

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ПЛАЗМОТРОНЕ С САМОУСТАНАВЛИВАЮЩЕЙСЯ ДУГОЙ

А. С. Аньшаков, Г. Ю. Даутов, Г. М. Мустафин, А. П. Петров

(Новосибирск)

В плазмотронах вихревой схемы шунтирование — один из основных процессов, определяющих свойства дуги и потока нагреваемого газа. В связи с этим в последнее время интенсивно исследуется характер механизма шунтирования и связанных с ним пульсаций. В [1] показана связь колебаний яркости потока на выходе из плазмотрона и напряжения дуги. В [2] приведены данные по влиянию расхода газа и тока на частоту шунтирования, показана возможность одновременного существования нескольких анодных пятен в аргоновой дуге. В [3] изучено влияние полярности электрода-канала и материала электрода на пульсации напряжения дуги. В данной работе получены функции распределения напряжения, тока и яркости, приведены осциллограммы этих величин, а также осциллограммы тока через секции анода. Различными способами доказано одновременное существование нескольких анодных пятен, высказаны соображения о влиянии собственного магнитного поля дуги на ее поведение.

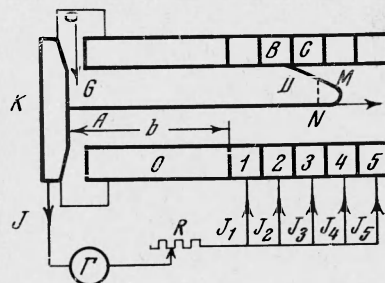
Обозначения

- I, U — осредненные по времени значения тока и напряжения дуги;
 I_n — осредненный по времени ток через n -ю секцию анода;
 I_{nt} — мгновенное значение переменной составляющей тока через n -ю секцию анода;
 I_z — осредненный по времени ток через единицу длины анода;
 I_t, U_t, B_t — мгновенные значения переменных составляющих тока, напряжения и яркости струи;
 I_s, U_s, B_s — мгновенные значения тока, напряжения и яркости струи;
 f_u, f_i, f_b — функции распределения напряжения, тока и яркости струи;
 G — расход газа через дуговую камеру;
 d — внутренний диаметр анода; t — время;
 z — координата вдоль оси дуговой камеры, за начало отсчета принята торцевая поверхность катода;
 ν_z — осредненная по времени частота посещения единицы длины анода пятном дуги;
 ν_n — осредненная по времени частота посещения n -й секции анода пятном дуги;
 i, ν — функции распределения величин I_z и ν_z по длине анода;
 $z_{0i}, z_{0\nu}$ — значения z , соответствующие максимумам i и ν ;
 j — плотность тока в столбе дуги;
 H — напряженность собственного магнитного поля дуги;
 s — площадь поперечного сечения столба дуги.

1. Экспериментальная установка. Эксперименты проводились на обычном однокамерном плазмотроне, схематически показанном на фиг. 1. Анод состоял из изолированных друг от друга секций толщиной 7 мм (в экспериментах количество секций равнялось 16), толщина нулевой секции выбиралась так, чтобы на длине $z = b$ шунтирование отсутствовало. Минимальный зазор между катодом и нулевой секцией составлял 1.5–2 мм. Катод охлаждался водой, анод — воздухом. В экспериментах по исследованию функций распределения тока, напряжения дуги и яркости струи анод был сплошным и охлаждался водой.

Величины I и U измерялись приборами ЛМ-1 и Э59 класса 0.5 соответственно с диапазонами шкал 300 а и 600 в, расход воздуха через дуговую камеру контролировался ротаметром РС-7. При определении распределения I_z по z осредненные по времени токи через секции измерялись амперметрами М-362 класса 1.5.

Предварительные эксперименты показали, что напряжение дуги в секционированном канале меньше, чем в случае сплошного канала. Также было выяснено, что с повышением чистоты и гладкости поверхности секционированного канала эта разность



Фиг. 1. Схема плазмотрона: 0—5 — секции анода, K — катод, Г — генератор, R — сопротивление, AB — дуга, G — подача газа

напряжения ΔU уменьшается. Основные эксперименты на плазмотроне с секционированным анодом проводились при $I = 70 \text{ а}$, $G = 6 \text{ г·сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$. При этом режиме напряжение дуги составляло в случае сплошного канала 475 в, а в случае секционированного — 440 в, т. е. ΔU не превышало 10% от напряжения дуги в сплошном канале. Кроме того, осциллограммы U_t имели одинаковый характер в обоих случаях. Все это дает основание полагать, что условия горения дуги в гладком секционированном и сплошном анодах близки и результаты исследования на плазмотроне с секционированным анодом можно переносить на случай сплошного анода. Отметим, что к такому же выводу пришли и авторы работы [2].

