

УДК 621.387.143:537.523.5

*д.т.н. Дзюба В. Л.,  
д.т.н. Корсунов К.А.  
(ВНУ им. Владимира Даля, г. Луганск, Украина),  
к.т.н. Сергиенко С.Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ХОЛОДНЫХ ПРОДУВОК МОДЕЛИ ПЛАЗМОТРОНА

*Наведені результати холодних продувок моделі плазмотрона, отримані залежності, які дозволяють виконати розрахунки геометричних параметрів секціонованого катодного вузла плазмотрона.*

**Ключові слова:** *катодний вузол, модель плазмотрона, газодинаміка, вихрові течії, витрата захисного газу.*

*Приведены результаты холодных продувок модели плазмотрона, получены зависимости, позволяющие выполнить расчеты геометрических параметров секционированного катодного узла плазмотрона.*

**Ключевые слова:** *катодный узел, модель плазмотрона, газодинамика, вихровые течения, расход защитного газа.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В настоящее время большой интерес для экономики Украины представляют плазменные процессы газификации низкосортных углей, розжига и стабилизации горения пылеугольных факелов в котлах ТЭС, плазменной переработки твердых бытовых отходов. Успешное внедрение данных технологий во многом зависит от длительной работы плазменного оборудования (плазмотронов) в промышленных условиях. Повышение ресурса работы катодных узлов мощных электродуговых плазмотронов, предназначенных для оснащения плазменных установок, в значительной степени зависит от эффективности защиты термоэмиссионных катодов от агрессивного воздействия рабочих газов (воздуха, кислорода или их смесей).

В разработанных плазмотронах был использован секционированный малоэрозионный катодный узел, впервые созданный и исследованный в работах В.Л. Дзюбы и И.С. Мазурайтиса [1,2 и др.]. Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния геометрии катодного узла на газодинамику течения газа в разрядном канале, которая

обуславливает состав атмосферы в прикатодной области и, как следствие, работоспособность вольфрамового термокатода.

**Анализ исследований и публикаций.** При изучении особенностей течения газа в канале катодного узла плазмотронов могут применяться экспериментальные и численные методы. Так, в [2] при холодных продувках модели секционированного катодного узла для установления характера течения газа в вихревой камере применялся зондовый метод для измерения статического давления. По результатам измерений было высказано предположение, что причиной проникновения агрессивного рабочего газа к термокатоду являются радиальные колебания давления в вихревой камере. С учетом данного предположения были сформулированы рекомендации по выбору диаметра канала катодного узла. В [3] было выполнено численное моделирование течения газа в канале катодного узла с использованием интегрированных CAD/CAE пакетов и определен состав атмосферы в прикатодной области. Однако представленные в [3] результаты численного моделирования не дают представления о влиянии на газодинамику прикатодной области расходов защитного и рабочего газов, соотношения диаметров разрядных каналов катодного и анодного узлов, длины канала катодного узла. Поэтому для выявления особенностей структуры течения газа, формирующегося в канале катодного узла, в зависимости от его геометрии, расходов защитного и рабочего газов и других параметров были проведены холодные продувки модели катодного узла.

**Изложение материала и его результаты.** Пространственная картина течения газа в разрядном канале катодного узла при подаче защитного газа схематично показана на рисунке 1. Колебания статического давления вдоль радиуса в сечении вихревой камеры приводят к втеканью части рабочего газа в канал катодного узла. При движении газа в результате его трения о стенку канала происходит затухание вращательного движения газа, что определяет рост статического давления на оси канала катодного узла по мере удаления от входного сечения. В то же время осевая составляющая скорости газа достаточно мала. Некомпенсированный перепад давления приводит к образованию осевого возвратного течения и формированию циркуляционной зоны. Подача защитного газа через дополнительную вихревую камеру, расположенную в торце катодного узла, приводит в области от торцевой стенки катододержателя до первой циркуляционной зоны к появлению течения газа, направленного в сторону анода. В то же время в канале катодного узла может происходить образование пристенных вихревых течений, которые способствуют движению рабочего газа в сторону термокатода вдоль стенки катодного узла.

