

УДК 537: 527

С.И. Радько, Э.К. Урбах

Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик

Проведен анализ вольт-амперных характеристик дугового разряда и теплового КПД плазмотронов при различных геометриях электродразрядных камер. Экспериментально установлено существенное влияние геометрии разрядной камеры на основные энергетические характеристики конструктивно подобных схем плазмотронов.

Ключевые слова: дуговой разряд, вольт-амперная характеристика, тепловой КПД, электрод, плазмотрон.

Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) широко применяются для стационарного нагрева газовых сред до состояния низкотемпературной плазмы $(3\div 10)\cdot 10^3$ К. Использование их в промышленных технологиях обеспечило разнообразие конструктивных решений плазменных устройств. Энергетические и электрофизические характеристики плазмотронов определяются, главным образом, геометрическими и газодинамическими параметрами разрядной камеры при постоянстве тока дуги, рода и давления газа.

Наиболее распространенными конструкциями дуговых плазмотронов являются аппараты с газовихревой стабилизацией дуги на оси разрядной камеры. Ввод плазмообразующего газа в зону горения дугового разряда осуществляется через одно или несколько закруточных колец с тангенциальными отверстиями. Такие плазмотроны получили название осевой или линейной схемы [1].

Разрядная камера плазмотрона представляет собой совокупность полостей электродов различной геометрии и вихревых устройств для закрутки потоков газа. В зависимости от количества вихревых камер плазмотроны линейной схемы подразделяются на одно-, двух- и трехкамерные. При этом электродами в них являются термо- (вольфрам) или термохимические (гафний) катоды, медные трубчатые катоды и аноды. Последние могут быть гладкими или ступенчатой геометрии.

Конструктивные схемы плазмотронов

Рассмотрим простейшие конструктивные схемы плазмотронов – однокамерные с торцевым термокатодом (при нагреве инертных газов используется вольфрамовый электрод, кислородсодержащих сред – гафниевый). В плазмотроне (рис. 1), вихревая камера расположена между торцевым катодом 1 и выходным трубчатым электродом – анодом 2.

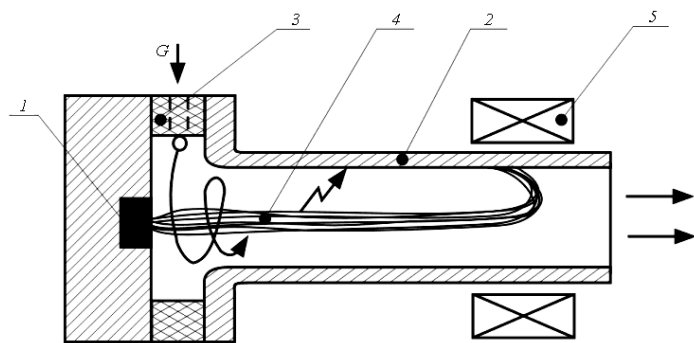


Рис. 1. Схема плазмотрона с самоустанавливающейся длиной дуги

Из неё газ с расходом G вытекает в разрядную камеру через кольцо закрутки 3, которое, как правило, является изолятором между электродами. Электрическая дуга 4 зажигается в межэлектродном зазоре. Позицией 5 обозначен соленоид. Под действием осевой составляющей скорости потока газа дуговой разряд растягивается в направлении течения потока. Столб дуги стабилизируется на оси трубчатого (цилиндрического) электрода из-за градиента давления в вихре.

Удлинение дуги под действием потока газа приводит к пробое промежутка «дуга – стенка» в некотором сечении канала вверх по потоку (на рис. 1 обозначено стрелкой \nearrow). Этот процесс получил название шунтирование дуги, который ограничивает длину разряда и падение напряжения на нем. В результате устанавливается некоторая средняя длина дуги, которая называется самоустанавливающейся. Она зависит от многих параметров: силы тока, расхода газа, диаметра электрода и др. За счет процесса шунтирования дуги в выходном электроде длина дугового разряда сокращается при увеличении тока дуги.

Если в предыдущей схеме применить выходной электрод ступенчатой геометрии (рис. 2), то средняя длина дугового разряда будет меньше самоустанавливающейся, но фиксированной длины. На рис. 2: 1 – внутренний электрод-катод; 2 – выходной электрод-анод ступенчатой геометрии; 3 – вихревая камера.