2. Распределение I_z и v_z по длине анода. Полученные распределения приведены на фиг. 2, где $i = I_z / I_{z \text{ max}}$, $v = v_z / v_{z \text{ max}}$.

В расчетах было принято

$$\frac{I_z}{I_{z \text{ max}}} = \frac{I_n}{I_{n \text{ max}}}, \quad \frac{v_z}{v_{z \text{ max}}} = \frac{v_n}{v_{n \text{ max}}}$$

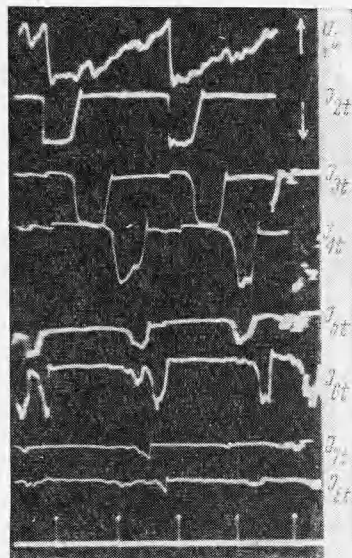
Частота посещения секции анодным пятном v_n определялась радиометром VA-M-14, чувствительность которого 0.3 в, путем измерения количества посещений в течение 5 сек. Для этого в цепь каждой секции вводилось известное сопротивление R_n и разность потенциалов на концах сопротивления подавалась на вход радиометра. Необходимо отметить, что показание счетчика зависит от величины R_n . Причина этого явления будет рассмотрена ниже. Приведенное на фиг. 2 распределение v по z получено при $R_n = 0,05 \text{ ом}$, $I_{n \text{ max}} = 18 \text{ а}$, $v_{n \text{ max}} = 1.2 \cdot 10^4 \text{ импульс / сек}$.

Фиг. 2. Распределения относительной плотности тока i и относительной частоты посещения секций анодным пятном v по длине анода. 1, 2 — экспериментальные точки для i и v ; 3, 4 — нормальные распределения по формулам (2.1); $I = 70 \text{ а}$, $U = 440 \text{ в}$, $G = 6 \text{ г·сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$

На фиг. 2 нанесены экспериментальные данные при $I = 70 \text{ а}$, $U = 440 \text{ в}$, $d = 1 \text{ см}$, $G = 6 \text{ г·сек}^{-1}$. Из графиков видно, что функции $i(z)$ и $v(z)$ представляют собой распределения случайных величин и подчиняются закону нормального распределения

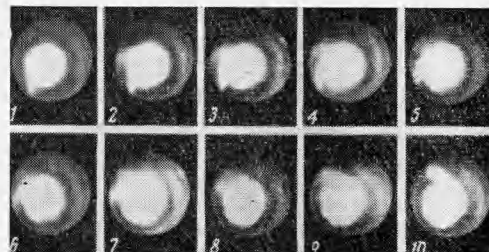
$$i(z) = e^{-k_i(z-z_{0i})^2}, \quad v(z) = e^{-k_v(z-z_{0v})^2} \quad (2.1)$$

В данном случае $k_i = 0.39 \text{ см}^{-2}$, $k_v = 0.33 \text{ см}^{-2}$, $z_{0i} = 15.05 \text{ см}$, $z_{0v} = 15.72 \text{ см}$. Кривые, рассчитанные по формулам (2.1), нанесены сплошными линиями. При других значениях I эти распределения остаются по форме такими же и с ростом тока смещаются в сторону меньших z , как и в случае катодного пятна [4]. В формулах (2.1) величины k_i , k_v , z_{0i} , z_{0v} являются функциями I , G , d , p . Следует отметить несовпадение максимумов $i(z)$ и $v(z)$: $v(z)$ сдвинута в сторону больших z относительно $i(z)$. Для выяснения причины



