

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ КАТОДНЫХ УЗЛОВ ПЛАЗМОТРОНОВ

Широкое применение плазменных технологий в различных производственных отраслях диктует необходимость совершенствования методов расчета плазменного оборудования. Специфика процессов, имеющих место в плазмотронах, сильно затрудняет получение необходимых для проектирования параметров экспериментально. Поэтому создание и совершенствование методов расчета параметров плазмотронов является важной задачей.

Существующие методы расчета параметров электродуговых нагревателей (ЭДН) позволяют получать наиболее важные характеристики потока плазмы, такие, как энтальпия газа, скорость течения, вольтамперные характеристики дугового разряда, и применять результаты расчетов для проектирования нового оборудования.

В подавляющем большинстве современных работ по моделированию процессов в электродуговых плазмотронах вопросы газодинамической защиты не затрагиваются. Исключением является проект ChopArc [1], реализованный немецким консорциумом в рамках программы FP6 (рис.1). В нем в ходе моделирования рассматривался состав атмосферы в плазменных горелках, однако не применялись какие-либо его количественные или качественные оценки.

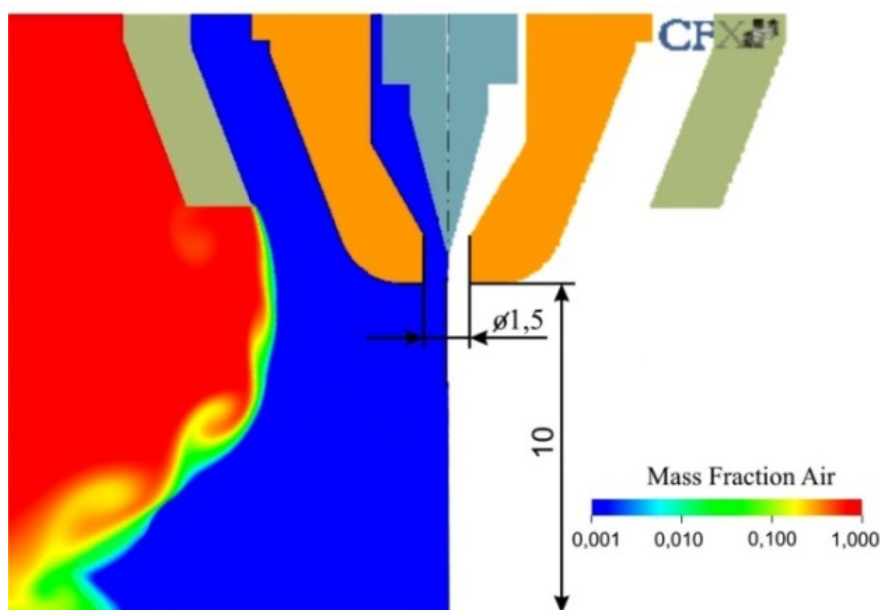


Рисунок 1 – Фракционный состав вблизи катода для плазменной горелки

Впервые вопросы оценки состава атмосферы вблизи катода были затронуты в работах [2 – 4]. Предложенная в [2] модель холодной продувки дает возможность оценить характер течения газа, а также определить фракционный состав вблизи эмитирующей поверхности. Относительная простота таких моделей не требует больших затрат вычислительного времени, что позволяет оперативно вносить необходимые коррективы в геометрию изделия на этапах проектирования. В качестве критерия оценки допустимых значений парциального давления кислородсодержащих газов предложено использовать выражение

$$P_{\text{возд}} = \frac{r_{\text{возд}}}{100} P_p \leq P_{\text{кр}}; P_{\text{кр}} \rightarrow \frac{I}{I_0} \approx 0,7 \dots 0,8, \quad (1)$$

где  $P_{\text{возд}}$  - парциальное давление кислородсодержащих газов воздуха вблизи эмиттера термокатода;  $r_{\text{возд}}$  - объемное процентное содержание кислородсодержащих газов воздуха вблизи эмиттера термокатода;  $P_p$  - рабочее давление вблизи эмиттера;  $P_{\text{кр}}$  - критическое давление, определяемое по результатам испытаний материала эмиттера на отравляемость.

Для определения состава смеси при совместной подаче аргона и воздуха для моделей однофазного двухкомпонентного течения используют уравнение концентрации

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho V \text{grad } c = \text{div}(\rho(D + \mu_m) \text{grad } c), \quad (2)$$

где  $\mu_m$  - динамический коэффициент турбулентной вязкости;  $c$  - массовая концентрация.

