

УДК 533.9.02

ВЛИЯНИЕ УСТУПА В ВЫХОДНОМ ЭЛЕКТРОДЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДВУХКАМЕРНОГО ПЛАЗМОТРОНА

А.С. АНЬШАКОВ¹, Э.К. УРБАХ¹, А.Э. УРБАХ¹, В.А. ФАЛЕЕВ¹,
М.В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО², М.А. ШЕЛЕСТ²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

Экспериментально исследованы электрические и тепловые характеристики двухкамерного плазмотрона со ступенчатым выходным электродом. Получены формулы для определения напряжения на дуге, КПД плазмотрона и длины узкой части выходного электрода. Показано, что такой плазмотрон более эффективен, чем плазмотрон с гладким выходным электродом.

ВВЕДЕНИЕ

Практика использования двухкамерных электродуговых плазмотронов с гладкими медными цилиндрическими (трубчатыми) электродами (рис. 1) показала их высокую надежность при нагреве кислородсодержащих сред. В этих плазмотронах внутренний электрод, как правило, служит катодом, а выходной — анодом [1]. Рабочий газ в плазмотрон подается через закруточные кольца. Столб дуги стабилизируется вихревым потоком и располагается на оси электродов. В полости катода радиальный участок дуги горит в зоне встречи потоков G_1 и G_2 , выработка электрода — кольцевая (зона А). В выходном электроде анодный участок дуги горит в зоне шунтирования дуги В. С ростом тока зона В смещается в сторону внутреннего электрода, длина дуги сокращается, напряжение на дуге падает (рис. 2, кривая 1). Длина участка С, являющегося, по существу, холодильником, с ростом тока увеличивается, потери тепла возрастают. Одновременное падение напряжения на дуге и рост потерь тепла в выходной электрод приводят к тому, что при изменении тока в 3 раза полезная мощность плазмотрона изменяется всего

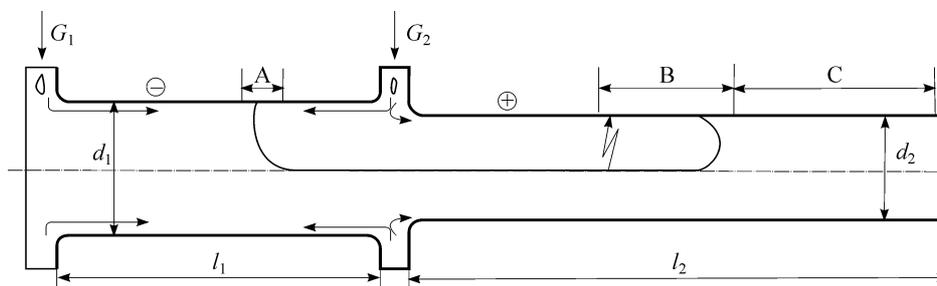


Рис. 1. Схема двухкамерного плазмотрона.

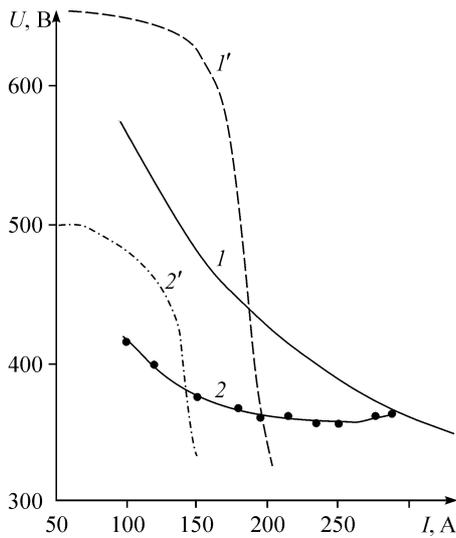


Рис. 2. 1, 2 — вольт-амперные характеристики дуги.

$d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $G_1 + G_2 = 12 \cdot 10^{-3}$ кг/с.
1 — расчет по формуле (1), анод гладкий, 2 — эксперимент, анод ступенчатой геометрии.

I' , $2'$ — вольт-амперные характеристики источников питания.