Фиксация средней длины разряда связана с аэродинамикой истечения потока из канала диаметром d , последующего присоединения его к поверхности электрода диаметром D за уступом, наличием циркуляционных зон в месте срыва потока, а также распределением плотности теплового потока с максимумом в месте присоединения высокотемпературного потока с каналом D . Именно здесь создаются благоприятные условия для пробоя промежутка «дуга – электрод».

Таким образом, внезапное расширение канала (уступ) создает газодинамические условия преимущественного шунтирования дуги непосредственно за зоной срыва потока и обеспечивает постоянство средней длины в широком диапазоне изменения тока, расхода газа и давления при неизменных значениях l и d . Соотношение $D/d \geq 1,5$.

Более сложной представляется конструктивная схема плазмотрона с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ), рис. 3. Здесь 1 – катод; 2 – анод; 3 – подача основного расхода газа G ; 4 – секция МЭВ; 5 – узел подачи межсекционного расхода газа g_i ; 6 – соленоид. Разрядная камера плазмотрона при наличии МЭВ позволяет в широких пределах регулировать вольт-амперные характеристики дуги, тепловые потоки в стенки секционированного канала, вкладываемую мощность разряда не только за счет силы тока, но и напряжения дуги при изменении длины МЭВ. Как видно из рис. 3, в длинной МЭВ необходимо осуществлять вдув газа в межсекционные полости для снижения тепловых потоков за счет конвективного теплообмена дуги с каналом плазмотрона, а также для увеличения электрической прочности промежутков «дуга – секция» и «секция – секция».

Межэлектродная вставка эффективно работает в диапазоне токов, при которых длина МЭВ больше длины самоустанавливающейся дуги. При этом падение напряжения на дуге больше, чем в плазмотронах, изображенных на рис. 1 и 2, при одинаковых расходе газа, токе разряда, давлении в камере и диаметре каналов благодаря увеличению средней длины дуги.

Энергетические характеристики плазмотронов

К основным энергетическим характеристикам относятся тепловой КПД устройства и зависимость напряжения дугового разряда от тока при изменении расходов газа, диаметров электродов, рода и давления плазмообразующей среды – вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги.

Вольт-амперные характеристики дуги линейных плазмотронов, схемы которых приведены на рис. 1–3, имеют различный вид в зависимости от геометрии разрядной камеры (рис. 4) [1, 2].

В плазмотроне с самоустанавливающейся длиной разряда ВАХ дуги имеет падающий вид (рис. 4, кривая 1). При фиксации средней длины дуги за счет применения выходного электрода ступенчатой геометрии наряду с падающей ветвью ВАХ существует восходящий участок (рис. 4, кривая 2), который определяется $E - I$ характеристикой дуги (E – напряженность электрического поля разряда). Наконец, в плазмотроне с фиксированной длиной дуги с помощью МЭВ вольт-амперная характеристика разряда слабопадающая (рис. 4, кривая 3).

