

**Сергиенко С. Н.**  
к.т.н., доцент,  
**Юрьев С. А.**  
к.т.н., доцент,  
**Малюта Е. Р.**  
аспирант

*Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

## ВОЗДУШНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РАЗРЯДНОГО КАНАЛА ПЛАЗМОТРОНА

В настоящее время в различных технологических процессах широкое применение находит дуговой разряд, реализуемый в электродуговых плазмотронах. Применение плазмотронов обусловлено их способностью создавать концентрированные потоки тепловой энергии. Одной из главных составляющих успеха практического применения плазменных технологий в производстве является создание надежного высокопроизводительного оборудования. Основными недостатками таких устройств, применяемых в различных технологических процессах, является малый ресурс работы электродов и низкий тепловой КПД.

Одним из направлений повышения КПД плазмотронов является использование межэлектродных вставок (МЭВ) [1]. Плазмотроны с межэлектродными вставками обладают достаточно высоким КПД (особенно при вдувании газа через пористую стенку), способствует повышению напряжения на дуге и позволяют сравнительно просто повышать мощность плазмотронов увеличением числа МЭВ и достигать более высокой температуры плазменной струи при одинаковых значениях силы тока, расхода и давления нагреваемого газа. Кроме того, снижаются крупномасштабные пульсации тока, напряжения и параметров плазменной струи [2, 3]. Конструктивно МЭВ может выполняться либо в виде удлиненной одиночной секции, либо состоящей из нескольких электроизолированных секций. Секционированная МЭВ в сочетании с распределенной подачей газа позволяет повысить эффективность нагрева газа (т.е. тепловой КПД плазмотрона) и дает возможность дополнительно управлять свойствами плазменной струи [2, 4].

Система охлаждения предназначена для отвода тепловых потоков на стенки элементов конструкции и обеспечения их работоспособности. Однако при большом количестве охлаждаемых элементов плазмотрон оказывается сложным из-за большого количества подводов к нему, например, плазмотроны с секционированной МЭВ [5].

В работе [6] представлен электродуговой плазмотрон с комбинированным охлаждением. Тепловой КПД данного плазмотрона составляет 70 %. Такой высокий КПД достигается за счёт использования в конструкции плазмотрона межэлектродной вставки. Температура дугового разряда этого плазмотрона достигает 4000 К.

Для того, чтобы не усложнять конструкцию плазмотрона с секционированной МЭВ целесообразно применить комбинированное охлаждение: водяное охлаждение для катода и воздушное для МЭВ.

Водяное охлаждение катода оправдано высокой температурой дугового разряда. Применение воздушного охлаждения МЭВ требует особого внимания, поскольку в данной конструкции она является наиболее уязвимым элементом, который может повлиять на ресурс работы плазмотрона.

Для того чтобы выявить влияние температуры дугового разряда на МЭВ плазмотрона, было проведено численное моделирование с помощью программного пакета ASYS. В основу моделирования были положены осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса (RANS), которые в векторной записи можно представить следующим равенством [7]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \nabla \cdot \mathbf{\Pi}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{\Pi}$  — тензор рейнольдсовых напряжений.

На рисунке 1 представлена расчётная схема канала плазмотрона с секционированной МЭВ.

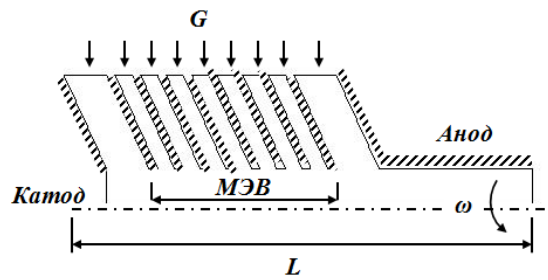


Рисунок 1 — Расчётная схема канала плазмотрона с секционированной МЭВ

Расчетная схема представляет собой двумерную область разрядного канала плазмотрона. В расчётную область подаётся рабочий газ (воздух) с расходом  $G$ . На оси разрядного канала задается тепловой поток  $Q$ . Газовихревая стабилизация плазменной дуги моделируется вращением расчётной области вокруг оси со скоростью  $\omega$ .

По результатам численного моделирования были получены значения температуры поверхностей секций МЭВ в разрядном канале плазмотрона. Воздух, который подаётся между секциями, даёт возможность обеспечить температуру МЭВ ниже, чем температура разрядного канала плазмотрона.

Температура секций МЭВ изменяется вдоль её длины. По мере удаления секций от входного сечения прикатодного канала подачи рабочего газа температура поверхности увеличивается, за счет того, что диаметр канала подачи газа между секциями меньше, чем диаметр прикатодного канала. На рисунке 2 показано изменение температуры поверхностей секций МЭВ по длине разрядного канала.

Из рисунка 2 видно, что температура МЭВ снижается вдоль разрядного канала. Это связано с тем, что с увеличением длины растёт количество секций, между которыми находятся каналы подачи воздуха.