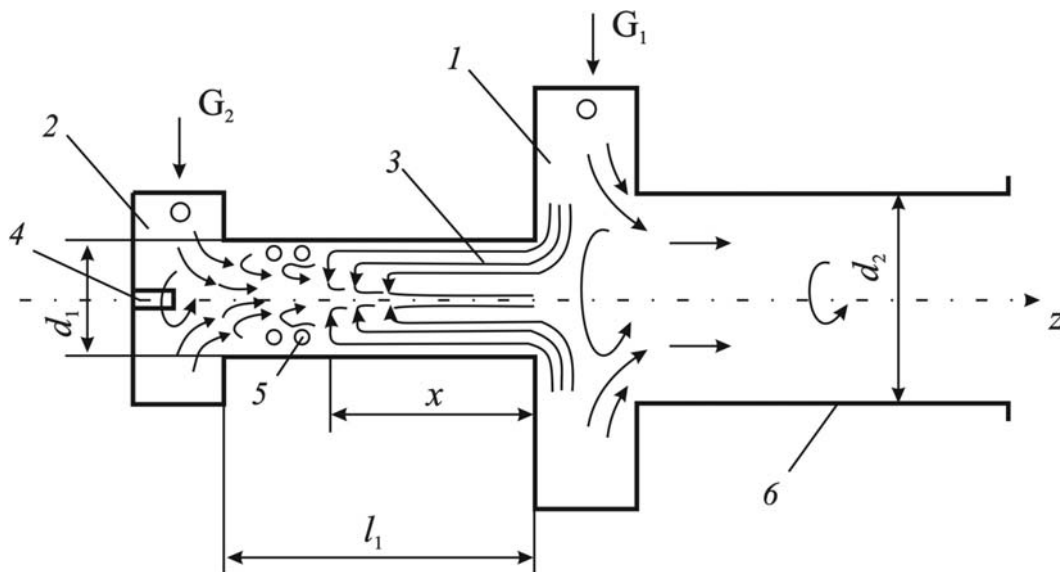


Рисунок 1 – Схема модели плазматрона и структура течения газа в канале катодного узла:

- 1 – камера подачи рабочего газа; 2 – камера подачи защитного газа;
- 3 – первая циркуляционная зона; 4 – термокатод; 5 – пристенные вихревые течения; 6 – анод;  $G_1$  – подача рабочего газа;
- $G_2$  – подача защитного газа

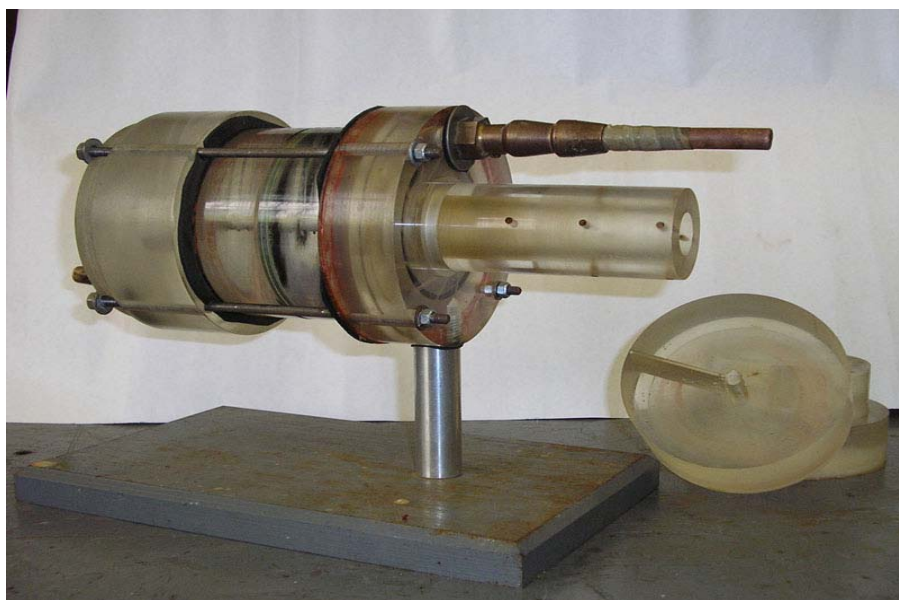


Рисунок 2 – Модель плазматрона для холодных продувок и сменные секции катодного узла

Исходя из приведенной картины течения газа в канале катодного

узла можно сделать вывод, что для обеспечения эффективной защиты термокатода от воздействия агрессивного рабочего газа, он должен находиться вне зоны циркуляционного течения газа. Для определения протяженности первой циркуляционной зоны были проведены холодные продувки модели плазмотрона.