в 1,5 раза, а тепловой КПД невысок и, например, при токе 300 А не превышает 60 %.

Напомним, что расчет напряжения на дуге в двухкамерном плазматроне проводится по формуле [1]

$$U = 1360(I^2 / Gd_2)^{-0,2}(G/d_2)^{0,25}(pd_2)^{0,35}. \quad (1)$$

Здесь I — ток дуги, А, $G = G_1 + G_2$ — расход воздуха, кг/с, d_2 — диаметр выходного электрода, м, p — давление, Па.

Расчет теплового КПД плазматрона проводится по формуле из работы [1]

$$(1 - \eta) / \eta = 1,08 \cdot 10^{-4} (I^2 / Gd_2)^{0,27} (pd_2)^{0,3} (G/d)^{-0,27} (\bar{l})^{0,5}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{l} = l_1/d_1 + l_2/d_2$, l_1 , d_1 — длина и диаметр внутреннего электрода, м, l_2 , d_2 — длина и диаметр выходного электрода, м.

ДВУХКАМЕРНЫЙ ПЛАЗМОТРОН С ВЫХОДНЫМ СТУПЕНЧАТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Представленный на рис. 3 плазматрон отличается от двухкамерного (см. рис. 1) тем, что выходной электрод выполнен ступенчато расширяющимся.

Ступенчатый электрод используется в однокамерных плазматронах (рис. 4) для получения участка с возрастающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [2]. Это происходит за счет срыва потока горячего газа за уступом и его примыкания к стенке в ограниченной области широкой части анода. Анодный участок дуги также примыкает к электроду в этой области, что обеспечивает фиксацию средней

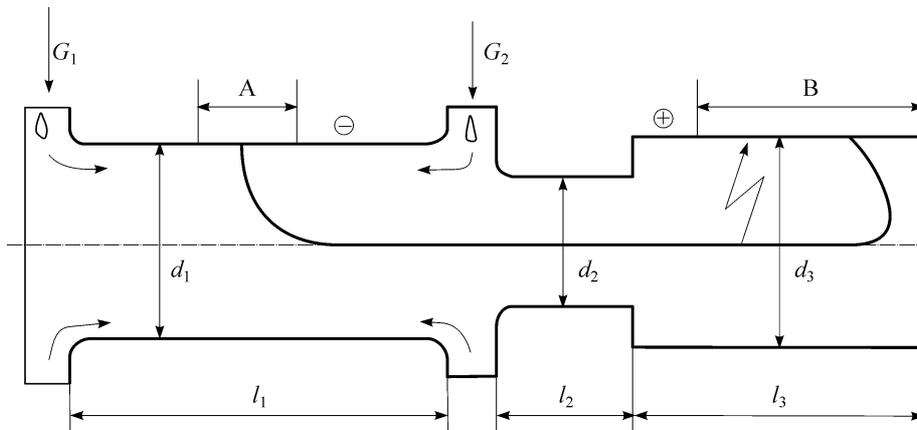


Рис. 3. Двухкамерный плазматрон со ступенчато расширяющимся выходным электродом.

длины дуги при изменении тока. При фиксированной длине дуги на вольт-амперной характеристике реализуется восходящая ветвь А (см. рис. 4), что приводит к существенному повышению устойчивости горения дуги.

Аналогичное явление наблюдается и в двухкамерном плазмотроне со ступенчатым анодом (см. рис. 2, кривая 2). Но здесь оно выражено значительно меньше. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, из-за высокой турбулентности газового потока участок дуги, находящийся во внутреннем электроде d_1 , имеет слабо падающую вольт-амперную характеристику. Во-вторых, дуга на входной части канала d_2 в отличие от однокамерного плазмотрона имеет большой тепловой слой. Из-за этого шунтирование дуги в выходном электроде происходит раньше, чем в однокамерном плазмотроне, длина участка дуги l_2 невелика и вклад его в возрастание $U-I$ характеристики также невелик. Однако средняя длина дуги фиксирована и поэтому напряжение на дуге с ростом тока изменяется существенно меньше, чем в двухкамерном плазмотроне с гладким анодом (см. рис. 2, кривые 1 и 2).

