстия которого подаётся плазмообразующий газ.

Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений.

ВНИМАНИЕ! Допуск к работе осуществляется только после инструктажа по технике безопасности.

Порядок работы устанавливается преподавателем на каждый эксперимент отдельно.

В экспериментах измеряются следующие параметры: ток I и напряжение U дуги, расход газа G ; расходы воды m_k, m_A, m_i ; температура воды на входе t_0 и на выходе t_k, t_A, t_i ; охлаждаемых элементов плазмотрона; потенциалы секций φ_i .

Результаты измерений записываются в таблицы (форма таблиц уточняется преподавателем). По расчётным формулам (1)...(7) вычисляются значения основных параметров плазмотрона и дуги. На миллиметровой бумаге строятся графики функций: $U = f(I)$, $N = f(I)$, $\eta = f(I)$, $h_c = f(I)$, $T_c = f(I)$, $E = f(I)$ (в середине последней секции), $\varphi = f(Z)$, $E = f(Z)$ (для различных значений токов).

Результаты работы оформляются в виде отчёта и плакатов. Отчёт содержит реферат по теоретической части, таблицы измерений,

графики, пояснения к измерениям и графикам, выводы, список литературы и оглавление. Количество и содержание плакатов определяется преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Назовите характерные признаки дугового разряда.
2. Каковы свойства положительного столба дуги?
3. Какая максимальная температура в открытой дуге?
4. Каким преимуществом обладают стабилизированные дуги?
5. Опишите конструкцию плазмотрона с МЭВ?
6. Как методом определяется напряженность электрического поля в плазмотроне?
7. Напишите формулу для теплового к.п.д. плазмотрона.

Список использованной литературы.

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2009. – 736 с.
2. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмтроны со стабилизированными электрическими дугами. - Киев: Наукова думка, 1984. - 168 с.
3. Финкельнбург В., Мэккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. - М.: Изд-во иностр. лит., 1961. - 369 с.
4. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. - Новосибирск: Наука, 1975. - 296 с.