Однако, секции МЭВ, которые находятся вблизи анода, подвергаются воздействию дополнительного теплового потока. Анод имеет более высокую температуру, чем разрядная область канала плазмотрона, что вызвано привязкой к нему плазменной дуги.

Более интенсивного охлаждения МЭВ можно добиться увеличением расхода рабочего газа. С ростом расхода рабочего газа (рис. 3) происходит значительное снижение температуры поверхности секций МЭВ, что связано с увеличением скорости обдува секций.

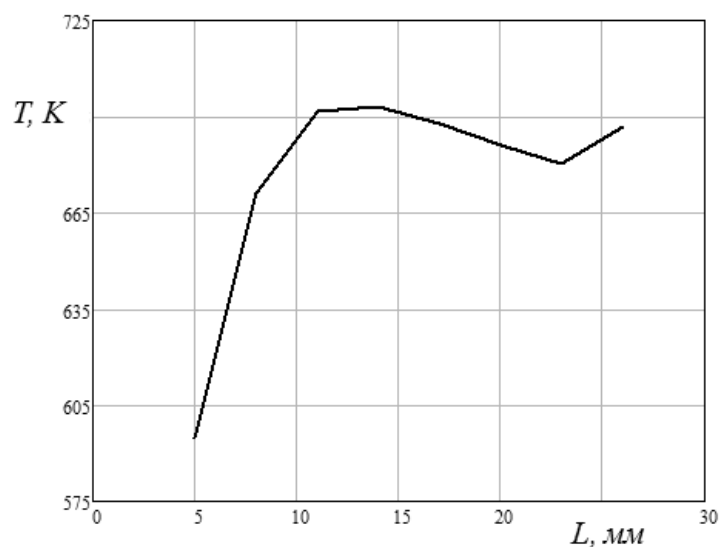


Рисунок 2 — Распределение температуры поверхностей секций МЭВ по её длине

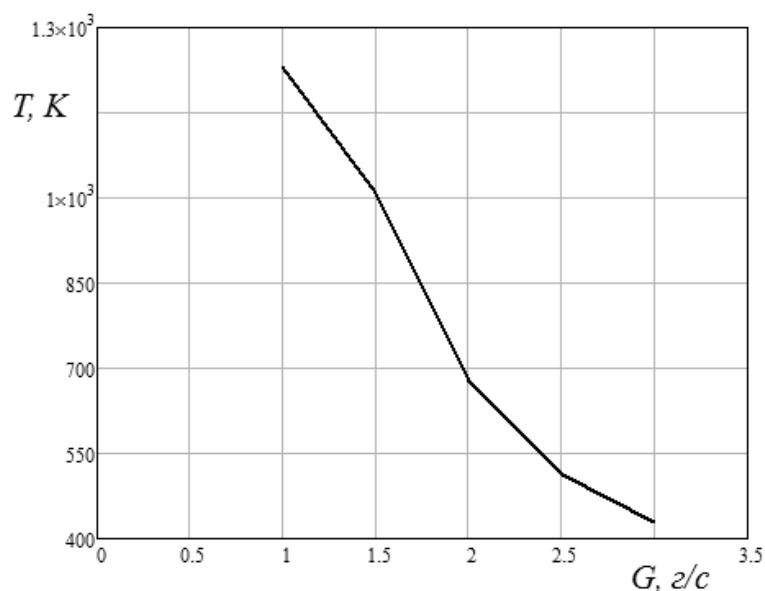


Рисунок 3 — Зависимость средней температуры секций МЭВ от расхода рабочего газа

Однако в дальнейшем необходимо провести трехмерное моделирование с учётом конструктивных особенностей секционированной МЭВ для более точного изучения влияния теплового потока электрической дуги на разрядный канал плазмотрона. Также необходимо установить, как изменение расхода рабочего газа будет влиять на технические параметры плазмотрона.

#### Список литературы

1. Жуков, М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. — М. : Наука, 1973. — 232 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский и др. — Новосибирск : Наука. Сиб. отдел. РАН, 1999. — 712 с.
3. Корсунов, К. А. Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов / К. А. Корсунов, Р. Н. Брожек // Успехи прикладной физики. — 2013. — Т. 1. — № 2. — С. 161–166.
4. Даутов, Г. Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г. Ю. Даутов, В. Л. Дзюба, И. Н. Карп. — К. : Наук. думка, 1984. — 165 с.
5. Клименко, Г. К. Конструкции электродуговых плазмотронов / Г. К. Клименко, А. А. Ляпин. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 56 с.
6. Сергиенко, С. Н. Электродуговой плазмотрон с комбинированным охлаждением / С. Н. Сергиенко, С. А. Юрьев // Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения». г. Луганск, 16–17 октября 2020. — Луганск : ЛГУ им. В. Даля, 2020. — С. 39–40.
7. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. — М. : Наука, 1987. — 840 с.