Исследования вольт-амперных характеристик дуги и эрозии электродов двухкамерных плазмотронов с уступом проводились на трех плазмотронах различной мощности. Электропитание плазмотронов осуществлялось от источников питания постоянного тока с $U_{xx} = 1300, 510$ и 330 В. Это обеспечило довольно широкий диапазон изменения тока дуги, расходов воздуха и диаметров электродов. Суммарный расход воздуха $G_1 + G_2$ изменялся в диапазоне от $4 \cdot 10^{-3}$ до $16 \cdot 10^{-3}$ кг/с, диаметр катода d_1 — от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ м, d_2 — от $2,0 \cdot 10^{-2}$ до $3,8 \cdot 10^{-2}$ м, ток дуги I — от 100 до 500 А, давление газа p — $(1 \div 1,5) \cdot 10^5$ Па.

Проведенные эксперименты показали, что при прямой полярности подключения электродов анодный участок дуги горит за уступом только до определенного значения тока I_n . При превышении этого тока дуга скачком переходит на узкий участок d_2 электрода на то место, которое она занимала бы при этом токе в плазмотроне с гладким электродом. Этот переход приводит к снижению напряжения на дуге и уменьшению ресурса анода. Поэтому для заданного диапазона тока при эксплуатации плазмотрона важно правильно рассчитать длину l_2 узкой части анода.

Длина l_2 соответствует длине осевого участка дуги, горящего в узкой части d_2 выходного электрода (см. рис. 3). Поскольку напряжение дуги пропорционально ее длине $L \approx l_1/2 + l_2 + l_3/2$, а l_2 является частью L , то для расчета l_2 можно использовать ту же структурную формулу, что и для расчета напряжения дуги в плазмотроне с гладким электродом (1). Эти формулы будут отличаться только величиной численного коэффициента k перед формулой. Примем

$$l_2 = k(I_n^2 / Gd_2)^{-0,2} (G / d_2)^{0,25} (pd_2)^{0,35}.$$

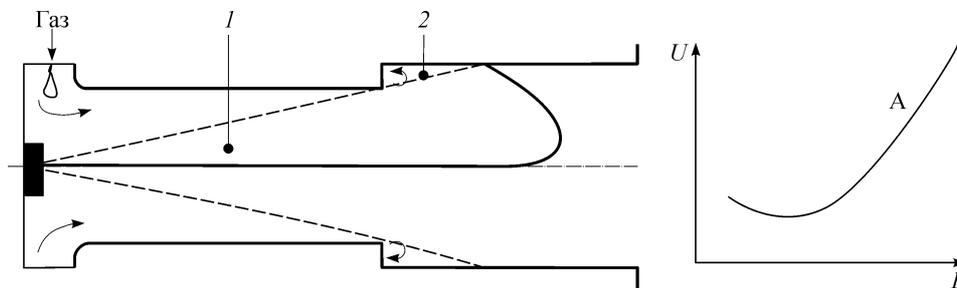


Рис. 4. Схема однокамерного плазмотрона со ступенчатым выходным электродом и качественный вид $U-I$ характеристики.

А — возрастающий участок ВАХ дуги, 1 — тепловой слой дуги, 2 — срыв потока на уступе.

Коэффициент k определен расчетно-экспериментальным путем. Комплекс $(I_n^2 / Gd_2)^{-0,2} (G / d_2)^{0,25} (pd_2)^{0,35}$ рассчитывался, а в качестве l_2 взяты значения экспериментальных данных, полученных при испытании плазматронов с различными d_1 , d_2 и G . Полученное значение k равно 0,231. Таким образом, расчет l_2 можно с достаточной для практики точностью проводить по формуле

$$l_2 = 0,231(I_n^2 / Gd_2)^{-0,2} (G / d_2)^{0,25} (pd_2)^{0,35}. \quad (3)$$

Выбор значения тока I_n довольно произволен и обусловлен необходимой мощностью плазматрона, но I_n не должен превышать значение критического тока $I_{кр}$, при превышении которого внутренний электрод-катод будет быстро разрушаться. В [3] показано, что для обеспечения длительного ресурса работы медного цилиндрического катода в воздушной среде необходимо выполнить следующие условия:

$$G / pd_1 \geq 2 \cdot 10^{-6} \text{ и } I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G / p}. \quad (4)$$

