

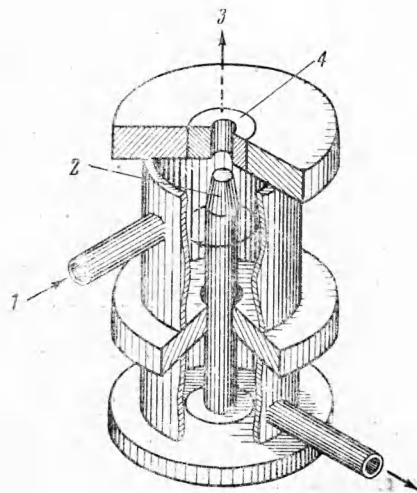
НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ДУГИ, СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ВОДОЙ

Г. Ю. Даутов, М. Ф. Жуков

(Новосибирск)

Плазматроны с водяной стабилизацией дуги являются удобным устройством для исследования свойств электрической дуги и получения высокотемпературного газа. Возможность получения в таких устройствах плазмы с более высокими температурами, чем в плазматронах с воздушной стабилизацией дуги, послужила причиной их исследования в последние годы. Внимание исследователей привлекли и некоторые другие преимущества их.

До последнего времени плазматроны с водяной стабилизацией дуги в основном развивались в направлении повышения температуры плазмы. Длительность работы таких установок незначительна из-за быстрого разрушения электродов; последнее приводит к большому загрязнению плазмы, что также нежелательно.



Фиг. 1

Принципиальная схема существующих плазматронов [1] показана на фиг. 1. Как видно из приведенной схемы, рабочая жидкость — вода — в камеру горения подается через тангенциальное отверстие 1. В результате этого в центральной части рабочей камеры образуется вихрь, стенки которого ограничивают образованную дугой плазму. Дуга горит между центральным катодом 2 и анодом-соплом 4. Основная масса воды, поступающей в камеру, вытекает через кольцевую щель между катодом и диафрагмой и выбрасывается через тангенциальное отверстие наружу. Лишь небольшая ее часть испаряется и нагревается дугой до высокой температуры. В такой установке при напряжении дуги 80 в, силе тока 405 а и тепловом к. п. д. дуги 0.78 достигнута температура плазмы 9700° К; при этом весовая доля продуктов распада воды в плазме составляла 61%. Продолжительность работы плазматрона порядка 10 сек, что объясняется малоподвижностью опорных точек дуги и, следовательно, большими локальными тепловыми потоками в тело электродов, при-

водящими к быстрому их разрушению. Этого можно избежать, если горение дуги вынести с оси на достаточно большой радиус, изменив при этом соответственно и радиус вихря. Кроме того, в целях обеспечения равномерного перемещения опорных точек и положительного столба дуги следует организовать, помимо аэродинамического воздействия, еще и электродинамическое путем наложения соответствующего магнитного поля. В этом случае можно ожидать более равномерного распределения тепловых потоков по поверхности электродов и обеспечения тем самым эффективного их охлаждения. Ниже излагаются результаты исследования горения дуги в плазматроне с большим радиусом вихря и с радиальным магнитным полем.

Наличие магнитного поля и дуги с водяной стабилизацией позволяет подойти к рассмотрению еще одной очень интересной и практически важной задачи, связанной с формой вольт-амперной характеристики. Известно, что статическая вольт-амперная характеристика свободно горящей дуги — падающая. Поэтому, если внешняя характеристика источника питания пологая, то для обеспечения устойчивости горения дуги в электрическую цепь вводится балластное сопротивление [3], забирающее на себя значительную часть мощности источника питания. Естественно, изыскание способов работы без балластного сопротивления представляет большой практический интерес как с точки зрения повышения общего к. п. д. установки, так и упрощения и облегчения всей конструкции установки. На данной установке и были проведены эти исследования.

В настоящее время мало также данных о поведении дуги в атмосфере продуктов диссоциации водяного пара, в силу чего не представляется возможным производить расчеты плазматронов с водяной стабилизацией. Поэтому получение подробных экспериментальных данных является необходимой частью исследования возможностей применения таких установок. Кроме того, на этих установках представится возможным изучить свойства водяного пара при высоких температурах, разобраться с теплообменом на границе раздела плазмы и воды и выяснить ряд других явлений, связанных с физикой электрического разряда в газах.

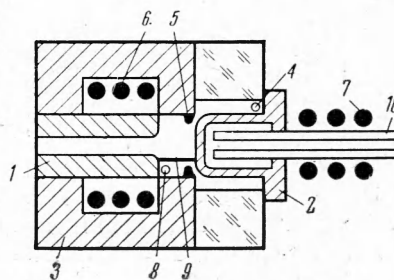
Экспериментальная установка. Экспериментальная установка была оборудована приборами, необходимыми для калориметрического анализа дуги. Расходы воды на охлаждение катода, анода и расход подаваемой в рабочую камеру воды определялись ротаметрами РС-7 и РС-5. Температура воды на входе в плазматрон и на выходе из него определялась ртутными термометрами с точностью до 0.5°C . В плазматрон вода подавалась из технической сети с давлением до 5 ат.

