

Исследование энергетических характеристик в электродуговом плазмотроне с выходным ступенчатым электродом*

А.С. АНЬШАКОВ, П.В. ДОМАРОВ

Получены обобщенные формулы в критериальном виде для расчета энергетических параметров и разрядной камеры плазматрона. Приведены результаты расчета и экспериментальных данных для теплового коэффициента полезного действия и вольт-амперных характеристик электродугового плазматрона с выходным ступенчатым электродом.

Ключевые слова: электродуговой плазмотрон, вольт-амперные характеристики, ступенчатый электрод, тепловой коэффициент полезного действия.

ВВЕДЕНИЕ

Для стационарного нагрева газовых сред до высоких температур $(3\div 10)\cdot 10^3$ K в научных исследованиях и промышленных технологиях широко используются электродуговые плазмотроны. Они позволяют эффективно реализовать химические и металлургические процессы, создавать малоотходные технологии и комплексную переработку сырья, получать материалы с заданными физико-химическими свойствами, существенно уменьшать металлоемкость оборудования.

К числу новых областей применения низкотемпературной плазмы относится использование плазмотронов для обезвреживания и уничтожения муниципальных, техногенных и токсичных отходов. Дальнейшее расширение области применения низкотемпературной плазмы и повышение эффективности использования электродуговых плазмотронов будет определяться, главным образом, успехами в разработке надежных и простых в обслуживании технологических плазмотронов с высоким ресурсом работы электродов [1].

Практика использования двухкамерных электродуговых плазмотронов с гладкими медными цилиндрическими (трубчатыми) электродами показала их высокую надежность при нагреве кислородсодержащих сред. В этих плазмотронах внутренний электрод, как правило, служит катодом, а выходной – анодом [2].

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 двух потоков плазмообразующего газа. В выходном электроде анодный участок дуги горит в зоне шунтирования дуги. С ростом тока эта зона смещается в сторону внутреннего электрода, длина дуги сокращается, напряжение на дуге падает. При этом потери тепла в выходном электроде возрастают. Одновременное падение напряжения на дуге и рост потерь тепла, как показывает практика, приводят к тому, что при изменении тока в три раза полезная мощность плазматрона изменяется всего в 1,5 раза, а тепловой КПД, например, при токе 300 А не превышает 65÷70 %.

* Статья получена 17 января 2013 г.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Двухкамерный плазмотрон с выходным ступенчатым электродом

Представленная на рис. 1 конструктивная схема плазмотрона отличается от двухкамерного тем, что выходной электрод выполнен ступенчато расширяющимся [3]. Ступенчатый электрод используется в однокамерных плазмотронах для получения возрастающей вольт-амперной характеристикой (ВАХ) дуги [2]. В таком аноде за уступом происходит срыв потока и примыкание горячего газа к стенке в ограниченной области широкой части анода (обозначено пунктиром). Анодный участок дуги также примыкает к электроду в этой области (здесь зона преимущественного шунтирования дуги), что обеспечивает фиксацию средней длины дугового разряда при изменении тока. Вследствие этого крутизна падения напряжения на дуге уменьшается и появляется участок с возрастающими ВАХ дуги.

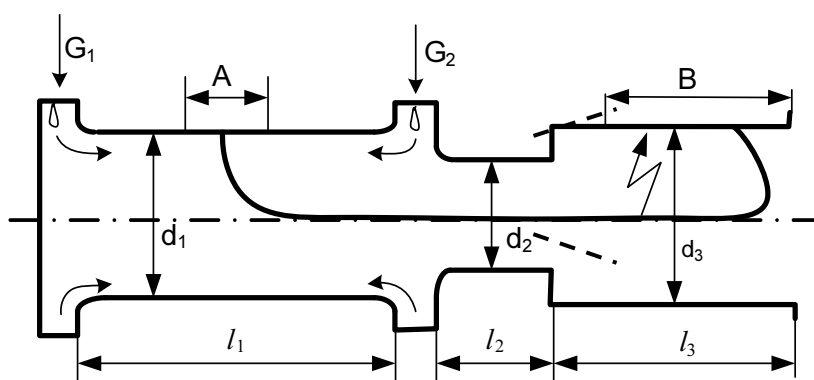


Рис. 1. Схема двухкамерного плазмотрона со ступенчато расширяющимся выходным электродом

Аналогичное явление наблюдается и в двухкамерном плазмотроне со ступенчатым выходным электродом-анодом (рис. 1). Но здесь оно выражено значительно меньше, однако средняя длина дуги фиксирована, и поэтому напряжение на дуге с ростом тока изменяется существенно меньше, чем в двухкамерном плазмотроне с трубчатым анодом. При этом соотношение $d_1/d_2 \geq 1,4$, $d_3/d_2 \geq 1,5 \div 1,8$.

Местоположение радиального участка дуги во внутреннем электроде определяется соотношением расходов G_1 и G_2 . При имеющихся пульсациях давления и расходах газа эрозия электрода происходит в зоне А (рис. 1). Электроды плазмотрона интенсивно охлаждаются водой.