Модель плазмотрона для холодных продувок (рисунок 2) включала катодный и анодный узлы, разделенные вихревой камерой для подачи рабочего газа (воздуха)  $G_1$ . В кольце закрутки вихревой камеры было выполнено 12 отверстий диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  м каждое. Защитный газ  $G_2$  подавался в разрядный канал катодного узла диаметром  $d_1$  через дополнительную вихревую камеру, имеющую три отверстия площадью  $1,65 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> каждое. Для определения распределения статического давления в канале катодного узла применялся зондовый метод. В качестве зондов использовали стальные трубки с наружным диаметром  $10^{-3}$  м. Зонды размещались перпендикулярно оси разрядного канала катодного узла с шагом  $(5 \dots 7,5) \cdot 10^{-3}$  м. Расход рабочего газа определялся ротаметрами типа РС-5, расход дополнительного газа – ротаметрами типа РС-3 и РС-3а. Статическое давление определялось образцовым вакууметром ВО (класс точности 0,5). Исследования проводились с разными вставками катодного узла, имеющими диаметр разрядного канала  $d_1 = 9 \cdot 10^{-3}$ ,  $6 \cdot 10^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$  м соответственно. Диаметр разрядного канала анодного узла  $d_2$  был равным  $12 \cdot 10^{-3}$  м и  $20 \cdot 10^{-3}$  м. Расход рабочего газа  $G_1$  составлял  $(7 \dots 12) \cdot 10^{-3}$  кг/с.

На рисунках 3 - 5 приведены полученные осевые распределения статического давления в канале катодного узла при различных значениях диаметра канала  $d_1$  ( $d_2 = 20 \cdot 10^{-3}$  м). Как видно, при диаметре разрядного канала  $d_1 = 9 \cdot 10^{-3}$  м при расходе защитного газа  $G_2 = 0,0198 \cdot 10^{-3}$  кг/с (кривая 1 на рисунке 3) с ростом  $z$  (положительное направление оси  $Z$  выбрано в сторону анода) наблюдается незначительное снижение статического давления вблизи термокатода, а при увеличении расхода защитного газа  $G_2$  наблюдаются незначительные изменения статического давления по длине канала. Это свидетельствует о том, что протяженность первой циркуляционной зоны соизмерима с длиной канала катодного узла. Уменьшение диаметра разрядного канала  $d_1$  до значения  $6 \cdot 10^{-3}$  м приводит при  $G_2 = (0,0198 \dots 0,531) \cdot 10^{-3}$  кг/с к образованию четко выраженного максимума статического давления в сечении  $z = 10 \cdot 10^{-3}$  м, что связано с расположением в данном сечении конца первой циркуляционной зоны с практически нулевой осевой скоростью (рисунок 4). С увеличением расхода  $G_2$  до значения  $1,225 \cdot 10^{-3}$  кг/с наблюдается снижение величины статического давления по всей длине канала. В канале катодного узла диаметром  $d_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  м во всем диапазоне расхода защитного газа  $G_2$

положение конца первой циркуляционной зоны практически не меняется и она располагается в сечении  $z = 15 \cdot 10^{-3}$  м (рисунок 5). Аналогичные распределения статического давления по длине канала катодного узла получены и для  $d_2 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м. Холодные продувки модели плазмотрона показали, что параметр  $\bar{x} = \frac{x}{d_1}$ , характеризующий относительную протяженность первой циркуляционной зоны, слабо зависит от расходов газа, а определяется в основном только величиной  $\bar{d} = \frac{d_1}{d_2}$ , что согласу-

ется с выводами работы [4]. Отметим, что в [4] приведены результаты исследования газодинамики модели двухкамерного плазмотрона, для которого величина  $\bar{d}$  находилась в пределах от 1 до 2, тогда как для исследуемой нами модели плазмотрона значение  $\bar{d}$  составляет 0,2...0,75 при  $0 < \bar{G} = \frac{G_2}{G_1} < 0,16$ . Учитывая, что циркуляционные течения могут при-

вести к выносу агрессивного рабочего газа непосредственно к термокату- тоду, его необходимо устанавливать на расстояниях, превышающих длину первой циркуляционной зоны, т.е. длину разрядного канала катодного узла следует выбирать из условия  $\bar{l}_1 > \bar{x}$ , где  $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{d_1}$ . Для га-

