

УДК 533.9.07

## Экспериментальное исследование однейтродных плазмотронов

К. А. Неклеса, Г. Ф. Копытов, А. Т. Неклеса

*Представлены экспериментальные исследования однейтродных плазмотронов. Рассмотрено влияние изменения расхода основного плазмообразующего газа в зазор катод—нейтрод и влияние изменения расхода основного плазмообразующего газа в зазор нейтрод—анод.*

PACS: 52.25.Kn

*Ключевые слова:* плазма, плазмотрон, дуга, ток, газ, расход.

### Введение

Конструкции плазмотронов, которые широко используются для реализации высоких технологий, имеют ряд существенных недостатков. Одним из таких недостатков является высокое соотношение диаметра выходного сопла и внешнего диаметра плазмотрона (геометрическое соотношение). Поскольку анод плазмотрона, как и его корпус, выполняется с интенсивным охлаждением, то при высоких отношениях диаметров через торец плазмотрона происходит интенсивный сток тепла из реакционной зоны. Известно [1], что через водоохлаждаемый держатель электрода диаметром 300 мм интенсивность теплового потока может достигать ~400 кВт. Поэтому задача снижения теплового потока через торец плазмотрона, особенно, при средних мощностях ~1 МВт и в условиях непосредственного контакта плазмотрона с высокотемпературными продуктами реакции ( $T = 1300\text{—}2700$  К) является достаточно актуальной.

Развитие современных технологий требует надежной устойчивой работы плазмотрона при сохранении высокого КПД в широком диапазоне изменения тока дуги, расхода и состава плазмообразующего газа. Удовлетворяют этим требованиям плазмотроны с межэлектродными вставками [2—6], которые в [7] классифицируются как плазмотроны с нейтронами.

Плазмотроны с нейтронами позволяют повысить напряжение на дуге, обеспечивают восходящую вольтамперную характеристику [8—10] и

высокую энтальпию плазменной струи. Однако введение в конструкцию плазмотрона большого количества нейтронов, с одной стороны, повышает энтальпию струи, а с другой — может понизить его общий КПД за счет внесения дополнительных возмущений в газовый поток в канале плазмотрона. Поэтому необходимо оптимизировать конструкцию плазмотрона как в части минимизации количества нейтронов при сохранении диапазона устойчивой работы, так и в отношении обеспечения максимальной мощности и максимального КПД при возможно наименьшем геометрическом соотношении. Введение этих требований приводит к определенным противоречиям как в конструктивных, так и в рабочих параметрах плазмотрона. Разрешение этих противоречий, а также оптимизация конструктивных и теплофизических параметров плазмотронов с металлическими нейтронами является целью данной экспериментальной работы.

### Экспериментальные исследования однейтродных плазмотронов

Экспериментальные исследования осуществлялись на головном промышленном образце многоплазмотронной плазменной установки, которая характеризуется общей потребляемой мощностью 700 кВт в рабочем режиме и до 1000 кВт в режиме форсажа. Установка выполнена таким образом, что допускает одновременную работу одного, двух, трех и четырех плазмотронов. При этом для расширения диапазона регулировки каждая отдельная пара плазмотронов (или даже один плазмотрон) подключается к независимому источнику электропитания. Напряжение холостого хода установки  $U = 1450$  В, регулируемый выпрямленный ток до 1000 А.

Установка выполнена в модульной конфигурации, но имеет общий силовой трансформатор. В зависимости от количества используемых плазмотронов установка состоит из одного—четырех модулей. Каждый модуль состоит из: силового

---

Неклеса Кирилл Анатольевич, аспирант.  
Копытов Геннадий Филиппович, профессор.  
Неклеса Анатолий Тимофеевич, научный сотрудник.  
Кубанский государственный университет.  
Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.  
Тел. (861) 219-95-01. E-mail: rector@kubsu.ru;  
1kirill187@list.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2011 г.

© Неклеса К. А., Копытов Г. Ф., Неклеса А. Т., 2012

шкафа, содержащего силовой регулируемый тиристорный источник электропитания, системы возбуждения дугового разряда, блока управления и блока автоматики, шкафа компенсации провала напряжения тиристорного источника, выносного пульта управления; шкафа согласования плазмотрона и пульта газоводяного тракта.