Фиг. 3

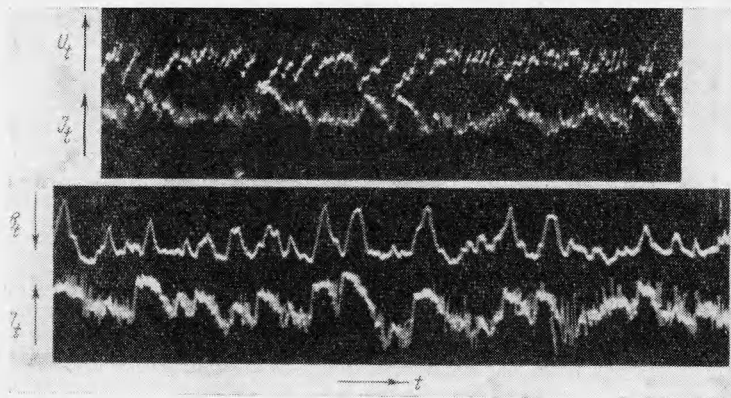
Фиг. 3. Осциллограммы переменных составляющих напряжения U_t и тока дуги I_t через секции анода. Длительность между метками времени 10^{-4} сек , $I = 83 \text{ а}$, $U = 375 \text{ в}$, $G = 6 \text{ г·сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$, $b = 8,5 \text{ см}$, толщина секции 0.7 см.



Фиг. 4

Фиг. 4. Фотографии дуговой камеры с торца сплошного анода. Скорость съемки $6 \cdot 10^4 \text{ кадр/сек}$. Цифры указывают последовательность кадров. $I = 105 \text{ а}$, $G = 6 \text{ г·сек}^{-1}$, $d = 1 \text{ см}$

этого рассмотрим осциллограммы фиг. 3. Они сняты при помощи четырех двухлучевых осциллографов ОК-17М при их синхронном запуске с точностью до $1 \cdot 10^{-6}$ сек. Приведенные метки времени являются общими для всех осциллограмм. Из осциллограммы U_t видны постепенный рост и затем резкое уменьшение U_t в момент шунтирования дуги на секцию 2. Осциллограммы I_t , ввиду малости тока несамостоятельного разряда между столбом дуги и секцией, можно считать осциллограммами абсолютного значения тока через секции. На них виден поочередный переход анодного пятна с одной секции на другую в направлении течения газа. На первых секциях импульсы тока устойчивые и имеют большую длительность.



Фиг. 5. Осциллограммы переменных составляющих напряжения, тока и яркости струи при $I = 110$ а, $U = 412$ в, $G = 6$ г/сек $^{-1}$, $d = 1$ см. Длительность приведенных разверток $5,6 \cdot 10^{-3}$ сек

По мере движения пятна в направлении течения газа положение его становится менее устойчивым. Так, например, пятно на шестой секции появляется, исчезает и почти сразу же вновь появляется, что видно по изменению I_{st} . Кроме того, длительность нахождения пятна на одной секции уменьшается, что, в частности, можно объяснить ростом скорости газа вдоль дуги и петлеобразной формой ее конца. И, наконец, на последних секциях сигналы становятся слабыми, но довольно частыми. Радиометр ВА-М-14 воспринимает в виде отдельного импульса как мощный длительный сигнал на первых секциях, так и кратковременный слабый сигнал на последних секциях. Этим объясняется сдвиг $v(z)$ относительно $i(z)$. С ростом R_n радиометр регистрирует все более и более слабые сигналы, т. е. сдвиг $v(z)$ относительно $i(z)$ зависит еще от величины R_n .

Из осциллограмм фиг. 3 можно найти скорость перемещения анодного пятна в осевом направлении, определяемую как отношение толщины секции к времени нахождения пятна на секции. В начале зоны шунтирования она составляет порядка 170 мсек $^{-1}$. При этом среднemasовая скорость газа на выходе из плазматрона приблизительно равна 750 мсек $^{-1}$.

Мелкомасштабное шунтирование типа дуга — электрод вдоль линии DC (фиг. 4) обеспечивает скачкообразное перемещение анодного пятна по поверхности электрода. При этом канал DB отмирает, DC развивается. Это видно, например, из постепенного уменьшения I_{2t} и роста I_{3t} при переходе пятна со второй секции на третью. В такие моменты естественно существуют два пятна. Однако часто одновременно существуют два пятна и на удаленных одна от другой секциях. Были получены осциллограммы, где четко видно одновременное продвижение двух анодных пятен на расстояние, равное толщине трех секций. Кроме осциллографирования, одновременное существование нескольких анодных пятен было проверено при помощи установки типа ССА для регистрации совпадений и антисовпадений импульсов при работе на режиме совпадения с разрешающим временем 10^{-6} сек. Установка считала случаи, когда на исследуемых секциях одновременно существуют анодные пятна.

