

**КРИТЕРИАЛЬНОЕ ОБОБЩЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМАТРОНОВ ВИХРЕВОЙ СХЕМЫ**

*Г. Ю. Даутов, М. Ф. Жуков*

(Новосибирск)

Настоящая работа является продолжением ранее опубликованной работы [1] по критериальному обобщению вольт-амперных и тепловых характеристик плазматронов вихревой схемы.

В соответствии с [1], тепловой к.п.д., безразмерное напряжение дуги и средне-массовая энтальпия струи (ниже эти величины обозначены буквой  $\psi$ ) в геометрически подобных однокамерных плазматронах без внешних магнитных полей и межэлектродных вставок в первом приближении определяются критериями

$$K_1 = \frac{c_1 I^2}{Gd}, \quad R = \frac{c_2 G}{d} \quad (1)$$

$$K = \frac{c_3}{pd} \quad (1)$$

$$\psi = \psi \left( \frac{c_1 I^2}{Gd}, \frac{c_2 G}{d}, \frac{c_3}{pd} \right) \quad (2)$$

Здесь  $c_1, c_2, c_3$  — размерные постоянные,  $I$  — ток,  $G$  — расход газа,  $d$  — внутренний диаметр дуговой камеры,  $p$  — характерное давление (в дальнейшем статическое давление в струе в конце дуговой камеры плазматрона).

Критерии [2] являются частью полной системы критериев [1] и при ряде упрощающих предположений путем соответствующих преобразований могут быть приведены к единой форме.

Поскольку любая степенная комбинация критериев также является критерием, им можно придавать различные формы, но при этом число критериев, описывающих данный процесс, должно оставаться постоянным. Полученные таким образом степенные комбинации могут быть более простыми или более удобными для обработки определенного экспериментального материала, хотя такое комбинирование, с точки зрения теории подобия, принципиально нового критерия не дает. Так, например, из (1) можно получить

$$K_1^{0.5} R^{0.5} = \frac{c_4 I}{d}, \quad K_1^{0.5} R^{-0.5} K = \frac{c_5 I}{Gpd}, \quad K_1^{0.5} R^{-0.5} = \frac{c_6 I}{G}$$

Если вместо  $c_1 I^2 / Gd$  взять более простую комбинацию  $c_4 I / d$ , то вместо (1) будем иметь систему критериев

$$c_4 I / d, \quad c_2 G / d, \quad c_3 / pd \quad (3)$$

Тогда, отбрасывая размерные постоянные в критериях и безразмерном напряжении дуги, обобщенную вольт-амперную характеристику можно представить в виде

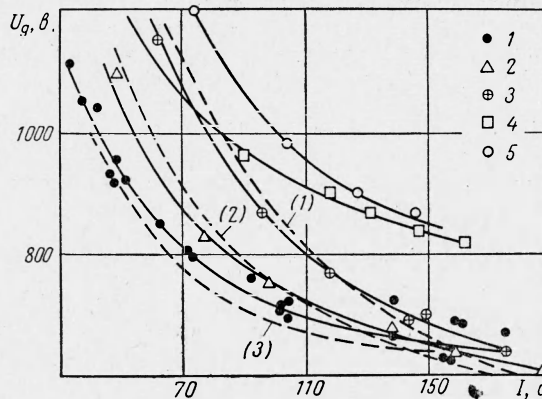
$$\frac{U_g d}{I} = j \left( \frac{I}{d}, \frac{G}{d}, pd \right) \quad (4)$$

где  $U_g$  — напряжение дуги.

Размерный комплекс  $I / d$  является известным и широко применяется для обобщения вольт-амперных характеристик цилиндрических дуг [1,3]. Таким образом, как и следовало ожидать, размерные комплексы, определяющие подобие цилиндрических дуг, могут быть получены из критерия подобия дуг в потоке газа путем исключения  $G$ .