Электрическая схема

Экспериментальные исследования плазмотрона проводились на стенде Института теплофизики СО РАН. Электрическая схема установки приведена на рис. 2.

Источником электропитания является неуправляемый выпрямитель, собранный на диодах по схеме Ларионова, с напряжением холостого хода $U_{xx} = 1300$ В. Для регулирования тока дугового разряда применяется балластное сопротивление R_b от 1 до 10 Ом в виде водяного реостата «труба в трубе». Для обеспечения видимого разрыва цепи электропитания применяется выключатель нагрузочный (ВНП).

Запуск плазмотрона осуществляется высоковольтным (~ 10 кВ) высокочастотным (~ 10 кГц) осциллятором. Измерения тока и напряжения дугового разряда проводятся стрелочными милливольтметрами типа М105 и М106/1 соответственно. Приборная погрешность измерений составляет $\pm 1\%$. Измерения расходов воды и плазмообразующего воздуха осуществляется ротаметрами типа РС-7. Точность измерений указанных параметров не превышает 2% .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЯ

Вольт-амперные характеристики дуги

На рис. 3 приведены ВАХ дуги в исследованном диапазоне расходов воздуха и геометрических размеров электродов.

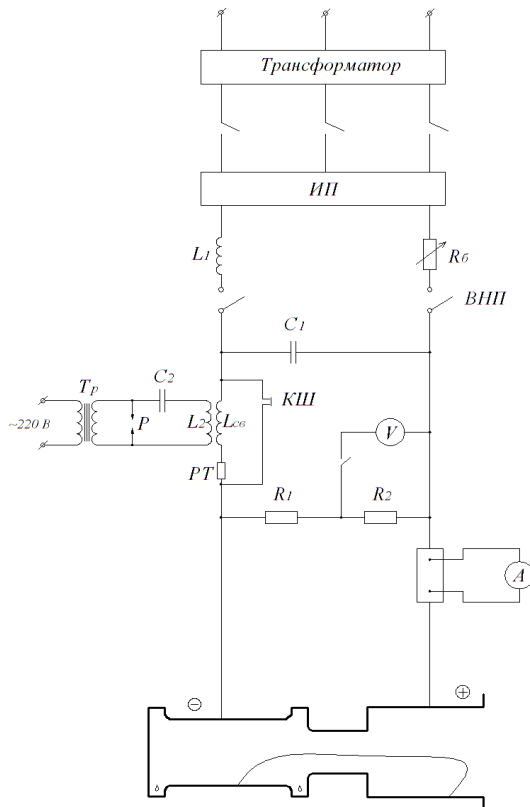


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки

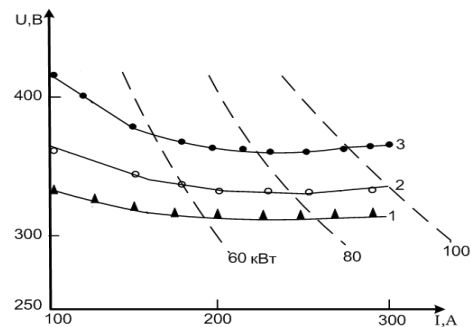


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги:
 $d_1 = 40$ мм, $d_2 = 28$ мм; 1 – $G_1 = G_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с;
 2 – $G_1 = G_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3 – $G_1 = G_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Видно, что с уменьшением тока разряда напряжение на дуге увеличивается. При $I \geq 200$ А напряжение практически не зависит от силы тока и имеет тенденцию к росту. Как показывают линии равных мощностей, плазмотрон устойчиво работает в области мощностей 40÷100 кВт

Экспериментальные данные по ВАХ дуги аналогично с [2] обобщены в критериальной форме (все параметры в системе СИ) [3]:

$$U = 72(I^2 / Gd_2)^{-0,05} (G / d_2)^{0,25} \cdot (pd_2)^{0,35}. \quad (1)$$

В исследованном диапазоне изменений параметров и комплексов сходимость расчетных и экспериментальных данных не превышает 7 %.

Тепловой коэффициент полезного действия

Тепловой КПД плазмотрона η_T определяется величиной тепловых потерь в электродах Q_n . Измерения Q_n со всех водоохлаждаемых элементов конструкции плазмотрона выполнены калориметрическим методом. Расчет η_T производился по формуле

$$Q_n = c_p G_{\text{ж}} (T_{\text{г}} - T_{\text{х}}) \text{ и } \eta_m = 1 - \frac{Q_n}{P},$$

где c_p – теплоемкость воды; $G_{\text{ж}}$ – расход воды; P – мощность плазмотрона; $T_{\text{г}}$ и $T_{\text{х}}$ – температуры воды на входе и выходе соответственно.

На рис. 4 представлено сравнение тепловых КПД плазмотронов с гладким выходным электродом (1) и со ступенчатым (2).