Описание взаимной молекулярной диффузии атмосферного воздуха во встречном потоке аргона при его ламинарном течении описывается в общем случае нестационарным дифференциальным уравнением диффузии, полученным из уравнения баланса молекул воздуха в потоке инертного газа в сливном канале на участке газодинамического затвора [2]

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n_{zr}}{\partial z^2} + V_{zr} \frac{\partial n_{zr}}{\partial z}, \quad (3)$$

где  $n_{zr}$  - концентрация молекул (атомов) воздуха как функция координат  $z$  и  $r$ ;  $V_{zr}$  - скорость потока аргона как функция координат  $z$  и  $r$ ;  $D$  - коэффициент взаимной молекулярной диффузии воздуха в аргоне.

Результаты численных экспериментов на тестовой задаче (рис. 2, 3) для моделей с продувками холодного газа показывают хорошее соответствие с экспериментальными данными лишь для этапов начальной работы плазменного оборудования.

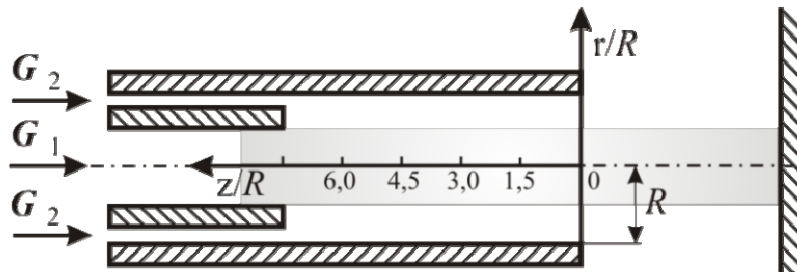


Рисунок 2 – Схема тестовой задачи

Однако на рабочих режимах наличие интенсивного источника тепла (электрической дуги) существенно влияет как на картину течения, так и на свойства компонентов газовой смеси.

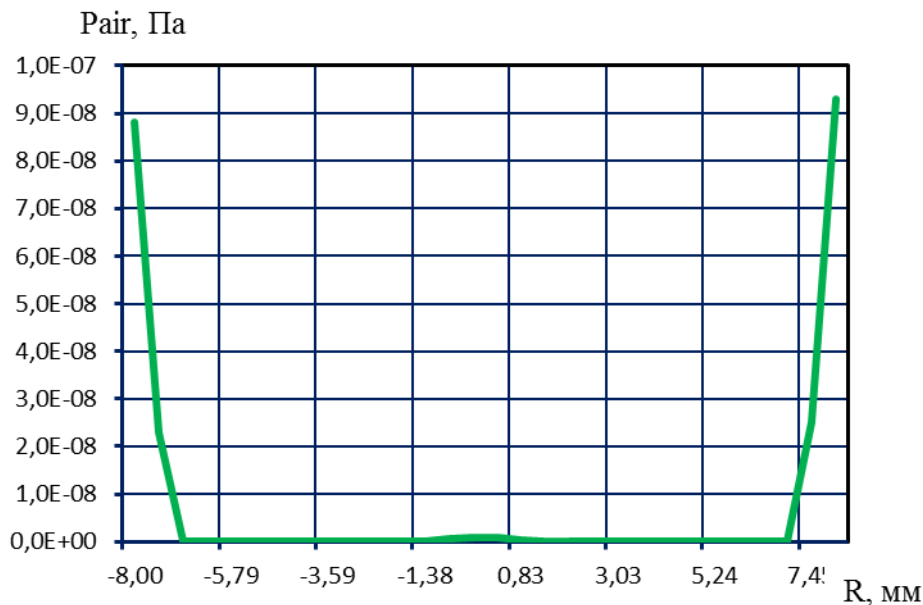


Рисунок 3 – Парциальное давление воздуха на срезе катода при холодных продувках

Невозможность применения моделей холодных продувок для более точного анализа физических процессов на рабочих режимах оборудования обусловило развитие как моделей с имитацией токовой нагрузки с помощью объемного источника энергии, так и моделей с учетом магнитогазодинамических эффектов.

В работе [5] для определения параметров газодинамической защиты был предложен подход, основанный на представлении электрической дуги в виде объемного источника энергии. Рассматривалась следующая задача: плазмообразующий газ (аргон) подается через полый катод с расходом  $G_1$  и через коаксиальный зазор с расходом  $G_2$  между катодом и стенкой канала (рис. 2). Подача газа через полость катода производится аксиально, через зазор – с возможностью закрутки. Дуга (на рисунке затонирована) горит между полым катодом и плоской поверхностью, расположенной перпендикулярно к оси катодного узла.