Обобщения [4] и ряд формул [1] для  $U_g$  получены с учетом лишь одного размерного комплекса  $I^2 / Gd$  в (2). Такие обобщения справедливы в узком диапазоне изменения  $R$  и  $K$ . Обобщения в виде

$$\frac{U_g d}{I} = A \left( \frac{I^2}{Gd} \right)^{-\alpha} \left( \frac{G}{d} \right)^{-\beta} \quad (A = \text{const}) \quad (5)$$



Фиг. 1. Вольт-амперные характеристики дуги в однокамерном плазматроне. Рабочая среда — воздух, полярность — обратная. Точка 1 —  $d = 1$  см,  $G = 12$  г/сек<sup>-1</sup>; 2 —  $d = 2$  см,  $G = 12$  г/сек<sup>-1</sup>; 3 —  $d = 3.5$  см,  $G = 12$  г/сек<sup>-1</sup>; 4 —  $d = 2$  см,  $G = 24$  г/сек<sup>-1</sup>; 5 —  $d = 3.5$  см,  $G = 24$  г/сек<sup>-1</sup>. Пунктирные кривые (1), (2), (3) соответствуют  $d = 3.5, 2$  и  $1$  см при  $G = 12$  г/сек<sup>-1</sup> и определены по формуле (7)

как было сделано в [1], расширяют область применимости обобщенных зависимостей и более полно отражают зависимость  $U_g$  от  $d$ . Однако зависимость  $U_g$  от  $I$  и  $d$  для ряда газов является более сложной, и формулы вида (5) с постоянными показателями степени для учета всех особенностей вольт-амперных характеристик также недостаточны. На фиг. 1 приведены вольт-амперные характеристики для различных значений диаметра дуговой камеры и расхода воздуха, показывающие эти особенности. Как видно, при малых токах величина  $U_g$  с ростом  $d$  возрастает, а при больших токах намечается тенденция к уменьшению  $U_g$  с ростом  $d$ . Аналогичное поведение дуги наблюдается и в водороде [5]. Поэтому показатели степени  $I$  и  $d$  в формулах должны быть переменными.

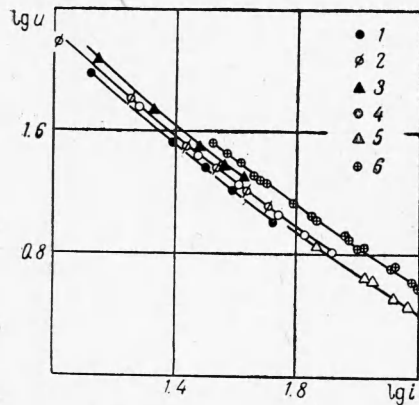
На фиг. 2 приведены графики зависимости  $u = U_g d / I$  от  $i = I / d$  при различных значениях  $G / d$  и  $pd$ , где хорошо видно расслоение по  $G / d$  и  $pd$ . Расслоение такого же порядка имеет место и при обобщении при помощи комплексов  $I^2 / Gd$ ,  $G / d$ ,  $pd$ . Пренебрежение этим расслоением может привести к большой погрешности при расчете  $U_g$ . Как видно, при постоянных  $G / d$  и  $pd$  зависимость  $\lg u$  от  $\lg i$  для воздуха не является линейной. Если в некотором диапазоне изменения параметров эту зависимость описать кривой второго порядка

$$\lg u = c - (\alpha_0 - \alpha \lg i) \lg i \quad (c = \text{const}, \alpha_0 = \text{const}, \alpha = \text{const})$$

а зависимость  $U_g d / I$  от  $G / d$  и  $pd$  считать степенной с постоянными показателями степени  $\beta$  и  $\gamma$ , то получится формула вида

$$\lg u = \lg A - (\alpha_0 - \alpha \lg i) + \beta \lg (G / d) + \gamma \lg (pd) \quad (6)$$

Обработка данных фиг. 2 в виде (6) для напряжения дуги в однокамерном плазматроне при обратной полярности приводит к следующему выражению:



Фиг. 2. Вольт-амперные характеристики дуги в однокамерном плазматроне. Рабочая среда — воздух, полярность — обратная;  $i = I/d$ ,  $a \text{ см}^{-1}$ ,  $u = U_g d / I$  в  $\text{см а}^{-1}$ ,  $p = 10 \text{ н см}^{-2}$ ; точки соответствуют значениям: 1 —  $d = 3.5 \text{ см}$ ,  $G = 8 \text{ г сек}^{-1}$ ; 2 —  $d = 3.5 \text{ см}$ ,  $G = 12 \text{ г сек}^{-1}$ ; 3 —  $d = 3.5 \text{ см}$ ,  $G = 24 \text{ г сек}^{-1}$ ; 4 —  $d = 2 \text{ см}$ ,  $G = 8 \text{ г сек}^{-1}$ ; 5 —  $d = 1 \text{ см}$ ,  $G = 4.1 \text{ г сек}^{-1}$ ; 6 —  $d = 1 \text{ см}$ ,  $G = 12 \text{ г сек}^{-1}$

$$U_g = 1.3 \cdot 10^4 G^{0.3} d^{-0.26} p^{0.04} i^{0.245} \lg i^{-1.312} b \quad (7)$$

$$10 < i < 10^{2.4} \text{ а см}^{-1}$$

$$2 < G / d < 12 \text{ г сек}^{-1} \text{ см}^{-1}$$

$$6 < pd < 40 \text{ н см}^{-1}$$

$$0.6 < d < 3.5 \text{ см}$$

$$30 < I < 200 \text{ а}$$

На фиг. 1 пунктирными линиями показаны значения  $U_g$ , определенные по формуле (7). Они близки к экспериментальным линиям.

Отметим еще один важный факт, связанный со структурой формулы (6). В том случае, когда безразмерное напряжение на дуге  $u_g$  выражается степенной зависимостью от определяющих критериев

$$U_g = A(c_d i)^{\alpha} R^{\beta} K^{\gamma}$$

верхняя граница устойчивости горения дуги в предположении, что напряжение источника питания  $U_b$  не зависит от тока, выражается формулой

$$U_{g \text{ max}} = \text{const } U_b$$

т. е. она не зависит от величины тока, что, вообще говоря, противоречит опыту.

Как нетрудно показать, верхняя граница области устойчивого горения дуги, определяемая взаимосвязью между  $U_g$  и  $I$  по формуле (6) и имеющая вид

$$U_{g \text{ max}} = U_b (1 + \alpha_0 - 2\alpha \lg i)^{-1}$$

представляет собой кривую линию, возрастающую с ростом тока, что количественно и качественно согласуется с экспериментальными данными [6].

Таким образом, учет нелинейности зависимости  $\lg u$  от  $\lg i$  позволяет описывать ряд особенностей вольт-амперных характеристик.

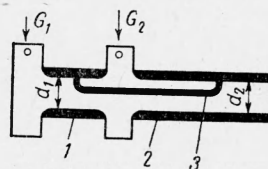
Направление влияния  $p$  на  $U_g$  в формуле (7) согласуется с данными [7]. Однако это влияние слабое, и для уточнения численного значения показателя степени  $p$  необходимы дальнейшие эксперименты, охватывающие изменение  $p$ , по крайней мере, на два порядка.

Многочисленные эксперименты показали, что повторяемость вольт-амперных характеристик дуги в одном и том же плазматроне при одинаковых внешних условиях осуществляется с точностью  $\pm 10\%$ . В наших экспериментах дуга в новой дуговой камере с чистыми поверхностями имела большее напряжение. С изменением состояния поверхности благодаря воздействию дугового пятна напряжение, как правило, уменьшалось. По-видимому, это объясняется образованием на поверхности камеры неровностей, создающих более благоприятные условия для шунтирования, следовательно, и для уменьшения средней длины дуги. Если учесть этот факт, то максимальное среднеквадратическое отклонение формулы (7) от экспериментальных данных, равное  $10\%$  в указанном диапазоне изменения параметров, можно считать удовлетворительным. Поскольку коэффициенты  $A, \alpha_0, \alpha, \beta, \gamma$  сами зависят от критериев подобия, в дальнейшем необходимо их определить в более широком диапазоне изменения параметров.