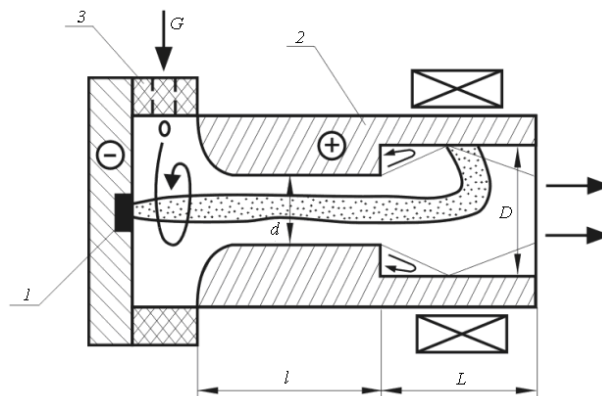


Рис. 2. Схема плазмотрона с фиксацией средней длины дуги уступом

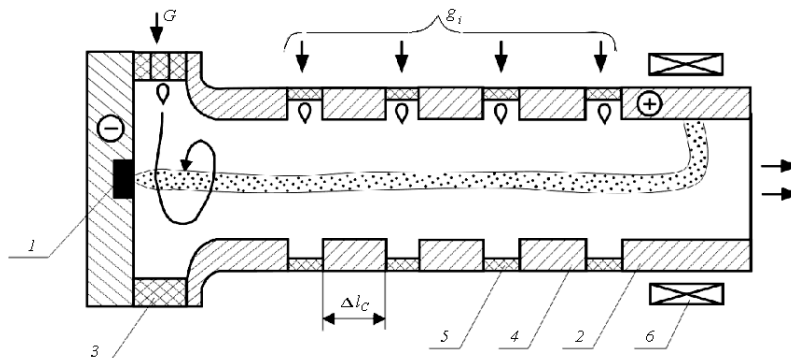


Рис. 3. Схема плазмотрона с секционированной МЭВ

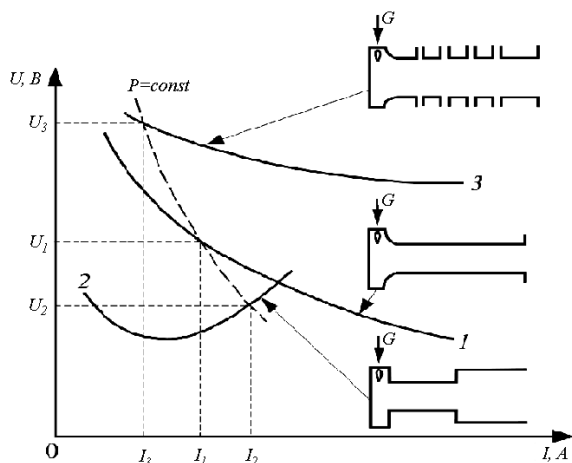


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики дуги трех классов линейных плазмотронов

Сложность конструкции и падающая ВАХ дуги в плазмотроне с МЭВ может лишить его преимущества перед плазмодизъюнкцией со ступенчатым электродом, который обладает более простой конструкцией и имеет восходящий участок ВАХ дуги (при одинаковых мощностях обоих устройств).

Тепловой коэффициент полезного действия плазмотронов η_T определяется потерями тепла в водоохлаждаемые элементы конструкций. Геометрия разрядной камеры имеет здесь решающее значение.

Многочисленные исследования плазмотронов с самоустанавливающейся и фиксированной длиной дуги показали, что в общем виде тепловая характеристика геометрически подобных плазмотронов каждой схемы может быть записана как функция основных критериальных комплексов (рабочая среда – воздух) [1, 2]:

$$\frac{1-\eta_T}{\eta_T} = 1,08 \cdot 10^{-4} (I^2/Gd)^{0,27} (G/d)^{-0,27} (pd)^{0,30} (l/d)^{0,50}. \quad (1)$$

Формула проверена в широком диапазоне силы тока ($I=50 \div 3600$ А), расхода газа ($G = 1 \cdot 10^{-3} \div 2,2$ кг/с), диаметра выходного электрода ($d = 1 \cdot 10^{-2} \div 7,6 \cdot 10^{-2}$ м), давления ($p = 1 \cdot 10^5 \div 8 \cdot 10^5$ Па). Опыт показывает, что приведенная формула с точностью $\pm 10\%$ справедлива для расчета теплового КПД плазмотронов однокамерной схемы с трубчатыми и ступенчатыми выходными электродами (в последнем случае под \bar{l} подразумевается $\bar{l} = l/d + L/D$).

Однако в ряде случаев экспериментальные данные показывают, что за счет фиксации средней длины дуги в плазмотроне с выходным ступенчатым электродом (при оптимизации длины электрода L (см. рис. 2)) тепловой КПД возрастает (0,8–0,85) по сравнению с плазмотронами с трубчатыми электродами (0,7–0,75). Для примера приведем зависимость η_T от тока для двухкамерного плазмотрона со ступенчатым выходным электродом [3].