В плазмотронах использовалась газовихревая стабилизация дугового разряда [11]. Катодный блок выполнен универсальным и позволяет устанавливать как малогабаритные медные катоды (вес 200 г) со средним ресурсом работы 6—8 ч при токе 200 А, так и крупногабаритные медные катоды (вес 1000 г) со средним ресурсом работы 200 ч при токе 200 А.

Эксперименты проводились на плазмотроне с нейтроном, у которого диаметр дугового канала равнялся 18 мм. Выполненные исследования показали, что без пленочного охлаждения нейтрона тепловой КПД плазмотрона не превышает 79 % при токе дугового разряда 200 А и в диапазоне  $G_0 = 9—14$  г/с изменения расхода основного плазмообразующего газа в зазор катод—нейтрод (ПГКН). При этом расход воздуха в торец катода  $G_T$  и зазор нейтрод—анод  $G_A$  оставался неизменным и составлял 3,5 и 4,6 г/с, соответственно.

Было выяснено, что с уменьшением площади сечения отверстий кольца закрутки основного газа  $S_0$  с 59 до 46 мм<sup>2</sup> стабильность режима горения дуги повышается, амплитуда пульсаций напряжения на дуге с ростом тока снижается и расширяется диапазон тока, при котором происходит срыв дуги в режим двойного дугообразования (рис. 1). Граничный ток двойной дуги для расхода ПГКН 9,1 г/с составляет 300 А и с увеличением расхода газа до 14 г/с достигает величины 350—400 А. С уменьшением сечения каналов завихрителя дифференциальное сопротивление дуги из отрицательного приобретает положительное значение и при расходе 14 г/с составляет величину 0,26 Ом. Как и в работе [12], при пониженных скоростях ввода ПГКН отслеживается падающая вольт-амперная характеристика (ВАХ), а при малых расходах (до 14 г/с) и ее немонотонный характер (кривые 1' и 2'). При равных расходах (сравнение кривых 1 и 1', 2 и 2') с уменьшением площади сечения каналов завихрителя кривые ВАХ становятся более плавными. Сравнение вида ВАХ для сечения завихрителя 46 и 59 мм<sup>2</sup> показывает, что при равных скоростях ввода газа (кривые 1 и 2') увеличение расхода приводит к увеличению напряжения на дуге почти на 100 В.

Относительные тепловые потери в катод, нейтрод и анод распределяются следующим образом: 35—40 % — нейтрод, 22—25 % — катод и 40—42 % — анод.

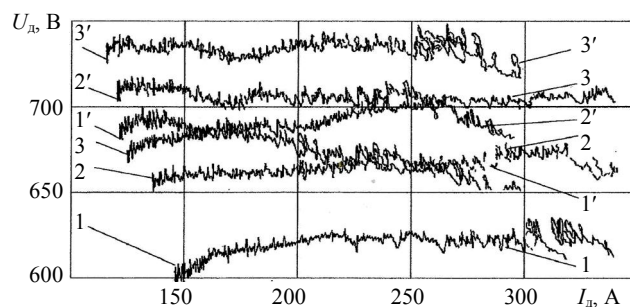


Рис. 1. ВАХ плазмотрона (площадь сечения отверстий кольца закрутки основного газа  $S_0 = 46$  мм<sup>2</sup>) без пленочного охлаждения нейтрона в зависимости от расхода:  $G_0 = 9,1$  г/с (1), 11,4 г/с (2), 14,0 г/с (3); то же для  $S_0 = 59$  мм<sup>2</sup> при  $G_0 = 9,9$  г/с (1'), 11,6 г/с (2'), 13,7 г/с (3')

Пленочное охлаждение осуществлялось за счет дополнительного вдува  $G_H$  плазмообразующего газа через два ряда диаметрально расположенных тангенциальных отверстий диаметром 1,5 мм, количество отверстий в нейтроне составляет 6 шт., отверстия выполнены под углом 45° к оси плазмотрона и направлены по потоку. ВАХ плазмотрона с пленочным охлаждением нейтрона приведены на рис. 2. Видно, что при изменении расхода ПГКН в одинаковом диапазоне ВАХ плазмотрона с дополнительным вдувом в нейтрод соответствует характеристикам плазмотрона без дополнительного вдува, приведенным на рис. 1 для сечения каналов завихрителя 46 мм<sup>2</sup>. Однако граничный ток перехода на двойную дугу даже при незначительном ( $G_H = 3$  г/с) вдуве газа в нейтрод уменьшается на 100—150 А и не превышает 240 А.