рантированного исключения попадания термокатода в циркуляционную область примем

$$\bar{l}_1 = 1,2\bar{x}. \quad (1)$$

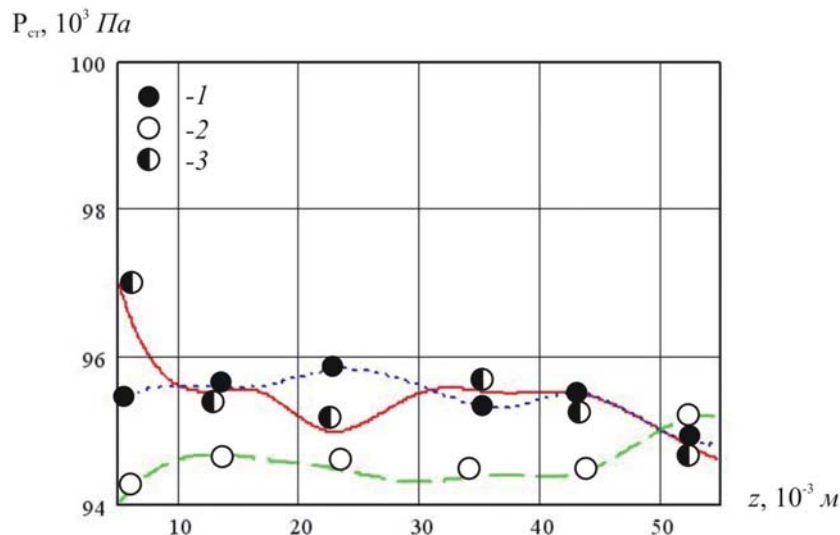


Рисунок 3 – Распределение статического давления в канале катодного узла при  $d_1 = 9 \cdot 10^{-3}$  м:

1 -  $G_2 = 0,0198 \cdot 10^{-3}$  ; 2 -  $0,533 \cdot 10^{-3}$  ; 3 -  $1,284 \cdot 10^{-3}$  кг/с

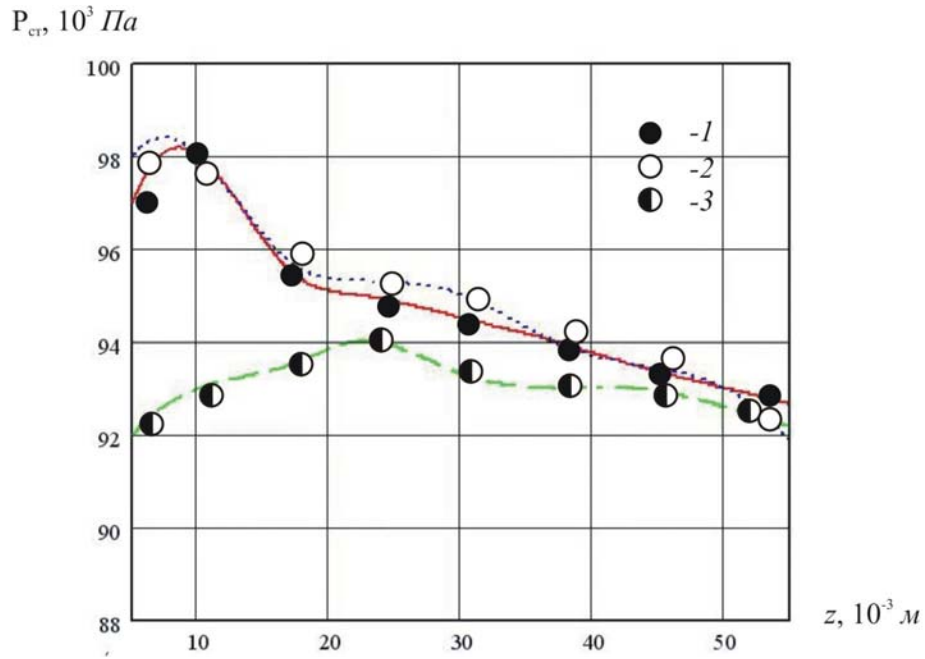


Рисунок 4 – Распределение статического давления в канале катодного узла при  $d_1 = 6 \cdot 10^{-3}$  м:  
 1 -  $G_2 = 0,0198 \cdot 10^{-3}$  ; 2 -  $0,531 \cdot 10^{-3}$  ; 3 -  $1,225 \cdot 10^{-3}$  кг/с