Эксперимент проводился при $b = 8.5$ см, $I = 60$ а, $U = 450$ в, $\Delta U = 45$ в, $G = 6$ г/сек $^{-1}$, $d = 1$ см.

Приводим номера N секций, сигналы с которых регистрировались, и число n совпадений сигналов за время $t = 5$ сек.

N	11,12	11,13	11,14	12,14	11, 12, 13	11, 12, 14	11, 12, 13, 14
n	1570	2850	3900	2560	90	230	70

И, наконец, фотографии дуговой камеры с торца сплошного анода (фиг. 4), снятые при помощи СФР в режиме лупы времени со скоростью $6 \cdot 10^4$ кадр/сек, также подтверждают одновременное существование нескольких анодных пятен. По кадрам фиг. 4 можно определить скорость вращения радиального участка дуги. Она составляет порядка 1800 об/сек.

3. Функции распределения напряжения, тока и яркости струи. На фиг. 5 приведены осциллограммы переменных составляющих тока, напряжения дуги и яркости струи на расстоянии 1—1,5 мм от среза анода. Здесь под яркостью понимается интегральный поток излучения струи, воспринимаемый фотоумножителем. Для измерения B_i использовался фотоумножитель ФЭУ-19. Осциллограммы сняты при помощи двухлучевого катодного осциллографа ДЭСО-1 при отключенной горизонтальной развертке. При этом положение лучей на экране фотографировалось фоторегистром ФР-11, что позволило получить осциллограммы большой длительности. Из этих осциллограмм видно, что частота шунтирования и величины I_t , U_t , B_t не являются периодическими, а имеют значительные случайные отклонения от их средних значений. Естественно, для характеристики таких процессов целесообразно, как это обычно делается, введение функций распределения. Например, вероятность нахождения напряжения $U_s = U + U_t$ в интервале от U_s до $U_s + dU_s$ выражается через f_u формулой

$$d\Gamma_u = f_u dU_s \quad (3.1)$$

Для приближенного определения нормированной функции f_u могут быть использованы осциллограммы. Для этого длительность осциллограммы делится на m равных участков и определяется количество m_s участков, где U_s находится в интервале от U_s до $U_s + \Delta U_s$. Тогда $\Delta\Gamma_u = m_s / m$, и из (3.1) получаем

$$f_u = m_s / m \Delta U_s \quad (3.2)$$

Так были найдены f_u , f_i , f_b . Полученные функции подчиняются закону нормального распределения

$$f_u = \sqrt{l_u / \pi} e^{-l_u (U_s - U_0)^2}, \quad f_i = \sqrt{l_i / \pi} e^{-l_i (I_s - I_0)^2}, \quad f_b = \sqrt{l_b / \pi} e^{-l_b (B_s - B_0)^2} \quad (3.3)$$

Здесь I_0 , U_0 , B_0 — среднеарифметические значения I_s , U_s , B_s . При нормальном распределении среднеарифметические значения тока и напряжения равны показаниям приборов магнито-электрической системы, т. е. $I_0 = I$, $U_0 = U$. При $I = 110$ а, $U = 412$ в, $G = 6$ в/сек², $d = 1$ см, коэффициент l_u равен $10^{-2} \cdot 3.3$ в².

На фиг. 6 приведены полученные функции распределения, где x означает $(U_s - U)$, $(I_s - I)$, $(B_s - B)$. Одно деление оси x соответствует 6 в, а значения $(I_s - I)$ и $(B_s - B)$ даны в произвольных масштабах. Для удобства графического изображения они умножены соответственно на величины

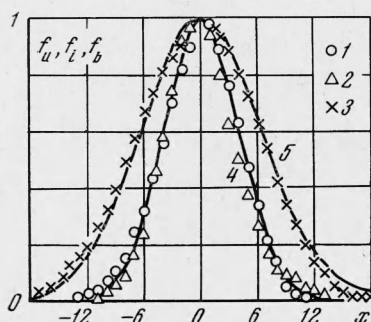
$$\sqrt{\pi / l_u}, \quad \sqrt{\pi / l_i}, \quad \sqrt{\pi / l_b}$$

Сплошные линии определены по формулам (3.3), экспериментальные точки получены из осциллограмм и пересчитаны по формуле (3.2). Как видно, экспериментальные данные хорошо описываются нормальными распределениями (3.3). Таким образом, как функции $i(z)$, $v(z)$, так и f_u , f_i , f_b в исследованных условиях подчиняются закону случайных величин, а механизм шунтирования зависит от возмущений, имеющих случайный характер. Такими возмущениями являются колебания температуры, скорости, давления и других величин в результате турбулентных пульсаций, флуктуаций электрических параметров и т. д.