Неравенство $G / pd_1 \geq 2 \cdot 10^{-6}$ позволяет при заданном диаметре электрода d_1 оценить минимальный расход воздуха $G = G_1 + G_2$, который необходимо подавать в плазматрон. В этом случае при $p = 10^5$ Па величина удельной эрозии $\bar{G} \leq 2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл.

При $I < I_n < I_{кр}$ средняя длина дуги в двухкамерном плазматроне со ступенчатым электродом фиксирована. Расчет напряжения на дуге в таком плазматроне можно проводить по формуле

$$U = 72(I^2 / Gd_2)^{-0,05} (G / d_2)^{0,25} (pd_2)^{0,35}, \quad (5)$$

а тепловой КПД по формуле

$$(1 - \eta) / \eta = 9 \cdot 10^{-5} (I^2 / Gd_2)^{0,1} (G / d_2)^{-0,27} (pd_2)^{0,3} (\bar{l})^{0,5}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{l} = l_1 / d_1 + l_2 / d_2 + l_3 / d_3$. Уравнения (3), (5), (6) при максимальном отклонении экспериментальных точек от расчетных кривых, меньшем 12 %, справедливы в широком диапазоне изменения комплексов $I^2 / Gd = 1 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^9$ А²·с/кг·м, $G / d = 2 \cdot 10^{-1} \div 8 \cdot 10^{-1}$ кг/с·м, $pd = 2 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ Н/м.

На рис. 5 представлено сравнение тепловых КПД плазматронов с гладким (кривая 1) и ступенчатым (кривая 2) выходными электродами. Видно, что КПД плазматрона с гладким электродом заметно ниже, чем плазматрона со ступенчато расширяющимся, поэтому плазматрон с расширяющимся электродом более экономичен, чем с гладким. Кроме того, для электропитания этого плазматрона можно использовать источник с меньшим напряжением (см. рис. 2, кривые 1' и 2'), что повышает электрический КПД системы плазматрон–источник питания.

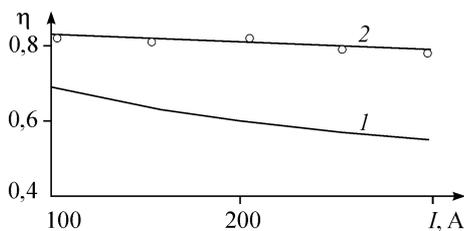


Рис. 5. Зависимость теплового КПД плазматрона от тока.

$d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $G = 12 \cdot 10^{-3}$ кг/с. 1 — плазматрон с гладким электродом (расчет по формуле (2)), 2 — плазматрон со ступенчатым электродом ($d_3 = 44 \cdot 10^{-3}$ м, расчет по формуле (6)), о — эксперимент.

Для пользователя плазмотроном со ступенчатым выходным электродом полезно знать его возможности. В частности:

1. Какую среднемассовую температуру можно получить на выходе из плазмотрона?

2. Каким ресурсом может обладать плазмотрон и как он зависит от исходных параметров?

Мощность плазмотрона и среднемассовая температура плазмы регулируются изменением тока I , расхода воздуха G , размерами электродов $l_1, d_1, l_2, d_2, l_3, d_3$ и давлением p . Ресурс также зависит от этих параметров. На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики дуги плазмотрона со ступенчатым выходным электродом. Здесь же пунктиром нанесены линии равных мощностей. Они показывают, что мощность плазмотрона при изменении тока может изменяться в довольно больших пределах. Используя эти данные и результаты измерения теплового КПД плазмотрона, а также справочные данные по теплофизическим свойствам воздуха, можно определить зависимость среднемассовой температуры плазмы от мощности плазмотрона. Этот же результат можно получить расчетным путем, используя формулы (3)–(6) еще на стадии проектирования плазмотрона. Вариация тока, геометрических и расходных параметров плазмотрона показывает, что при максимальном токе $I = I_n$ и минимальном расходе газа $G = 2 \cdot 10^{-6} p d_1$ (см. формулу (4)) среднемассовая температура плазмы на выходе из плазмотрона не превышает 4600 К. С ростом расхода G температура плазмы падает. Например, при токе 300 А (см. рис. 6) с увеличением расхода газа с $8 \cdot 10^{-3}$ до $12 \cdot 10^{-3}$ кг/с среднемассовая температура плазмы снижается с 4600 до 3500 К.

