

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ПОТОКЕ ГЕЛИЯ

Веремейчик А.И., Сазонов М.И.

With the purpose of deriving input datas for account and the designings of plasmotrons of a direct current for heating helium, are held broad experimental researches of an electric field strength along an arc, burning in a vortex flow of gas. With usage of the numerical methods the method of application of account of heat losses in the cathode, anode with allowance for of driving heat source is designed. Heat losses in members of a plasmatron subject to intensive heating are determined experimentally. The conditions of chilling are determined.

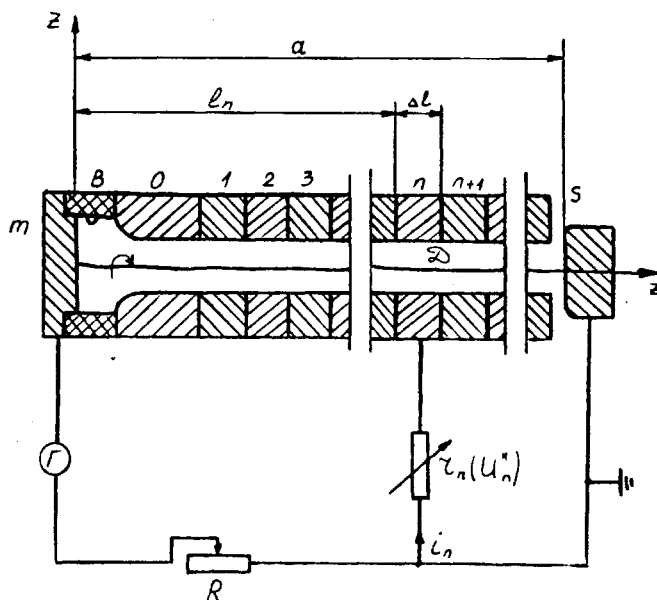


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.
s, m – электроды; 1, 2, 3, ..., n, n+1 – секции вставки;
Г – источник электропитания.

Для получения исходных данных для расчета и разработки гелиевых плазмотронов, предназначенных для производства фуллеренов [1-3], проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей на начальном плане плазмотрона вихревой схемы, для гелия. Исследования дуги в чистых газах также проводились на плазмотроне с фиксированной длиной дуги и геометрически подобными электроразрядными камерами (рис. 1), причем внутренним электродом-катодом служил графитовый стержень длиной 10 мм, диаметром 6 мм, заделанным заподлицо в медную обойму.

Величины напряженности электрического поля вдоль дуги E_H определены методом измерения потенциалов изолированных друг от друга секций.

Напряженность электрического поля дуги определялась по наклону кривой распределения потенциала вдоль оси z . Исследования вольт-амперных характеристик несамостоятельного разряда между дугой и секцией показали, что в гелии потенциал секции равен потенциалу дуги в среднем сечении секции в диапазоне изменения параметров, указанных в таблице 1.

d, мм	10	20	30
Δl , мм	10,5	11	20,6
a, м	154	252	358
I, А	100-180	30-180	30-180
$G10^3$, г/с	0,5-4	0,5-4	0,5-4

Таблица 1. Диапазон изменения параметров при исследовании дуги в гелии

Измерения были проведены в геометрически подобных экспериментальных плазмотронах на всей длине канала, за исключением участков дуги около электродов протяженностью один-два калибра. В экспериментах использовался гелий высокой частоты с примесями не более $4,110^{-2}$ % об.

Установлено, что рост величины E_H с увеличением тока дуги начинается при больших значениях критерия I/d , чем в аргоне. В исследованном диапазоне параметров, указанных в таблице 1, зависимость напряженности электрического поля от тока была падающей, а от z оказалась пренебрежимо малой. На рис. 2 изображены типичные вольт-амперные харак-

теристики дуги в вихревом потоке газа при различных расходах гелия и диаметре внутреннего канала плазмотрона $d=20$ мм.