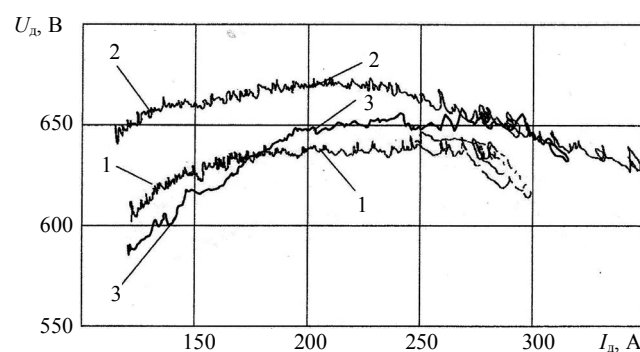


Рис. 2. ВАХ плазмотрона с пленочным охлаждением нейтрона в зависимости от расхода:  $G_0 = 8,4$  г/с (1), 10,4 г/с (2) при  $G_H = 3,0$  г/с и  $S_0 = 46$  мм<sup>2</sup>; то же для  $G_0 = 8,4$  г/с (3) при  $S_0 = 46$  мм<sup>2</sup>

Тепловой КПД плазмотрона даже при таком малом вдуве повышается до 81 %, а распределение тепловых потерь по электродам соответствует распределению без вдува дополнительного газа.

Дифференциальное сопротивление дуги в рабочем диапазоне изменения тока 150—220 А составляет 0,15 Ом, а на начальном участке характеристики возрастает почти в 5 раз и достигает 0,8 Ом.

Увеличение расхода газа в торцевой завихритель всего в 1,5 раза (см. рис. 2, кривая 3) приводит к возрастанию сопротивления дуги во всем рабочем диапазоне изменения тока до 0,7 Ом. При этом выдувание дуги из полости катода ближе к нейтроду увеличивает тепловой КПД плазмотрона до 83 % и уменьшает тепловой поток в катод почти в 1,5 раза.

Влияние изменения расхода ПГНА  $G_A$  на ВАХ плазмотрона приведено на рис. 3. Увеличение расхода  $G_A$  приводит к незначительному повышению напряжения на дуге. При этом величина граничного тока перехода на двойную дугу не изменяется и составляет 240—250 А, хотя расход в зазор нейтрод—анод и увеличивается более чем в два раза. Такое поведение ВАХ свидетельствует о том, что шунтирование дуги в нейтроте не связано с процессами, происходящими в дуговой камере на длине от нейтрота до места шунтирования дуги в аноде. Визуальные наблюдения зоны эрозии в нейтроте показывают, что преимущественная зона шунтирования двойной дуги, определяемая по следам ее опорного пятна, расположена на выходе из нейтрота ближе к аноду. По-видимому, процесс срыва на двойное дугообразование связан с возмущениями, образующимися при взаимодействии пульсаций тока дуги и вдуваемым в нейтрот газом. Действительно, при среднем токе дуги 200 А мгновенное максимальное значение импульса тока, определенное по осциллограмме, достигает значения более 500 А. Естественно, что при токе 250—280 А мгновенное значение импульса тока может достигать 1000 А и более. Такой мощный токовый импульс может сильно отклонить дугу от оси канала. Дуга при этом проникает в пристеночный пограничный слой. Возникает возможность пробоя между нейтротом и положительным столбом дуги, что, в конечном итоге, вызывает шунтирование дуги на нейтрот.

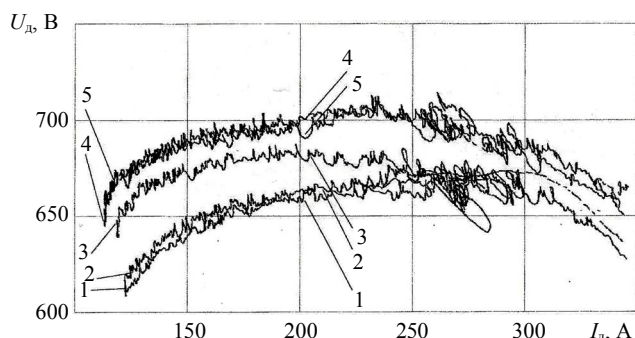


Рис. 3. ВАХ плазмотрона в зависимости от расхода газа  $G_A$  в зазор нейтрот—анод:

$G_A = 4,2$  г/с (1);  $6,3$  г/с (2);  $7,6$  г/с (3);  $9,0$  г/с (4);  $10,0$  г/с (5)  
при  $G_0 = 9,7$  г/с,  $G_T = 3,8$  г/с,  $G_H = 3,4$  г/с

Тепловой КПД плазмотрона в диапазоне варьирования расхода ПГНА не меняется и составляет 81 %, тепловые потери в электроды и в анод также

не меняются, что свидетельствует о выдувании дуги из сопла анода и о шунтировании ее вблизи среза анода.