Ресурс непрерывной работы плазмотрона определяется уровнем эрозии катода и массой металла, которая может быть выработана без ущерба для работоспособности плазмотрона. Для характеристики скорости износа электродов в научной литературе широко используется величина удельной эрозии

$$\bar{G} = \Delta m / It. \quad (7)$$

Здесь: Δm — выработанная масса электрода, кг, I — ток дуги, А, t — время работы плазмотрона, с. Из уравнения (7) следует, что ресурс работы определяется формулой

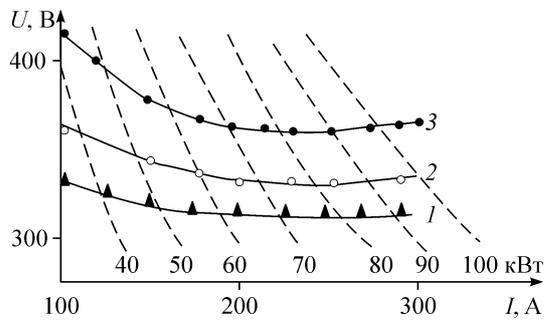
$$t = \Delta m / \bar{G} I, \quad (8)$$

которая показывает, что электрод будет работать тем дольше, чем больше Δm и чем меньше его удельная эрозия \bar{G} .

При равных расходах G_1 и G_2 зона выработки катода относительно узкая. Перераспределяя расходы G_1 и G_2 , оставляя их сумму неизменной, можно регулировать ширину выработки электрода, увеличивая тем самым его ресурс. Перераспределение расходов можно осуществлять с помощью несложного электромеханического устройства — регулятора расходов газа. При одинаковых кольцах закрутки и перераспреде-

Рис. 6. Вольт-амперные характеристики дуги $d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$, $d_3 = 44 \cdot 10^{-3}$ м.

$G_1 = G_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ (1), $5 \cdot 10^{-3}$ (2), $6 \cdot 10^{-3}$ (3) кг/с,
 $\Sigma G = 8 \cdot 10^{-3}$ (1), $10 \cdot 10^{-3}$ (2), $12 \cdot 10^{-3}$ (3) кг/с.



лении расходов G_1 и G_2 на $\pm 10\%$ ширина A зоны выработки электрода (см. рис. 3) составляет значительную величину $(1+1,2)d_1$, что позволяет обеспечить высокий ресурс непрерывной работы катода. Примем, что величина расхода газа $G = G_1 + G_2$ через плазмотрон обеспечивает выполнение условий (4), а выработка электрода за счет аэродинамического сканирования дугового пятна имеет вид, представленный на рис. 7. В этом случае допустимая масса выработки электрода $\Delta m = \frac{\pi}{4}l(d_b^2 - d_1^2)\rho$, а время работы электрода $t_1 = \frac{\pi}{4}l(d_b^2 - d_1^2)\rho / \bar{G}I$. Обозначим $d_b - d_1 = h$, здесь h — глубина выработки электрода. Тогда