Для определения падения напряжения на дуге и силы тока использовались самопишущие приборы Н-375 класса точности 1.5. Питание плазматрона электроэнергией осуществлялось от генератора постоянного тока П-112, $N = 190 \text{ квт}$, $I = 830 \text{ а}$, $V = 230 \text{ в}$. Для регулирования силы тока использовался водяной реостат, он же служил и балластным сопротивлением.

Плазматрон с радиальным магнитным полем. Были исследованы различные схемы плазматронов с водяной стабилизацией дуги. Эксперименты еще раз подтвердили неэффективность перемещения опорных точек дуги только за счет аэродинамических сил вращающейся внутри вихря плазмы, образующейся из продуктов разложения воды. Поэтому была рассмотрена схема плазматрона с радиальным магнитным полем в межэлектродном промежутке и подачей воды (фиг. 2) через тангенциальное отверстие, расположенное на радиусе, примерно соответствующем заданному наружному радиусу вихря; отвод воды осуществлялся через тангенциальное отверстие, расположенное на периферии рабочей камеры. Такая схема образования вихря позволяла получать устойчивые вихри различных диаметров.

Основными деталями плазматрона являются охлаждаемые медные анод 1 и катод 2, между торцовыми поверхностями которых горит электрическая дуга 9. Вода в рабочую камеру подается через тангенциальное отверстие 8 в магнитопроводе 3 и выбрасывается через тангенциальное отверстие 4 в корпусе рабочей камеры. Внутри корпуса рабочей камеры установлено профилирующее кольцо 5, служащее для получения устойчивого вихря нужного диаметра. Диаметр вихря дополнительно регулировался вентилем, установленным на выходе воды из рабочей камеры. Часть поступающей в камеру воды испаряется, нагревается электрической дугой до высокой температуры и выбрасывается через отверстие в аноде. Радиальное магнитное поле в зоне горения создавалось соленоидом 6 и 7, включенными последовательно с дугой и имеющими встречные магнитные поля. Для усиления и необходимого распределения магнитного поля в межэлектродном промежутке магнитопровод 3 и трубка 10 были изготовлены из мягкого железа. Соленоид 6 изготовлен из изолированной медной трубки, по которой подавалась вода на охлаждение анода. Вода для охлаждения катода подводилась через тангенциальное отверстие в нем.

В проведенных экспериментах диаметр вихря d равнялся 46 мм. Такой относительно большой диаметр был принят, как об этом говорилось выше, для уменьшения местных тепловых потоков за счет увеличения длины пути движения опорных точек за один оборот дуги.



Фиг. 2

Дуга зажигалась при помощи стальной проволоки диаметром 1 мм и вращалась по окружности, близкой к границе вихря. Направления действующих на дугу электродинамических сил и циркуляции воды брались одинаковыми.

Чтобы оценить порядок величин напряженности магнитного поля в межэлектродном промежутке и скорости движения дуги, имевшихся в наших опытах, для расчета приняли упрощенную схему магнитопровода соленоида анода (фиг. 3) и, учитывая особенности конструкции, предполагали, что поле за пределами магнитопровода очень слабое и им можно пренебречь. При сделанных допущениях для потока магнитной индукции получена приближенная формула

$$\Phi = \frac{4\pi I}{b \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{arctg} \frac{\lambda+1}{a} + \operatorname{arctg} \frac{\lambda-1}{a} - \frac{1}{\mu} \operatorname{arctg} \frac{1}{a} - \operatorname{arctg} \left(-\frac{1}{a} \right) \right] + \frac{l}{\pi} \left[\frac{1}{\mu(k^2-r^2)} + \frac{1}{(R-r)^2} \right]} \quad (1)$$

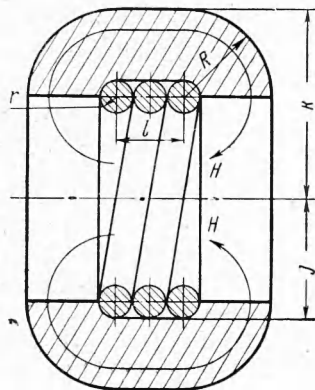
$$\left(b = \frac{2}{\pi(R-r)\sqrt{\lambda^2-1}}, \lambda = \frac{2R}{r+R}, a = \sqrt{\lambda^2-1}, k = \frac{2R}{R+r} \right)$$