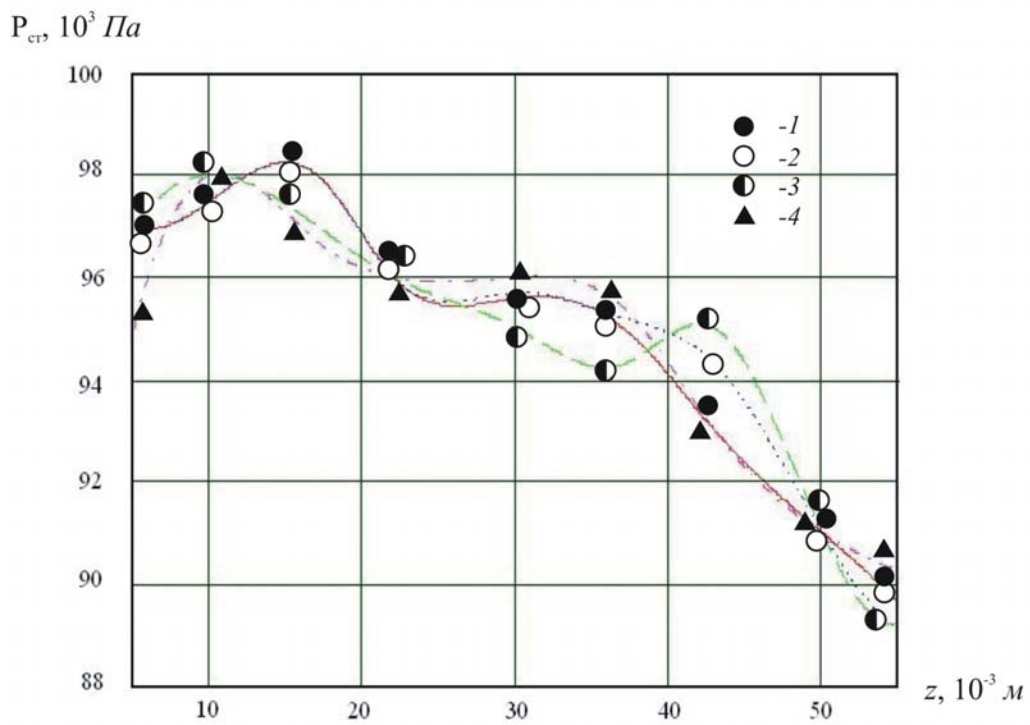


Рисунок 5 – Распределение статического давления в канале катодного узла при  $d_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  м:  
 1 -  $G_2 = 0,0198 \cdot 10^{-3}$  ; 2 -  $0,193 \cdot 10^{-3}$  ; 3 -  $0,573 \cdot 10^{-3}$  ; 4 -  $1,588 \cdot 10^{-3}$  кг/с

Для расчета параметра  $\bar{x}$  на основе экспериментально полученных распределений статических давлений в канале катодного узла предложена зависимость

$$\bar{x} = f(\bar{d}), \quad (2)$$

приведенная на рисунке 6.

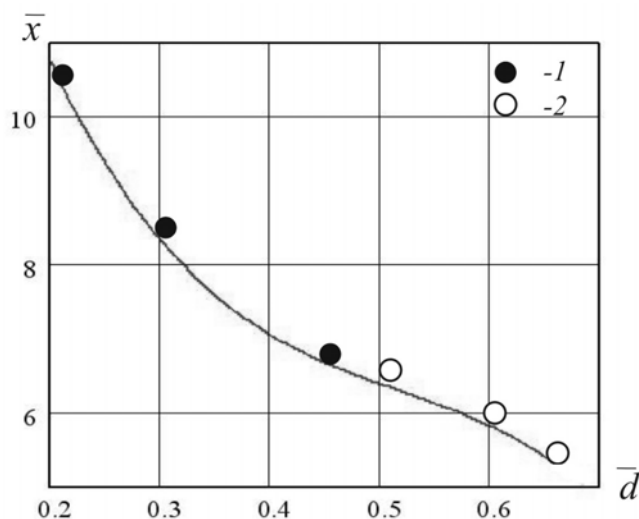


Рисунок 6 – Зависимость длины первой циркуляционной зоны  $\bar{x}$  в канале катодного узла от параметра  $\bar{d}$  :

$$1 - d_2 = 20 \cdot 10^{-3} ; 2 - 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Таким образом, основным фактором, влияющим на эффективность защиты термокатода, является образование циркуляционных течений в канале катодного узла. Обеспечение нейтральной атмосферы в прикатодной области достигается при расположении термокатода вне зоны циркуляционных течений газа. В то же время существуют и другие механизмы проникновения рабочего газа в прикатодную область, например, за счет диффузии или термодиффузии, но скорости этих процессов невелики.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Выполненные результаты холодных продувок модели плазмотрона позволили получить зависимости для расчета длины разрядного канала секционированного катодного узла. В дальнейшем необходимо провести исследования катодных узлов в натуральных экспериментах в более широком диапазоне геометрических и расходных параметров.

## Библиографический список

1. Даутов Г.Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.

2. Дзюба В.Л. Обобщение экспериментальных и теоретических исследований по созданию высокоресурсных электротермических плазменных генераторов: дис. ... доктора техн. наук: 05.09.10 / Дзюба Вячеслав Леонидович. – Коммунарск, 1989. – 401 с.

3. Планковский С.И. Научные основы создания высокоресурсных термоэмиссионных катодных узлов оборудования для плазменной обработки материалов: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.07 / Планковский Сергей Игоревич. – Харьков, 2009. – 333 с.

4. Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. – 298 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблоским Н.Н.**