На рис. 5 представлено сравнение тепловых КПД плазмотронов с гладким трубчатым (кривая 1) и со ступенчатым выходным (кривая 2) электродами. Причем для плазмотрона со ступенчато расширяющимся электродом экспериментальные данные в критериальном виде обобщаются следующей формулой (с точностью не более $\pm 10\%$):

$$(1-\eta_T)/\eta_T = 9 \cdot 10^{-5} (I^2/Gd_2)^{0,10} (G/d_2)^{-0,27} (pd_2)^{0,30} (\bar{l})^{0,50}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{l} = l_1/d_1 + l_2/d_2 + L/D$.

На рис. 5: 1 – расчёт по формуле (1); 2 – расчёт по формуле (2); o – эксперимент. Из рис. 5 следует, что оптимизация отношения L/D в выходном ступенчатом электроде ($D = 44 \cdot 10^{-3}$ м) приводит к заметному повышению теплового КПД плазмотрона.

Для плазмотронов с длинным цилиндрическим каналом (например, с секционированной МЭВ) получить единую аналитическую зависимость КПД от определяющих параметров не представляется возможным. Это связано с тем, что при отыскании зависимости $\eta_T = f(I^2/Gd, \dots)$ к уже использо-

Из анализа вольт-амперных характеристик дуги исследуемых классов плазмотронов (см. рис. 4) следует, что одинаковую мощность дугового разряда $P = U \cdot I$ можно получить, применяя одну из конструктивных схем плазмотронов с учетом токов дуги $I_3 < I_1 < I_2$ и уровня напряжений U_i ($i = 1, 2, 3$). Выбор конструкции того или иного плазмотрона определяется многими факторами (требуемая мощность, ресурс непрерывной работы и др.) для конкретного технологического процесса. Например, нельзя считать, что плазмотрон с секционированной МЭВ эффективнее плазмотрона со ступенчатым выходным электродом, хотя $I_3 < I_1$ (следует заметить, что ресурс работы электродов определяется, в основном, токовой нагрузкой). Слож-

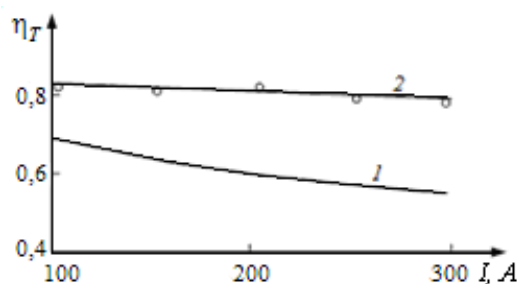


Рис. 5. Зависимость теплового КПД от тока

ванными критериями в формуле (1) необходимо добавить критерии, учитывающие заградительное охлаждение, лучистые и конвективные тепловые потоки в стенку разрядной камеры и т.д. Поэтому КПД плазмотрона с МЭВ необходимо рассчитывать поэлементно для различных участков дугового разряда по длине МЭВ.

Опытные данные по определению теплового КПД плазмотронов с МЭВ технологического назначения позволяют получить $\eta_T = 0,85-0,9$.

Заключение

Экспериментально установлена определяющая взаимосвязь энергетических характеристик дуговых плазмотронов с геометрией электроразрядных камер. Полученные результаты являются эффективным средством управления электрическими и тепловыми характеристиками плазмогенераторов с целью оптимизации технологических параметров электроплазменных устройств. Авторы выражают благодарность профессору Аньшакову А.С. за постоянное внимание и помощь в работе.

Литература

1. Чередниченко В.С. Плазменные электротехнологические установки: учебник для вузов / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 602 с.
2. Жуков М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы / И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
3. Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плазмотрона / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 3. – С. 493–500.

Радько Сергей Иванович

Аспирант каф. автоматизированных электротехнологических установок
Новосибирского государственного технического университета
Тел.: 8-952-945-32-05
Эл. почта: sergejradko@yandex.ru

Урбах Эрих Кондратьевич

Д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Тел.: 8 (383) 330-80-92
Эл. почта: urbakh@itp.nsc.ru

Radko S.I., Urbach E.K.

Effect of discharge chamber geometry on the energy characteristics plasma generators

The analysis of the current-voltage characteristics of arc plasma torches and thermal efficiency for various geometries of electric cells. It was established experimentally significant influence of the geometry of the discharge chamber to the main energy characteristics of structurally similar schemes torches.

Keywords: arc discharge, the current-voltage characteristic, the thermal efficiency of the electrode, the plasma torch.