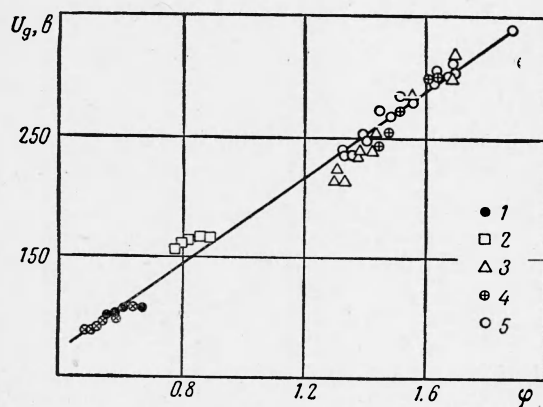
Одновременно с вольт-амперными характеристиками определялся тепловой к. п. д. плазматрона, который представляет собой отношение приращения энтальпии торможения газа в плазматроне к мощности дуги. Обработка данных для обратной полярности привела к формуле

$$\eta_- = -1 + \frac{2.52}{(Pd)^{0.05}} - 0.17 \lg \frac{I^2}{Gd}, \quad \frac{l}{d} = 30 \quad (8)$$

где  $l$  — длина дуговой камеры, а диапазон изменения остальных параметров указан ниже формулы (7). В приведенных экспериментах отношение  $l/d$  выбиралось исходя из того, чтобы при минимальном токе  $I_{\min}$  и максимальном расходе  $G_{\max}$  катодное пятно располагалось внутри дуговой камеры. Поскольку с ростом  $I$  и уменьшением  $G$  в указанном диапазоне длина дуги уменьшается, то при  $I > I_{\min}$  и  $G < G_{\max}$  макси-



Фиг. 3. Схема двукамерного плазматрона. 1 — внутренний электрод, 2 — выходной электрод, 3 — дуга,  $G_1$  и  $G_2$  — подача газа



Фиг. 4. Обобщенная вольт-амперная характеристика дуги в двукамерном плазматроне. Рабочая среда — аргон, полярность — прямая,  $p = 10 \text{ н см}^{-2}$  точки соответствуют значениям: 1 —  $d_2 = 0.8 \text{ см}$ ,  $G = 6.7 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 80-280 \text{ а}$ ,  $l = d_2 = 1 \text{ см}$ ,  $G = 6.6 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 88-200 \text{ а}$ ; 2 —  $d_2 = 1.6 \text{ см}$ ,  $G = 14 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 150-270 \text{ а}$ ; 3 —  $d_2 = 5 \text{ см}$ ,  $G = 105 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 560-2200 \text{ а}$ ; 4 —  $d_2 = 5 \text{ см}$ ,  $G = 160-165 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 800-2600 \text{ а}$ ; 5 —  $d_2 = 5 \text{ см}$ ,  $G = 124-130 \text{ г сек}^{-1}$ ,  $I = 590-2300 \text{ а}$ . Прямая линия соответствует формуле (11)

где  $h_0$  — удельная энтальпия торможения газа на входе в плазматрон, а  $U_g$  и  $\eta_-$  определяются из (7) и (8).

Формула (7) и известные условия устойчивости горения дуги позволяют определять необходимое напряжение источника питания и величину балластного сопротивления. Таким образом, на основании полученных эмпирических формул могут быть оценены характеристики однокамерного плазматрона и источника питания для него.

В случае двукамерного плазматрона режим его работы, кроме тока, расхода газа и геометрических размеров, зависит еще от соотношения расходов через отдельные

возможное значение к. п. д. (которое достигается при меньших значениях  $l/d$ ) несколько больше, чем это получается по формуле (8). Эксперименты показали, что в одном и том же плазматроне в пределах погрешностей измерений при положительной и отрицательной полярностях величины теплового к. п. д. совпадают. Это можно объяснить тем, что рост потерь за счет более высокой температуры в случае отрицательной полярности (из-за того, что  $U_g$  выше, чем при прямой полярности) компенсируется увеличением длины дуги по сравнению с прямой полярностью.