$$t = \frac{\pi}{4}l(4d_1h + 4h^2)\rho / \bar{G}I. \quad (9)$$

Формула (9) показывает, что в первом приближении срок службы электрода пропорционален длине l в области газодинамического сканирования дугового пятна, диаметру электрода d_1 , глубине h выработки электрода и обратно пропорционален току I . При сканировании суммарная площадь теплоотвода от дугового пятна в несколько раз больше, чем без сканирования. Это позволяет использовать электроды с большой толщиной стенки, при этом глубина h выработки электрода может быть 10 мм и более. Но по мере увеличения глубины h во время работы плазмотрона будет падать окружная компонента скорости V_ϕ вращающегося газа, скорость дугового пятна снижаться, а величина удельной эрозии \bar{G} станет повышаться. Вследствие этого для обеспечения максимального ресурса электрода в плазмотроне нужно изначально подавать расход газа больше, чем это следует из уравнения $G/pd_1 = 2 \cdot 10^{-6}$. Поскольку скорость V_ϕ должна оставаться на заданном уровне $V_\phi \sim G/pd_1 = G + \Delta G / p(d_1 + 2h)$, то

$$G + \Delta G = G(d_1 + 2h/d_1). \quad (10)$$

Это равенство удобнее представить в виде

$$G + \Delta G = 2 \cdot 10^{-6} p(d_1 + 2h). \quad (11)$$

Для проверки влияния глубины h выработки катода на величину его удельной эрозии было проведено четыре эксперимента. В первом эксперименте использовался внутренний электрод диаметром $d_1 = 40$ мм. При этом расход воздуха

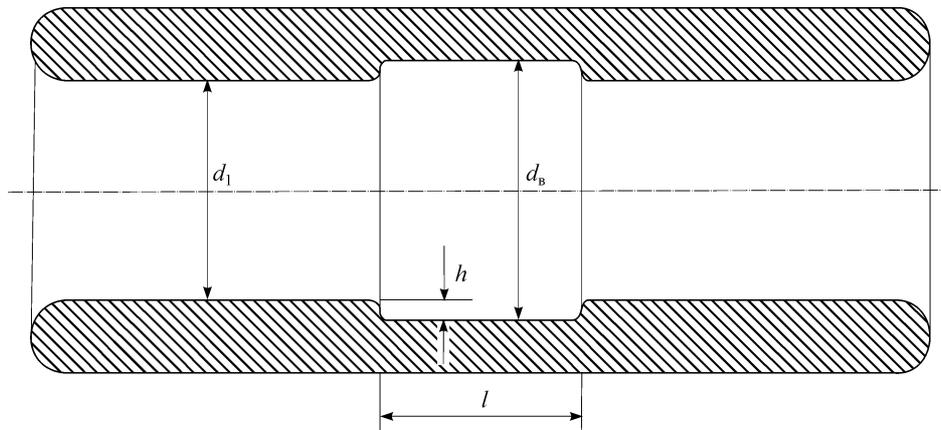


Рис. 7. Вид выработки внутреннего электрода.

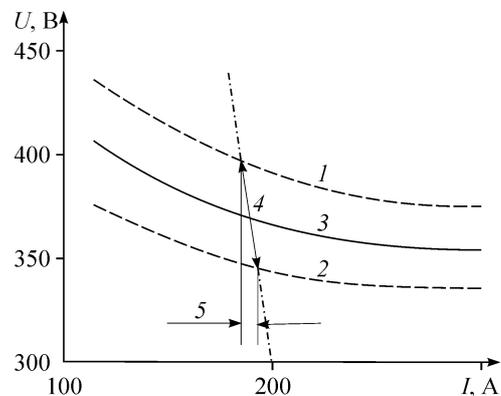
составлял $G = 2 \cdot 10^{-6} p d_1 = 8 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Эксперимент длился 3 часа, ток дуги составлял 250 А, электрод взвешивался до и после эксперимента. Величина удельной эрозии $\bar{G} = \Delta m / It = 1,7 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл. Ширина зоны выработки примерно равна 60 мм. После этого эксперимента в электроде была сделана проточка длиной $l = 60$ мм с закругленными краями и глубиной $h = 5$ мм (см. рис. 7). В этом эксперименте расход газа также составлял $8 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Запуск длился 2 часа. Как и ожидалось, величина удельной эрозии повысилась до $G = 3,3 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл. В третьем эксперименте расход газа был, согласно формуле (11), увеличен до $10 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Запуск длился 3 часа. Уровень эрозии понизился до $1,8 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл. Ширина зоны выработки составляла ≈ 55 мм. В четвертом эксперименте ($\Delta t = 2$ часа) ширина зоны выработки практически не изменилась, величина удельной эрозии \bar{G} осталась на прежнем уровне. Расчет по формуле (9) показывает, что при $l = 60 \cdot 10^{-3}$ м, $d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $I = 250$ А ресурс электрода составит ≈ 500 часов.