Теперь рассмотрим поведение ВАХ плазмотрона при изменении расхода  $G_H$  плазмообразующего газа в нейтрот (рис. 4). Даже при изменении расхода газа в нейтрот почти в три раза напряжение на дуге возрастает всего на 50—70 В. Такое незначительное увеличение напряжения на дуге связано с тем, что суммарный расход плазмообразующего газа при этом изменяется всего на 20 %.

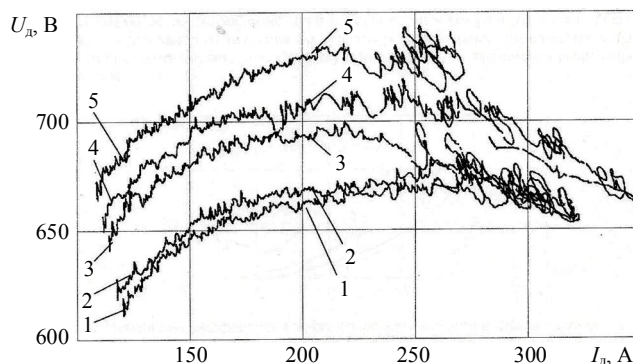


Рис. 4. ВАХ плазмотрона в зависимости от расхода газа  $G_H$  в нейтрот:

$G_H = 2,7$  г/с (1);  $4,5$  г/с (2);  $5,8$  г/с (3);  $6,7$  г/с (4);  $7,6$  г/с (5)  
при  $G_0 = 9,7$  г/с,  $G_T = 4,0$  г/с,  $G_A = 5,0$  г/с

Увеличение расхода газа в нейтрот на величину более 5 г/с возмущает дугу, и, соответственно, граничный ток с 240—260 А снижается до 220 А (кривые 3—5).

Поскольку суммарный расход плазмообразующего газа изменяется незначительно, то КПД плазмотрона остается постоянным и равным 81 %. При этом тепловые потери в электроды практически не меняются и составляют для анода 10,5—12,5 кВт, для нейтрота 10 кВт и для катода 5—6 кВт. Слабая зависимость тепловых потерь в нейтрот от расхода газа, очевидно, объясняется эффективной защитой стенок нейтрота от конвективной составляющей теплового потока. На стенки нейтрота падает только лучистая составляющая теплового потока, которая для воздуха не превышает 10—15 %.

Анализ ВАХ, приведенных на рис. 1—4, показывает, что при токах до 150 А сопротивление дуги имеет высокое значение и достигает 1 Ом. При токе 150 А характеристика имеет точку перегиба, что, видимо, связано с вариацией радиального распределения температуры в дуге, обусловленной изменением условий теплоотдачи с увеличением среднего тока дуги.

Для снижения тепловых потоков в стенку нейтрота необходимо повышать расход газа в пристеночном слое. Однако в существующих промышленных условиях обеспечить необходимый расход газа весьма проблематично, поскольку максимальное давление в сетях предприятия обычно не

превышает 1,5 атм. Поэтому были проведены исследования с вдувом газа в нейтрод при различной площади суммарного сечения тангенциальных каналов. Это достигалось путем изменения количества тангенциальных отверстий при их постоянном диаметре. Указанная площадь каналов нейтрода возрастала от 11 до 86 мм<sup>2</sup>.

Поскольку основным критерием стабильности работы и высокого КПД плазматрона является дифференциальное сопротивление дуги  $R$ , то результат анализа многочисленных ВАХ представлен на рис. 5 в виде зависимости дифференциального сопротивления дуги от расхода газа через нейтрод при различной площади тангенциальных каналов. Из рис. 5 видно, что с увеличением площади сечения каналов нейтрода  $S_H$  допустимый расход газа на нейтрод растет, а дифференциальное сопротивление дуги с увеличением расхода газа возрастает. Следует отметить, что для каждого значения  $S_H$  существует предельное значение расхода газа, при котором происходит обрыв дуги. Поэтому кривые  $S_1$  —  $S_4$  и ограничены сверху предельным расходом газа.