Учитывая особенности горения дуги в гелии, обобщенную зависимость напряженности электрического поля от определяющих критериев будем искать в виде:

$$E_H d = c \left(\frac{G}{d} \right)^\beta (pd)^\gamma \left(c_0 + c_1 \frac{I}{d} + c_2 \frac{I^2}{d^2} \right). \quad (1)$$

Для падающего участка экспериментальные данные обобщаются следующим образом:

$$E_H d = 560 \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^{0,06} \left(\frac{d}{I} \right)^{0,37}. \quad (2)$$

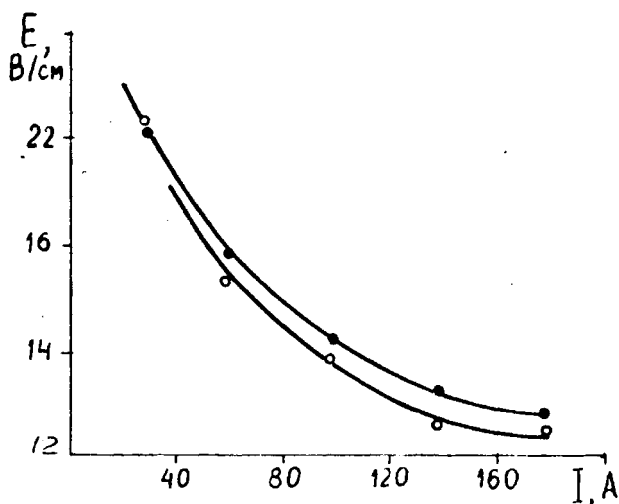


Рис. 2. Напряженность электрического поля дуги в зависимости от тока в гелии ($d=2$ см, 1 - $G=4$ г/с, 2 - $G=0,5$ г/с).

Сравнение формулы (2) с результатами измерений приведено на рис. 3, среднеквадратичное отклонение их равно $\varepsilon=0,08$. Следует отметить, что в гелии зависимость E_H от расхода газа слабее, чем в аргоне. Одной из причин этого является то, что диаметр дуги в гелии меньше, чем в аргоне, и значительная масса гелия протекает по периферии канала, не взаимодействуя с дугой, что приводит к значительным градиентам температуры газа по сечению канала.

Для сравнения электрического поля вдоль дуги в вихревых потоках различных газов на рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики дуги при $d=10$ мм, $G=4$ г/с. Эти результаты показывают, что наиболее эффективно нагрев газа дугой происходит в гелии.

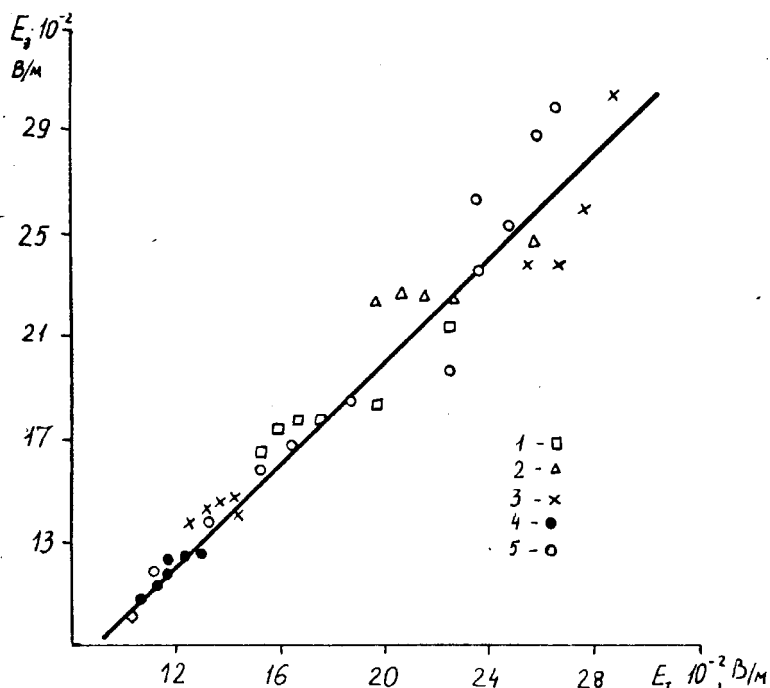


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных на гелии с результатами критериального обобщения. 1 - $I=60$ А; 2 - $I=80$ А; 3 - $I=100$ А; 4 - $I=140$ А; 5 - $I=180$ А

