

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 537.523.5

**Электродуговой плазмотрон для нагрева  
водяного пара**

**А.С. Аньшаков<sup>1,2</sup>, С.И. Радько<sup>2</sup>, Э.К. Урбах<sup>1</sup>, А.Э. Урбах<sup>1</sup>,  
В.А. Фалеев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет*

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Предложена и реализована конструктивная схема электродугового плазмотрона с медными трубчатыми электродами для генерации пароводяной плазмы. Приведены полученные экспериментальные данные по энергетическим характеристикам плазмогенератора мощностью до 100 кВт.

**Ключевые слова:** плазмотрон, водяной пар, трубчатый электрод, напряженность электрического поля, энергетические характеристики.

В ряде промышленных технологий для переработки и утилизации техногенных отходов, газификации твердых топлив низкотемпературная плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом в физико-химических реакциях. Благодаря своим уникальным свойствам по энтальпии, экологичности, широкой доступности пароводяная плазма перспективна в технологических процессах металлургии, энергетики, машиностроения, плазмохимии.

К числу немаловажных достоинств пароводяного плазмотрона следует отнести отсутствие вредных окислов азота при его работе на водяном паре.

На сегодняшний день стационарно работающие плазмотроны на водяном паре обязательно включают в конструкцию термоэмиссионный вольфрамовый катод [1], для работы которого необходима защитная среда в виде аргона или чистого азота, загрязняющих паровую плазму. Кроме того, эти газы достаточно дорогие. В этой связи переход на конструкцию генератора водяной плазмы с медными трубчатыми электродами является актуальной задачей.

Основу исследуемого однокамерного плазмотрона составляют два полых медных цилиндрических электрода ступенчатой формы, разделенных изолятором. Внутренний электрод служит анодом (диаметр до уступа  $d_A = 20 \cdot 10^{-3}$  м), выходной электрод — катодом (диаметр до уступа  $d_K = 16 \cdot 10^{-3}$  м). Кольцо закрутки, имеющее два ряда тангенциальных отверстий, расположено в термостойком изоляторе.

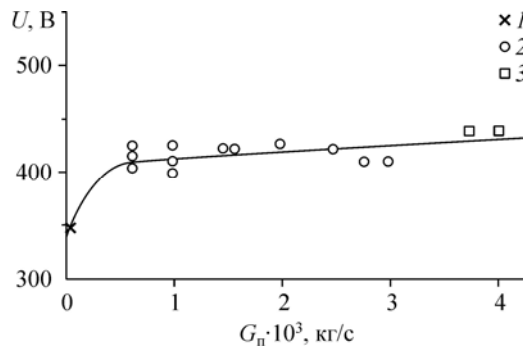


Рис. 1. Изменение напряжения на дуге при переходе от плазмообразующего воздуха (1) и паровоздушной среды (2) к водяному пару (3) при токе дуги около 200 А.

Через один ряд в плазмотрон на стадии запуска поступает подогретый до 160 °С воздух, через другой — водяной пар с температурой 250–300 °С.

Чтобы исключить конденсацию пара на охлаждаемых поверхностях электродов, необходимо поддерживать температуру внутренних стенок на уровне 120–130 °С. Достигается это косвенным охлаждением медных электродов путем применения трубы из нержавеющей стали на всей длине анода и на начальном участке катода до уступа. Участок выходного электрода за уступом охлаждается непосредственно водой.

Толщина стенки стальной трубы рассчитывалась для двухслойной стенки по методике [2] при заданном коэффициенте теплоотдачи от охлаждаемой поверхности электрода к протоку воды. Расчет проводился для реальных тепловых потоков от дугового разряда в стенки электродов.