Имея функции распределения, легко вычислять характерные значения соответствующих величин. Так, например, среднеквадратичное значение амплитуды колебания ΔU_1^2 определяется по формуле

$$\Delta U_1^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_u(x) dx, \quad f_u(x) = e^{-l_u x^2} \left(\frac{l_u}{\pi} \right)^{1/2}$$

Следует отметить некоторые особенности пульсаций тока. На фиг. 5 изменение тока напоминает зеркальное отображение изменения напряжения. Отличие заключается в том, что на пульсации тока, связанные с крупномасштабным продольным шун-



Фиг. 6. Функции распределения напряжения, тока и яркости струи газа на выходе из плазматрона. 1, 2 и 3 — экспериментальные точки для напряжения, тока и яркости соответственно; 4 — расчетная кривая для напряжения и тока; 5 — расчетная кривая для яркости; $I = 110$ а, $U = 412$ в, $G = 6$ в/сек², $d = 1$ см

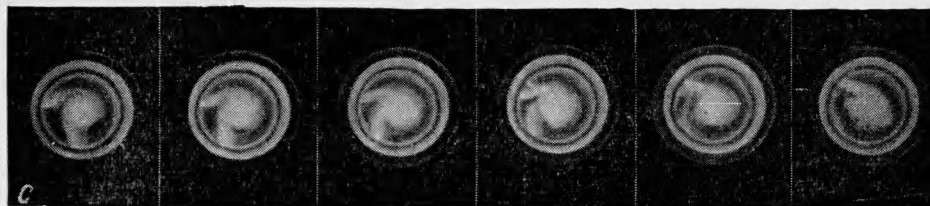
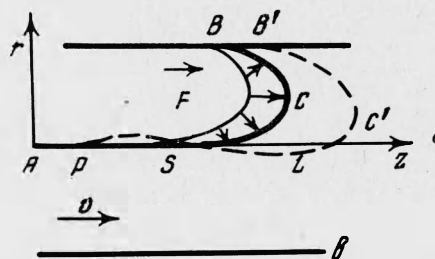
тированием, наложены значительные возмущения с частотой порядка $5 \cdot 10^4$ гц. Кроме того, форма осциллограммы I_t сильно зависит от источника питания и параметров электрической цепи.

4. Влияние петли положительного столба на поведение дуги. Под действием потока нагреваемого газа радиальный участок дуги деформируется в виде петли BN (фиг. 1), вращается вокруг оси электрода и одновременно движется в направлении аксиального течения газа. Образование петли и ее шунтирование вдоль линии NM легко наблюдать, если электрод делать таким коротким, чтобы петля выходила из электрода. На фиг. 7, а приведены фотографии петли, снятые при помощи скоростной кинокамеры СКС-1 со скоростью $4 \cdot 10^3$ кадр/сек. На этих фотографиях анод находится слева, дуга выходит из анода, делает петлю и замыкается на торец анода в его нижней части. На втором и шестом кадрах отчетливо видно шунтирование петли вновь образованным более коротким токопроводящим каналом.

Образование петли приводит к сложному взаимодействию дуги с ее собственным магнитным полем. Для выяснения этого рассмотрим простейший случай, когда диаметр столба дуги постоянен и его ось представляет собой линию в плоскости чертежа (фиг. 7, в). На единицу длины столба действует сила

$$F = \int_s [jH] ds$$

находящаяся в плоскости чертежа и направленная перпендикулярно j . На фиг. 7, в приведена качественная картина распределения F для дуги ACB . Под действием F дуга должна двигаться относительно газового потока и поэтому можно ожидать следующую картину развития дуги ACB . На участке BC проекция F на ось r частично компенсируется стабилизирующим действием вращательного движения газа. Движение же петли в направлении z ограничено лишь аэродинамическим сопротивлением газа и скорость ее относительного движения в зависимости от величины тока и других условий может быть значительной. Участок SL под действием F отклоняется от оси z вниз. В свою очередь, искривление в



Фиг. 7. а) Фотографии петли дуги, выходящей из анода. Скорость съемки $4 \cdot 10^3$ кадр/сек, $d = 3,5$ см, $I = 50$ а, $G = 27$ г/сек $^{-1}$, рабочая среда — воздух, полярность прямая; в) вид распределения электродинамической силы F для петли дуги; с) фотографии движения двух радиальных участков дуги во внутреннем электроде двухкамерного плазматрона вихревой схемы. $G = 160$ г/сек $^{-1}$, $I = 1800$ а, $d = 7$ см. Скорость съемки $4 \cdot 10^3$ кадр/сек

окрестности S вызывает отклонение участка дуги PS вверх и т. д. Поскольку дуга одновременно и вращается вокруг оси z , то сила F должна привести к колебаниям конца дуги в зоне шунтирования. По-видимому, частично так можно объяснить обнаруженные в [5] поперечные колебания конца дуги.