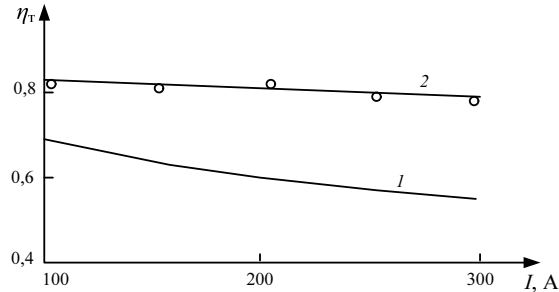


Рис. 4. Зависимость теплового КПД плазмотрона от тока:
 $d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $G = 12 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 1 – плазмотрон с гладким электродом (расчет [2]); 2 – плазмотрон со ступенчатым электродом (расчет по формуле (2))

Экспериментальные данные по η_T обобщены в критериальном виде по формуле:

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

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

Видно, что КПД плазмотрона со ступенчатым электродом за счет оптимизации длины выходного электрода заметно превышает КПД плазмотрона с трубчатым электродом.

Общие замечания

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. Вариация тока, геометрических и расходных параметров плазмотрона показывает, что при максимальном токе $I = I_n$ и минимальном расходе газа среднемассовая температура плазмы на выходе из плазмотрона не превышает 4600 К. С ростом расхода G температура плазмы падает. Например, при токе 300 А с увеличением расхода газа с $8 \cdot 10^{-3}$ кг/с до $12 \cdot 10^{-3}$ кг/с среднемассовая температура плазмы снижается с 4600 К до 3500 К.

Выбор значения тока I_n достаточно произволен и обусловлен необходимой мощностью плазмотрона, но I_n не должен превышать значение критического тока $I_{кр}$, при превышении которого внутренний электрод-катод будет быстро разрушаться. В [1, 4] показано, что для обеспечения длительного ресурса работы медного цилиндрического катода в воздушной среде необходимо выполнить следующие условия:

$$G / pd_1 \geq 2 \cdot 10^{-6} \text{ и } I < I_{кр} = 1,6 \cdot 10^6 \sqrt{G / p}, \quad (3)$$

где G , кг/с; p , Па; d , м; I , А.

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 плазмотрон. В этом случае при $p = 10^5$ Па величина удельной эрозии катода не будет превышать $\bar{G} \approx 2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены обобщенные формулы в критериальном виде для расчета энергетических параметров плазматрона, которые необходимы для создания промышленных образцов плазмогенераторов подобных конструктивных схем. Показано, что двухкамерный плазматрон со ступенчатым выходным электродом за счет фиксации средней длины дуги имеет более высокий тепловой КПД, чем плазматрон с гладкими электродами.

Авторы благодарят доктора технических наук Урбаха Э.К. и к.т.н. Урбаха А.Э. за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Чердниченко В.С. Плазменные электротехнологические установки: учебник для ВУЗов / В.С. Чердниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 602 с.
- [2] Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.
- [3] Аньшаков А.С. Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плазматрона / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13. – № 3. – С. 493–500.
- [4] Аньшаков А.С. Взаимосвязь эрозионных процессов с аэродинамикой закрученного потока в цилиндрическом электроде плазматрона / А.С. Аньшаков, А.Н. Быков, А.Н. Тимошевский, Э.К. Урбах // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – Т. 9. – № 4. – С. 623–632.

REFERENCES

- [1] Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. Plazmennye jelektrotehnologicheskie ustanovki: uchebnik dlja VUZov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2008. – 602 s.
- [2] Zhukov M.F., Koroteev A.S., Urjukov B.A. Prikladnaja dinamika termicheskoj plazmy. – Novosibirsk: Nauka, 1975. – 298 s.
- [3] An'shakov A.S., Urbah Je.K., Urbah A.Je. i dr. Vlijanie ustupa v vyhodnom jelektrode na jeffektivnost' raboty dvuhkammerogo plazmotrona // Teplofizika i ajeromehanika, 2006. – T. 13, N 3. – S. 493–500.
- [4] An'shakov A.S., Bykov A.N., Timoshevskij A.N., Urbah Je.K. Vzaimosvjaz' jerozionnyh processov s ajerodinamikoj zakruchennogo potoka v cilindricheskom jelektrode plazmotrona // Teplofizika i ajeromehanika, 2002. – T. 9, № 4. – S. 623–632.

Аньшаков Анатолий Степанович, доктор технических наук, профессор ИТ СО РАН. Основное научное направление исследований – ресурсо- и энергосберегающие природоохранные электротехнологии. Имеет 96 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Домаров Павел Вадимович, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основное научное направление исследований – ресурсо- и энергосберегающие природоохранные электротехнологии. Имеет 14 публикаций. E-mail: Domaroff@yandex.ru

A.S. Anshakov, P.V. Domarov

Investigation of the energy characteristics in plasma with a stepped electrode output

The generalized form of the formula in the criteria for calculating the energy performance of the discharge chamber and the plasma torch. The results of calculations and experimental data for the thermal efficiency and the current-voltage characteristics of the plasma generators with an output step-electrode.

Key words: plasma generators, the current-voltage characteristics, stage electrode, thermal efficiency.