В проведенных экспериментах плазмотрон запускался на воздухе, затем осуществлялся поэтапный переход к водяному пару: расход пара увеличивали, а расход воздуха снижали. Эксперименты показали, что при переходе от воздуха с расходом  $4,1 \cdot 10^{-3}$  кг/с к пару напряжение на дуге резко возрастает уже при расходе  $0,6 \cdot 10^{-3}$  кг/с пара (рис. 1). Далее напряжение на дуге с уменьшением расхода воздуха и увеличением расхода пара возрастает значительно медленнее (расход плазмообразующего газа остается примерно постоянным).

Средняя по длине дуги напряженность поля составляет 18–20 В/см. Эта величина соответствует экспериментальным данным по напряженности электрического поля дуги в водяном паре и защиты термокатода инертным газом [3]. Объяснить это можно тем, что в вихревом потоке газа разрядной камеры плазмотрона давление на оси ниже, чем в пристенной области. Учитывая, что плотность водяного пара ниже плотности воздуха при одинаковых температурах, поступающий с воздухом пар концентрируется в приосевой области канала плазмотрона и дуга горит преимущественно в паре. О сепарации газов с разными плотностями в вихревом потоке водяного пара неоднократно упоминал Б.И. Михайлов [1, 3].

Измерения тепловых потоков в электроды показали, что они с увеличением расхода пара в исследованном диапазоне практически не меняются. Рассчитанный по экспериментальным данным тепловой КПД  $\eta_T$  приведен на рис. 2. Такой ход зависимости  $\eta_T$  обусловлен тем, что теплопроводность пара при одинаковых температурах выше теплопроводности воздуха. Кроме того, из-за более высокой напряженности электрического поля дуги возрастает температура дугового разряда и, соответственно, увеличивается лучистый поток на стенки электродов.

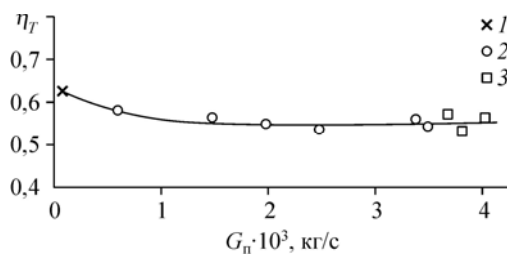
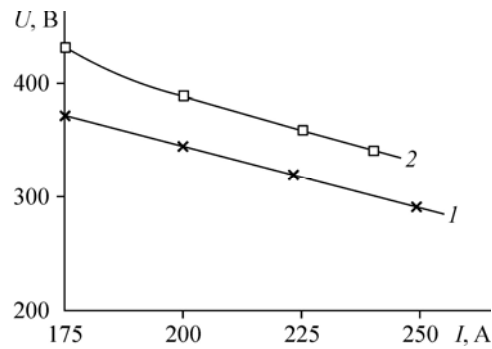


Рис. 2. Изменение КПД плазмотрона при переходе от воздуха к пару при  $I \approx 200$  А. Обозначения см. на рис. 1.

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги.  $d_A = 2,0 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_K = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м,  $G = 4,1 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

1 — воздух, 2 — водяной пар.



На рис. 3 для сравнения приведены вольт-амперные характеристики дуги плазмотрона при работе на воздухе (кривая 1) и на паре (кривая 2). Судя по следам выработки электродов при работе плазмотрона

на воздухе, на смеси воздуха с паром и на паре, длина дуги при одинаковом токе практически не меняется. Следовательно, повышение напряжения на дуге при переходе с воздуха на пар обусловлено только тем, что дуга горит в смеси водорода с кислородом. На чистом водороде напряженность электрического поля выше и составляет 30 В/см и более.

Таким образом, показана работоспособность конструктивной схемы плазмотрона с медными трубчатыми электродами для генерации пароводяной плазмы. Полученные энергетические характеристики отражают особенности горения дугового разряда в водяном паре.

#### Список литературы

1. Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика, 2003. Т. 10, № 4. С. 637–657.
2. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: учебник. В 2 ч. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. М.: Энергия, 1975. 380 с.
3. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.

Статья поступила в редакцию 2 мая 2012 г.