Образование вытянутой петли благоприятствует росту частоты шунтирования типа дуга — электрод вдоль линии DC (фиг. 1) в конце зоны шунтирования.

Это подтверждается уменьшением времени пребывания анодного пятна на секциях, расположенных в конце зоны шунтирования (сравните, например, длительности импульсов I_{2t} и I_{6t} на фиг. 3).

Значительное влияние собственного магнитного поля дуги на ее поведение особенно хорошо видно при больших токах. На фиг. 7, с приведена фотография движения двух радиальных участков дуги во внутреннем электроде двухкамерного плазмотрона вихревой схемы при работе на аргоне ($d = 7$ см, $G = 160$ г сек $^{-1}$, $I = 1800$ а). Хорошо видно, как по мере сближения двух радиальных участков из-за взаимодействия их магнитных полей скорость переднего токопроводящего канала уменьшается, а заднего — увеличивается. Затем эти каналы сливаются. Это показывает, что иногда силы в собственном магнитном поле становятся сравнимыми с силой действия потока на дугу.

Учет влияния собственного магнитного поля в зоне петли позволяет объяснить еще одно явление. Для приведенного на фиг. 2 режима работы плазмотрона среднеарифметическое расстояние между катодным и анодным пятнами дуги z_{0i} равно приблизительно 15 см. Если дуга не имеет петли и хорошо стабилизирована по оси электрода, то в этих условиях напряжение дуги такой длины порядка 330 в [6]. Тогда среднее падение потенциала на петле будет порядка 110 в. Эта величина слишком большая, если даже принять во внимание низкую температуру газа у стенок электрода. Как известно [7], движение дуги относительно газа приводит к существенному росту напряженности электрического поля.

Поэтому можно предполагать, что в данном случае деформация и относительное движение дуги под действием собственного магнитного поля будут одной из причин большого падения потенциала в зоне петли дуги.

Авторы благодарят Ю. С. Дудникова за помощь в работе.

Поступила 9 III 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. J o r d e n G. R., K i n g L. A. The nature of fluctuations present in d. c. plasma jets in argon and nitrogen Brit. J. Appl. Phys., 1965, vol. 16, No. 4.
2. M o r i t z J., N e u m a n n W., R a d e m a c h e r K. Über die Bewegung des Bogenansatzes an Plasmastrahl-Hohlkathoden. Beitr. Plasma Phys. 1965, B. 5, H. 4.
3. Г е р м а н В. О., М о р о з о в М. Г. Плазмотрон постоянного тока и некоторые результаты исследования его работы. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 2, № 5.
4. Д а у т о в Г. Ю., Ж у к о в М. Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг. ПМТФ, 1965, № 2.
5. Т р о х а н А. М. Фотографическое исследование пульсаций в плазмотронах воздушной стабилизацией. ПМТФ, 1964, № 2.
6. Д а у т о в Г. Ю., Д у д н и к о в Ю. С., Ж у к о в М. Ф., С а з о н о в М. И. Распределение потенциала вдоль дуги в плазмотроне вихревой схемы. ПМТФ, 1965, № 5.
7. Б р о н О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. Госэнергоиздат, 1954.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПО ДЛИНЕ ПРОДОЛЬНО-ОБДУВАЕМОЙ ДУГИ В ПЛАЗМОТРОНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. С. Васильковская, Л. И. Колонина, А. Д. Лебедев, В. Я. Смоляков
(Новосибирск)

В работе приводятся результаты экспериментального исследования распределения напряженности электрического поля по длине дуги, стабилизированной продольно-вихревым потоком воздуха в плазмотроне постоянного тока. Измерения проводились при помощи потенциальных зондов и показали наличие возрастания напряженности по длине дуги в направлении движения обдувающего дугу газа. Делается попытка объяснения такого возрастания изменением свойств газа при повышении его температуры в процессе теплообмена с дугой.