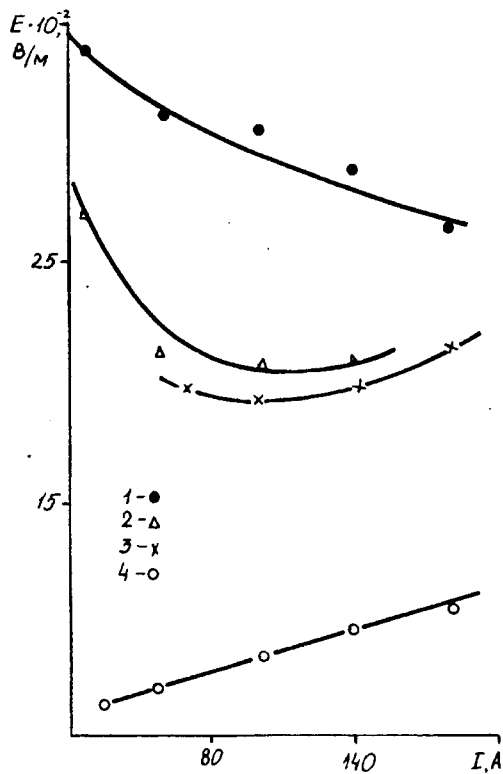


Рис.4. Напряженность электрического поля дуги для различных газов:
1 - гелий, 2 - азот, 3 - воздух, 4 - аргон

На основе разработанной методики с использованием критериальной формулы для E_H сконструирован плазмотрон. Схема плазмотрона, его электропитания и поджига приведена на рис. 5. На рис.6. приведен общий вид этого плазмотрона.

Основными элементами плазмотрона являются катод 1, поджигающий электрод 3 и ступенчатый анод 2. Катод выполнен из графитового стержня длиной 20 мм, запрессованного в медную обойму. В процессе испытания использовались вольфрамовые стержни диаметром от 5 до 20 мм. Поджигающий электрод 3 выполнен из меди в виде секции-шайбы с внутренним диаметром $d_1=16$ мм. Испытанные медные ступенчатые аноды имели диаметры $d_2=8$ мм и $d_3=16$ мм, длину $l_2=30-50$ мм. Полная длина анода $l=l_2+l_3$ изменялась от 90 до 150 мм. Для уменьшения эрозии рабочей поверхности анода установлен соленоид 7, навитый из медной трубки. Осевое магнитное поле, создаваемое им ($B_z = 0,06 - 0,08$ Тл),

обеспечивает такие скорости вращения замыкающего радиального участка дуги, при которых ресурс работы анода достигает свыше 1000 часов. Катод, поджигающий электрод, анод и соленоид интенсивно охлаждаются химически очищенной водой, в результате чего после 200-400 часов работы на наружной поверхности электродов не наблюдалось отложения солей. Вода подается в систему охлаждения плазмотрона под давлением 10-15 атм. Для расчета тепловых потоков в электроды определяли температуру воды на входе и выходе из плазмотрона при помощи хромель-копелевых термопар с записью показаний прибором ЭМП-109 АИ.