Здесь I — сила тока в CGSM системе единиц, n — число витков соленоида, μ — магнитная проницаемость материалов деталей 3 и 10. В нашем случае $R = 3$ см, $r = 0.5$ см, $l = 2$ см, $n = 3$ и $\Phi = 124.6$ Г. Радиальную составляющую напряженности магнитного поля в зоне горения дуги определяли по приближенной формуле

$$H_r = \frac{\Phi \cos \varphi}{\pi(R-r)(2R-R \sin \varphi - r \sin \varphi)} \quad \left(\sin \varphi = i - \frac{d}{2R} \right) \quad (2)$$

Подставляя значения R, r, d и выражая силу тока в амперах, получаем

$$H_r = \frac{1.03 I}{\pi} \text{ [эрсмед]}$$



Фиг. 3

На единицу длины дуги в направлении касательной к поверхности вихря действует электродинамическая сила $0.1 IH_r$. Будем считать в первом приближении, что на установившемся режиме эта сила уравновешивается силой аэродинамического сопротивления [2]

$$0.1 IH_r = C 2rp \frac{V_n^2}{2} \quad (3)$$

Здесь r — радиус положительного столба дуги, ρ — плотность среды, V_n — скорость движения дуги относительно среды и C — коэффициент сопротивления. По данным книги [2], этот коэффициент $C = (1 + 0.4 H^{0.3})$. Подставляя значения H и C через I в (3) и решая относительно V_n , получаем

$$V_n = 0.321 I [\pi r \rho (1 + 0.286 I^{0.3})]^{-1/2} \quad (4)$$

Плотность ρ определяется из уравнения состояния среды

$$\rho = \frac{p}{R_1 T}$$

где p — давление, T — абсолютная температура и R — газовая постоянная. Радиус дуги определялся по следу дуги на поверхности электродов и принят равным 0.3 см.

При силе тока 600 а, давлении $p = 1.2$ ат и температуре $T = 3500^\circ$ К по уравнению (4) найдем скорость дуги относительно среды, равную порядка 160 м/сек.

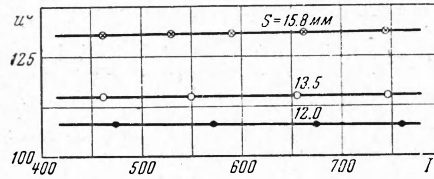
Скорость движения дуги относительно электродов складывается из скорости движения среды и скорости движения дуги относительно среды. Скорость движения среды V в зоне горения дуги в случае идеального вихря можно найти из уравнения

$$V(d - 0,3) = V_1 d_1 \quad (5)$$

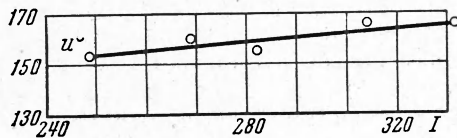
где V_1 — скорость входа воды в рабочую камеру, d_1 — диаметр рабочей камеры. Для испытанного плазматрона при $d_1 = 6$ см и $V_1 = 20$ м/сек величина $V = 27.9$ м/сек.

Таким образом, скорость передвижения опорных точек дуги относительно электродов порядка 180 м/сек. В этом расчете не учтено влияние стенок вихря на скорость относительного движения дуги, а оно может быть значительным, и влияние вязкости на V . Учет этих факторов приведет к уменьшению расчетной величины скорости движения дуги. Проведенные вычисления очень приближенны, однако они показывают эффективность применения магнитного поля для вращения дуги.

На фиг. 4 приведена зависимость падения напряжения U^{\sim} [b] на дуге от силы тока I [a] для различных зазоров между электродами. Вольт-амперные характеристики дуги в интервале силы тока от 400 до 800 а представляют



Фиг. 4



Фиг. 5

прямыми линиями, параллельные оси I . Такое поведение дуги связано с особенностями движения дуги под воздействием магнитного поля вблизи поверхности вихря. Движение дуги вблизи поверхности воды аналогично движению в щелях. С увеличением силы тока увеличиваются диаметр дуги и теплоотдача боковым стенкам [2]. Поэтому тенденция уменьшения падения напряжения на дуге с увеличением силы тока ослабляется. С увеличением силы тока, как показывает равенство (4), увеличивается скорость движения дуги, что также способствует охлаждению дуги и, следовательно, увеличению падения напряженности. При сильных магнитных полях и малых диаметрах вихря дуга вращается с большой скоростью и под действием центробежной силы прижимается близко к поверхности воды, поэтому можно ожидать восходящую вольт-амперную характеристику. В экспериментах при диаметре вихря 22 мм, зазоре между электродами 23 мм и большем, чем на схеме, числе витков соленоидов удалось получить восходящую вольт-амперную характеристику (фиг. 5).