В проведенных экспериментах частота газодинамического сканирования пята дуги составляла $f = 0,1$ Гц. Ступенчатый выходной электрод при этом взвешивался два раза — до и после экспериментов. Общее время работы анода составило 10 часов. Величина удельной эрозии $\bar{G} = 5,8 \cdot 10^{-10}$ кг/Кл. В работе [4] для оценки ресурса анода предложено сложный профиль эродированной поверхности анода в меридиональном сечении заменить треугольным. В этом случае объем эродированного материала будет равен $V_{\text{эп}} = 0,5\pi h_{\text{эп}}(d_3 + 2/3 h_{\text{эп}})$. Длина эродированной зоны составит $(2 \div 3)d_3$, глубина зоны $h_{\text{эп}}$ зависит от толщины стенки электрода. Примем $\Delta l_{\text{эп}} = 2d_3 = 9 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{\text{эп}} = 10^{-2}$ м, $\rho = 8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $\bar{G} = 5,8 \cdot 10^{-10}$ кг/Кл, $I = 250$ А. При этих допущениях время непрерывной работы оценивался величиной $t = \rho V_{\text{эп}} / \bar{G} I = 1250$ ч.

Проведенные оценки времени непрерывной работы электродов при использовании регулятора расходов газа показали, что ресурс двухкамерного плазмотрона с уступом достаточно большой. Однако при использовании регулятора длина дуги непрерывно меняется, соответственно меняется напряжение на дуге (рис. 8). Ток при питании дуги от тиристорного источника изменяется незначительно. Процентное отклонение мощности дуги от среднего значения зависит от базового уровня напряжения на дуге, рассчитанного по уравнению (5). Чем больше напряжение на дуге, тем меньше колебания мощности. В частном случае, представленном на рис. 8, мощность дуги изменяется на $\pm 6\%$. Поэтому регулятор расходов газа целесообразно использовать только в тех случаях, когда колебания мощности не влияют на технологический процесс, например, при утилизации техногенных образований и отходов.

Рис. 8. Границы изменения напряжения на дуге при работе плазмотрона с регулятором. $\Sigma G = 12$ г/с.

1 — верхняя граница напряжения, 2 — нижняя граница, 3 — среднее напряжение на дуге, 4 — изменение напряжения и тока при фиксированном положении ручки регулятора тока, 5 — амплитуда изменения тока за один оборот регулятора.



ВЫВОДЫ

1. Показано, что двухкамерный плазмотрон со ступенчатым выходным электродом за счет фиксации средней длины дуги имеет более высокий тепловой КПД, чем плазмотрон с гладкими электродами.

2. Получены обобщенные формулы для расчета параметров разрядной камеры модифицированного плазмотрона ещё на стадии его проектирования.

3. Даны практические рекомендации по обеспечению длительного ресурса работы электродов плазмотрона с учетом соотношений (4) и аэродинамического сканирования радиального участка дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука, 1975. — 298 с.
2. Аньшаков А.С., Жуков М.Ф., Сазонов М.И., Тимошевский А.Н. Исследование плазмотрона с восходящими вольт-амперными характеристиками дуги // Изв. Сиб.отд. АН СССР, Сер. техн.наук, 1970. — № 8, вып. 2. — С. 3–11.
3. Аньшаков А.С., Быков А.Н., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Взаимосвязь эрозионных процессов с аэродинамикой закрученного потока в цилиндрическом электроде плазмотрона // Теплофизика и аэромеханика, 2002. — Т. 9, № 4. — С. 623–632.
4. Апфель П. Теоретическая механика. Т. 1. — М.: Физматгиз, 1960. — 516 с.

Статья поступила в редакцию 4 июля 2006 г.