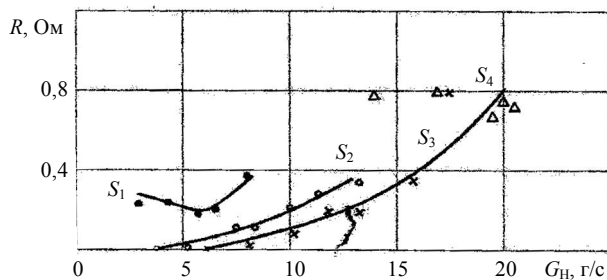


Рис. 5. Изменение дифференциального сопротивления дуги  $R$  в зависимости от расхода газа  $G_H$  на нейтрод при общей площади  $S$  сечения каналов нейтрода:

$$S_1 = 11 \text{ мм}^2; S_2 = 46 \text{ мм}^2; S_3 = 78 \text{ мм}^2; S_4 = 86 \text{ мм}^2 \\ \text{при } G_0; G_T; G_A = \text{const}$$

Граничный ток двойного дугообразования для кривых  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_4$  составляет 220 А, а для  $S_3$  — 240—260 А. Тепловой КПД с увеличением  $S_H$  и расхода газа на нейтрод возрастает и достигает 83—85 % при интенсивности вдува  $> 0,7$ .

## Experimental study of one-neutrode plasmatrons

K. A. Neklesa, G. F. Kopytov, A. T. Neklesa  
Kuban State University  
149 Stavropol str., Krasnodar, 350040, Russia  
E-mail: rector@kubsu.ru

*This paper presents results of experimental researches of one-neutrode plasmatrons. Obtained is the influence of main plasma gas flow changes in the the cathode—neutrode gap and the impact of changes in consumption of primary plasma gas into the neutrode—anode gap. It is shown the dependence of the arc resistance from an injection gas.*

PACS: 52.25.Kn

Keywords: plasma, plasmatron, arc, current, gas, injection.

Bibliography — 12 references.

## Заключение

Обобщая приведенные в этой статье экспериментальные результаты, можно заключить, что плазматрон с длинным перфорированным металлическим нейтродом имеет высокие энергетические показатели, значительно превосходящие показатели плазматронов с пористым вдувом. Основное преимущество указанного плазматрона — его устойчивая работа на восходящей вольтамперной характеристике в безбалластном режиме со значением дифференциального сопротивления до 1 Ом при высоком КПД (до 85 %).

## Литература

1. Алерс Х., Тимм К. Исследование свободно горящих электрических дуг постоянного тока мощностью до 12 МВт в сталеплавильных электропечах. Elertrowaerme International, 1987.
2. Hetereresku O., Hritsaе M. // Metalurgia. 1987. V. 39. P. 529.
3. Даутов Г. Ю., Дзюба В. Л., Капн И. Н. Плазматроны со стабилизированными электрическими дугами. — Киев: Наук. думка, 1984.
4. Жуков М. Ф. Экспериментальное исследование плазматронов. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1977.
5. Романец В. А. Новые процессы производства металла: состояние и перспективы. — М.: Металлург, 2001.
6. Амбразевичус А. Теплообмен при закалке газов. — Вильнюс, 1983.
7. Накорякова В. Е., Жукова М. Ф. Современные проблемы теории теплообмена и физической гидрогазодинамики. — Новосибирск, 1984.
8. Riaby V. A., Kim J. H., Mok Y. S., Choi C. K., Plaksin V. Yu., Lee H. J. Development of a high-durability atmospheric DC arc plasmatron. — Tokyo, 2005.
9. Lee H. J., Plaksin V. Yu., Riaby V. A. The volt-ampere characteristics of a DC arc plasmatron with a distributed anode spot. — Tokyo, 2007.
10. Plaksin V. Yu., Kim J. H., Mok Y. S., Lee H. J., Riaby V. A. Reduction of NO<sub>x</sub> content in Diesel engine emission using plasmatron fuel converter. — Seoul, 2006.
11. Аньшаков А. С., Тишаевский А. Н. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. — Новосибирск, 1977.
12. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Смоляков В. Я. Исследование работы плазматрона с воздушной стабилизацией дуги. — Новосибирск, 1961.

\* \* \*