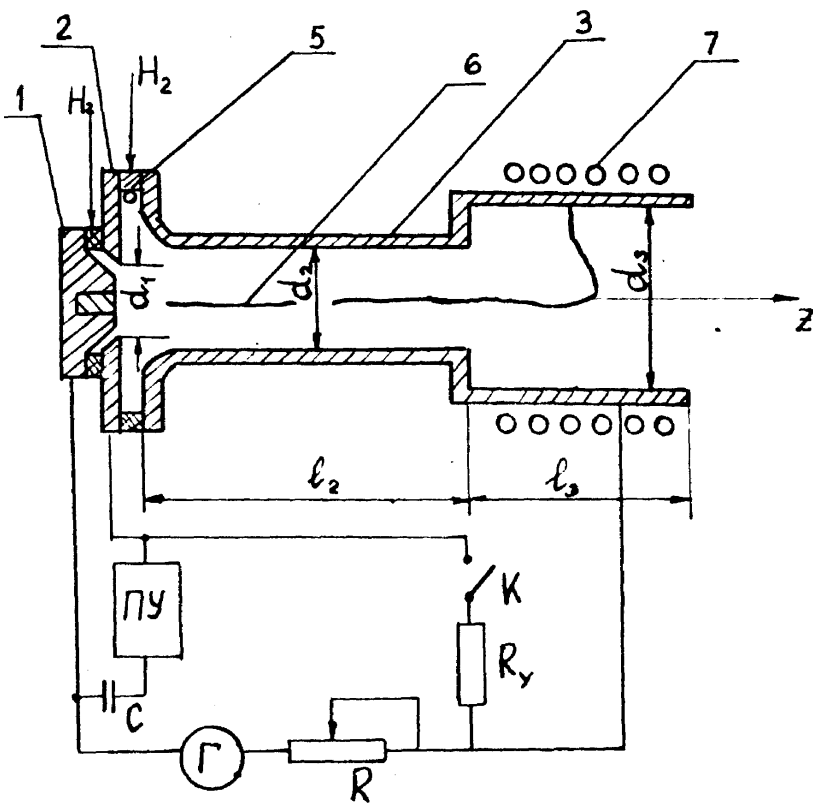


Рис.5. Схема плазмотрона и электропитания. 1 - катод, 2 - поджигающий электрод, 3 - анод, 4 и 5 - изоляторы, 6 - дуга, 7 - соленоид

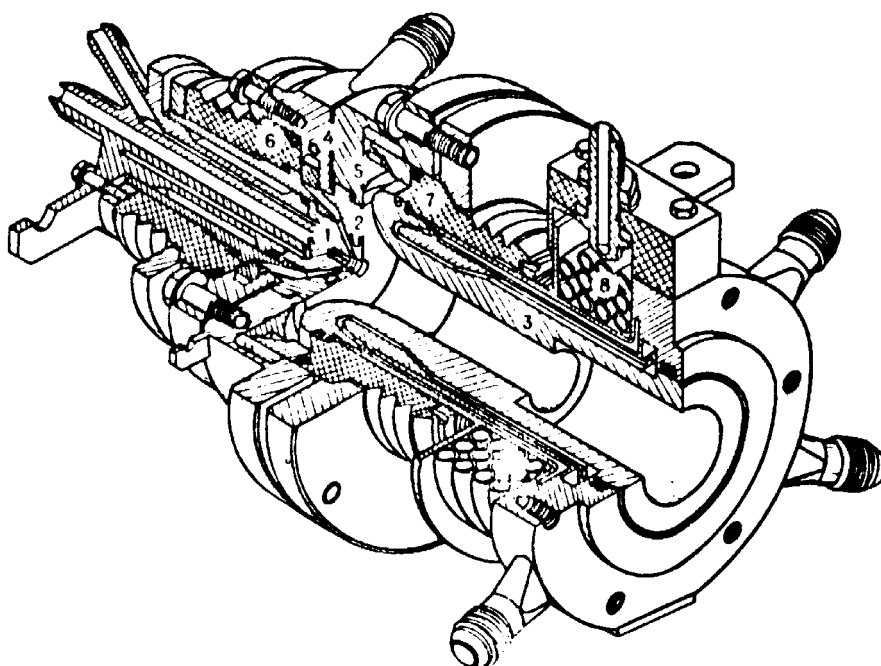


Рис. 6. Изометрия плазмотрона ЭДП - 120.

1 - катод, 2 - МЭВ, 3 - анод, 4 и 5 - узлы подачи защитного и рабочего газов, 6 и 7 - изоляторы, 8 - соленоид.

Давление гелия перед расходомерами на входе плазмотрона составляло $(4...8)10^5$ Па. Расход газа измерялся приборами типа ПВ-1033, а его плавная регулировка осуществлялась автоматическими приборами типа ДМПК-100. В зазор между катодом и поджигающим электродом через 2 тангенциальных отверстия диаметром 1,2 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 50 мм, подавался гелий (расход 0,1-0,2 г/с). Во вторую камеру закрутки 5, расположенную между поджигающим электродом и анодом, гелий поступал через 4 тангенциальных отверстия диаметром 2,4 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 64 мм. Суммарный расход гелия варьировался от 0,5 до 2,4 г/с.

Электропитание плазмотрона осуществлялось от источника питания с номинальным током 600 А и напряжением 900 В. Т.к. его внешняя электрическая характеристика жесткая, а вольт-амперная характеристика дуги падающая, в силовую цепь последовательно с дугой с целью обеспечения устойчивого ее горения включено изменяющееся ступенчато балластное сопротивление R.