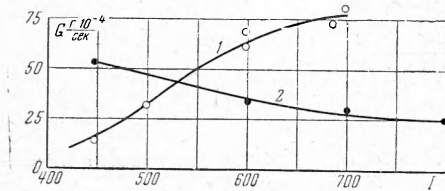
Таким образом, при последовательном включении в цепь дуги индуктивностей, создающих в межэлектродном промежутке радиальное магнитное поле, возникает обратная связь между дугой и действующим на нее магнитным полем: рост силы тока приводит к усилению магнитного поля, что в свою очередь ускоряет дугу. Дуга с восходящей вольт-амперной характеристикой [3] должна устойчиво работать и без внешнего сопротивления. В связи с этим дальнейшее исследование влияния магнитного поля и размеров вихря на поведение дуги становится важной задачей.

Одновременно с исследованием вольт-амперной характеристики и влияния магнитного поля на нее изучался унос материала электродов. Результаты этих исследований в виде зависимости уноса массы электродов G [г/сек] от силы тока I [a] показаны на фиг. 6, где кривая 1 — для катода, кривая 2 — для анода. Каждая точка графика соответствует десятиминутной работе плазматрона при постоянном значении тока. Из графиков следует, что величина уноса материала на порядок меньше, чем приводимая в работе [1]. Такое значительное уменьшение уноса при отно-

сительно больших токах связано, на наш взгляд, с вращением дуги радиальным магнитным полем. Следствием уменьшения уноса материалов электродов явилось увеличение ресурса работы плазматрона. Отметим также еще два интересных результата:

1) при токах свыше 500—600 *a* намечается тенденция уменьшения роста уноса материала катода;

2) с ростом тока унос материала анода уменьшается, причем чем сильнее ток, тем слабее сказывается это влияние.



Фиг. 6

Время непрерывной работы описанного плазматрона составляло около 1 часа. По имеющимся экспериментальным данным определяем тепловой к. п. д. (при этом пренебрегаем потерей энергии излучением)

$$\eta = \frac{IU^{\circ} - Q}{IU^{\circ}}$$

Здесь Q — мощность, уносимая охлаждающей водой. Вычисленные величины к. п. д. лежали в пределах 30—40%. Небольшой к. п. д. установки объясняется тем, что значительная часть тепла, выделяемая электрической дугой в камере горения, расходуется на непроизводительный нагрев воды стабилизирующего водяного вихря из-за интенсивного турбулентного перемешивания жидкости на границе раздела поверхностей. В исследованной установке в силу особенностей образования вихря испаряется и нагревается до высокой температуры менее 2% вводимой в камеру жидкости. Если бы удалось создать устойчивый водяной вихрь с внутренней полостью нужного диаметра и с расходом жидкости, равным количеству образованной плазмы, то возможно значительное повышение величины теплового к. п. д. установки. Температура потока на выходе из отверстия анода при диаметре вихря 46 мм была определена по температуре плавления тугоплавких материалов. Полученные значения температуры при силе тока 600 и 800 *a* соответственно равны 2900 и 3200° К.

Секундный расход газа m и его скорость V_2 на выходе из плазматрона можно определить из уравнений неразрывности и сохранения энергии

$$m = FV_2\rho, \quad \frac{mV_2^2}{2} + \frac{mBg}{18.016} H(T) = \frac{mBg}{18.016} H(T_1) + BQ_1$$

Здесь F — площадь поперечного сечения отверстия анода, ρ — плотность газа при температуре T и атмосферном давлении, B — механический эквивалент теплоты, $H(T)$ — энтальпия газа при температуре T , а $H(T_1)$ — энтальпия входящей в рабочую камеру воды, Q_1 — подводимое к газу тепло и $g = 9.81$ м/сек². Вычисленные значения m и V_2 следующие:

I	[a]	600	800
m	[г/сек]	2.36	2.45
V_2	[м/сек]	471	611

Выводы. Предварительные исследования плазматрона с водяной стабилизацией дуги показали эффективность применения радиального магнитного поля для вращения дуги. При движении опорных точек с большой скоростью значительно уменьшается унос материалов электродов и увеличивается время работы плазматрона.

При некоторых определенных условиях существует восходящая вольт-амперная характеристика, это позволяет создать плазматрон с водяной стабилизацией дуги и радиальным магнитным полем, работающий без балластного сопротивления. Ликвидация его может значительно поднять общий к. п. д.

Поступила 10 XII 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Джон, Бейд, Швейгер и Иос. Использование электродуговых плазменных генераторов в качестве реактивных двигателей. Вопросы ракетной техники, ИИЛ, 1960, № 8.
2. Брон О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. Госэнергоиздат, 1954.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Гостехтеоретиздат, 1952, т. I.