При заданных  $I, G, d$  осредненная по времени среднемассовая удельная энтальпия торможения газа на выходе из плазматрона  $h$  (температура газа на входе около  $290^\circ \text{ К}$ ) может быть определена из уравнения сохранения энергии

$$U_g I \eta_- + G h_0 = G h \quad (9)$$

камеры, т. е. от  $g = G_2 / G$ , где  $G = G_1 + G_2$  (см. фиг. 3). Поэтому для таких геометрически подобных плазматронов критериальное уравнение должно записываться в виде

$$\psi = \psi \left( \frac{c_4 I}{d_2}, \frac{c_2 G}{d_2}, \frac{c_3}{p d_2}, \frac{G_2}{G} \right) \quad (10)$$

Для проверки возможности обобщения вольт-амперных характеристик в двухкамерных плазматронах в виде (10) были проведены систематические измерения. При работе на аргоне были приняты следующие отношения:  $d_1 / d_2 = 1.4$ ,  $l_1 / d_1 = 6$ ,  $l_2 / d_2 = 16$ . Здесь  $l_1$  и  $l_2$  — соответственно длины электродов 1 и 2. Эксперименты проводились при постоянном значении  $g$  ( $g = 0.77 - 0.80$ ), и поэтому для обобщения данных для такого частного случая может быть использовано уравнение вида (4). Обработка данных показала, что и в этом случае имеется заметное расслоение зависимости  $\lg u$  от  $\lg i$  по значениям  $G / d_2$  и  $p d_2$ . Полученная формула для напряжения дуги в аргоне при прямой полярности, пренебрегающая второстепенными для этого случая особенностями вольт-амперных характеристик, имеет вид

$$U_g = 180 I^{-0.23} G^{0.33} d_2^{0.30} g \quad (11)$$

$$90 < i < 500 \text{ а см}^{-1}, \quad 7 < G/d_2 < 33 \text{ г сек}^{-1} \text{ см}^{-1}$$

$$0.8 < d_2 < 5 \text{ см}, \quad p = 10 \text{ н см}^{-2}, \quad 50 < I < 2600 \text{ а}$$

На фиг. 4 приведено сравнение формулы (11) с экспериментом, где  $\psi = I^{-0.23} G^{0.33} d_2^{0.30}$ , и сплошная линия определена по (11). Как видно из графика, максимальное отклонение экспериментальных точек от формулы (11) не превышает  $\pm 15\%$ . Это подтверждает вывод о возможности критериального обобщения вольт-амперных характеристик дуги в двухкамерных плазматронах в широком диапазоне изменения тока, расхода и размеров плазматрона.

Вышеизложенные материалы показывают, что при данном уровне знаний о процессах в одно- и двухкамерных плазматронах вихревой схемы метод обобщенных характеристик является эффективным средством для оценки параметров плазматронов при их проектировании.

Поступила 12 VII 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг. ПМТФ, 1965, № 2.
2. Sherman C., Yos J. M. Scaling laws for electric arcs subject to forced convection. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 4.
3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрическая дуга и термическая плазма, Изд. иностр. лит., 1961.
4. Кутателадзе С. С., Ясько О. И. Обобщение характеристик электродуговых подогревателей. Инж. физ. ж., 1964, № 4.
5. Воронин Б. Д., Золотов Б. В., Смелянский М. Я., Цирлин А. М., Цишевский В. П. Некоторые результаты исследования работы высоковольтного электродугового нагревателя водорода со стабилизацией дуги газовым потоком. Научно-техн. сб. «Электротермия», 1963, № 5.
6. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Смоляков В. Я. Исследование плазматрона с воздушной стабилизацией дуги. ПМТФ, 1961, № 6.
7. Eschenbach R. C., Bryson D. A., Sargent H. B., Sarlitto R. J., H. H. Troue. Characteristics of high voltage vortex-stabilized arc heaters. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1965, vol. NS-11, No. 1.

#### МОМЕНТЫ ИНТЕГРАЛА СТОЛКНОВЕНИЙ ДЛЯ МАКСВЕЛЛОВСКИХ МОЛЕКУЛ

**В. Д. Перминов, О. Г. Фридендер**

(Москва)

При решении различных задач кинетической теории газов часто используют максвелловскую модель взаимодействия между молекулами (сила отталкивания  $g$  обратно пропорциональна пятой степени расстояния между молекулами).

Этот закон взаимодействия значительно упрощает структуру интеграла столкновений и, в частности, позволяет вычислять в конечном виде моменты этого интеграла, которые необходимо знать при решении задач кинетической теории газов моментными методами. Ниже приводятся моменты четвертого и пятого порядков интеграла столкновений для максвелловских молекул.

Методы вычисления моментов и формулы для низших моментов можно найти в работах [1-3].