Поджиг плазмотрона осуществлялся при помощи высоковольтного высокочастотного осциллятора с подачей напряжения на поджигающий электрод 3. Между поджигающим электродом и анодом через контактор включено сопротивление $R_y = 10-20$ Ом. Такая схема включения осциллятора в электрическую цепь питания плазмотрона позволяла исключить попадание ВЧ-напряжения в силовую цепь питания и обеспечивала тем самым надежную защиту выпрямителя от перенапряжения. Соленоид 7 включен в цепь электропитания последовательно с дугой.

Порядок запуска плазмотрона: устанавливают рабочий расход газа; после этого при включенном контакторе К подают напряжение от выпрямителя Г и далее включается осциллятор, обеспечивающий пробой зазора (1,5 мм) между катодом и поджигающим электродом. Образовавшийся искровой канал служит основой для развития вспомогательной дуги, ток которой равен 10-15 А и регулируется изменением величины R_y . Под действием потока гелия слабощадная дуга выдувается из зазора. Катодное пятно устанавливается на графитовом стержне, анодное - перемещается к кромке электрода 2, а образующийся высокотемпературный факел снижает напряжение пробоя между катодом и анодом; существующая разность

потенциалов между ними (при мощности, вложенной в вспомогательную дугу, порядка 1-2 кВт) обеспечивает пробой и поджиг основной дуги. Ток в основной цепи регулируется балластным реостатом R. Далее радиальный участок дуги потоком гелия, подаваемого в основную вихревую камеру 5, сносится за уступ, а столб дуги устанавливается на оси разрядной камеры. После запуска плазмотрона сопротивление R_y отключают контактором K, а реостатом R устанавливается и стабилизируется необходимый рабочий ток силовой дуги. Запуск плазмотрона производится при токе дуги 200-300 А.

Напряжение и ток дуги регистрировались приборами типа М367 класса точности 1,5 со шкалами 1000 В и 750 А, соответственно.

Проведены исследования вольт-амперной характеристики дуги. Вначале отметим, что результаты экспериментов подтвердили необходимость поддержания тангенциальной скорости закрутки гелия в пределах 130-200 м/с и плавного (безотрывного) перехода от кольца закрутки к внутреннему диаметру электрода с целью обеспечения газодинамически устойчивого горения дуги. В экспериментах также было установлено, что дуга в плазмотроне рассматриваемой схемы горит с меньшими пульсациями напряжения по сравнению с дугой с самоустанавливающейся длиной, горящей в цилиндрическом канале без уступа.

Одновременно с исследованием вольт-амперных характеристик дуги проводились измерения тепловых потоков в элементы плазмотрона: катод, анод и поджигающий электрод. Это позволило вычислить тепловой к.п.д. плазмотрона, энтальпию и среднюю температуру T газа в зависимости от величины тока дуги и длины анода при различных расходах гелия. Установлено, что тепловой к.п.д. равен 0,68-0,74, а рассчитанная температура $T=3700-4200$ К.

В гелии тепловые потери в катод почти не зависят от диаметра вольфрамового стержня, запаянного заподлицо в медную обойму, который в опытах изменялся от 3 до 10 мм. Полученные результаты согласуются с данными для других газов.

Тепловые потоки в катод при использовании в качестве рабочего газа гелия и длине $l_2 = 39$ мм оказались ниже, чем тепловые потоки в случае работы с азотом при равных величинах тока и стабильных режимах горения дуги, когда пятно анодного участка дуги всегда располагается за уступом. Несколько неожиданные результаты получаются для нестабильного режима ($l_2 = 50$ мм), когда возрастают амплитуда тока и снижается частота шунтирования дуги: тепловые потоки в катод в рассматриваемом диапазоне величин тока увеличиваются примерно в два раза. Это не может не отразиться на скорости эрозии графитового катода. Это явление может быть использовано для реализации заданной эрозии графитового катода. Отметим, что минимальная удельная эрозия такого катода составляет 410^{-5} г/Кл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода. // УФН, № 9. - 1995. – С. 977-1009.
2. Богданов А.А., Дайнингер Д., Дюжев Г.А. Перспективы развития промышленных методов производства фуллеренов. // ЖТФ, 2000. Т. 70, вып. 5.
3. Витязь П.А., Стельмах В.Ф., Шпилевский Э.М. Фуллерены и фуллереносодержащие материалы. // Фуллерены и фуллереносодержащие материалы: Сб. науч. тр. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – с.5-26.