В тестовой задаче не учитывался теплообмен между потоком газа и стенками, стенки полого катода и нагреваемой поверхности считались адиабатическими, для стенок канала катодного узла было задано условие постоянной температуры. Газ внутри катодного узла моделировался как идеальная двухкомпонентная смесь (воздух + аргон). Учитывалась нелинейная зависимость характеристик компонентов от температуры, а интенсивность объемного источника определялась с учетом джоулева нагрева и излучения дуги [6]. Полученные решения достаточно хорошо описывают течения на установившихся участках (например, в задачах о дугах в длинном цилиндрическом канале). Однако применение такого подхода для изучения характеристик течения вблизи электродов неизбежно приведет к большим погрешностям. Кроме того, в известных работах, использующих представление дуги в виде объемного источника тепла, как правило, рассматриваются случаи ламинарного течения в канале и не учитывается вихревой характер подачи газа, наиболее распространенный в промышленном плазменном оборудовании.

В работе [5] было проведено сравнение результатов по определению состава атмосферы в канале катодного узла, полученных по результатам холодных продувок [1, 2] и с учетом влияния дуги на параметры течения и свойства компонентов газовой смеси. При одинаковых геометрических параметрах задачи и расходах инертного газа результаты существенно отличались. Парциальное давление воздуха вблизи катода для задачи с учетом влияния дуги составило более 60 Па (рис.4), что превышает критический уровень для всех известных эмиссионных материалов. Для случая холодной продувки уровень парциального давления на срезе катода не превышал величины  $10^{-8}$  Па.

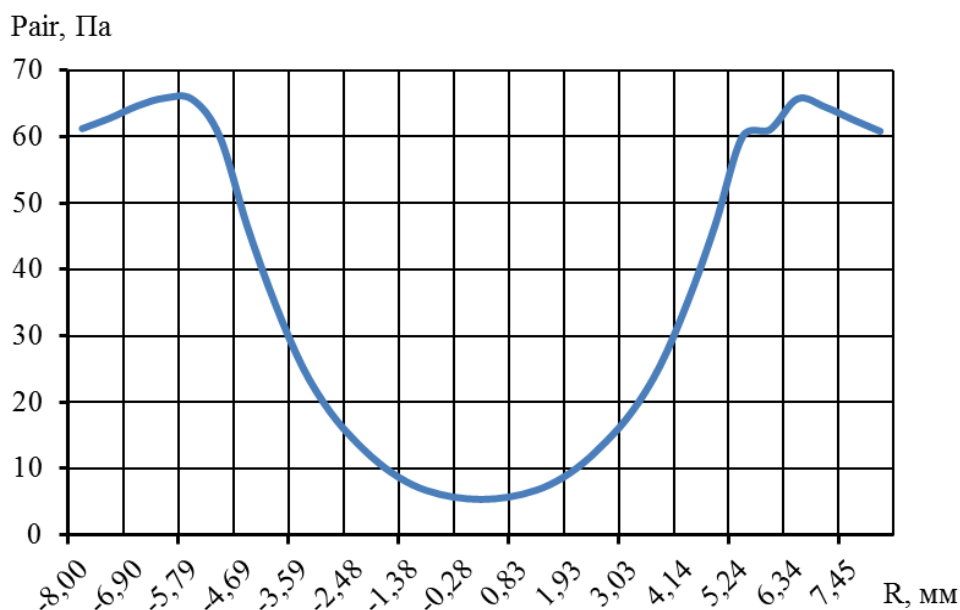


Рисунок 4 – Парциальное давление воздуха на срезе катода при продувках с тепловой имитацией дуги

В последнее время все большее распространение получает другой подход к моделированию течений в плазменных генераторах, основанный на применении МГД-приближения. Популярность такого подхода во многом вызвана введением возможностей моделирования МГД-течений в последние версии коммерческих CFD-пакетов (ANSYS CFX, FLUENT и др.).

Полученные результаты для сходной геометрии в рамках магнитогазодинамического подхода показали существенное расхождение в значениях парциального давления как для случая холодных продувок, так и для случая с имитацией электрической дуги. Из рис. 5 видно, что парциальное давление для случая МГД-постановки составляет  $3...6 \cdot 10^4$  Па, в то время как для газодинамического подхода максимальное давление вблизи катода составило всего 60 Па.

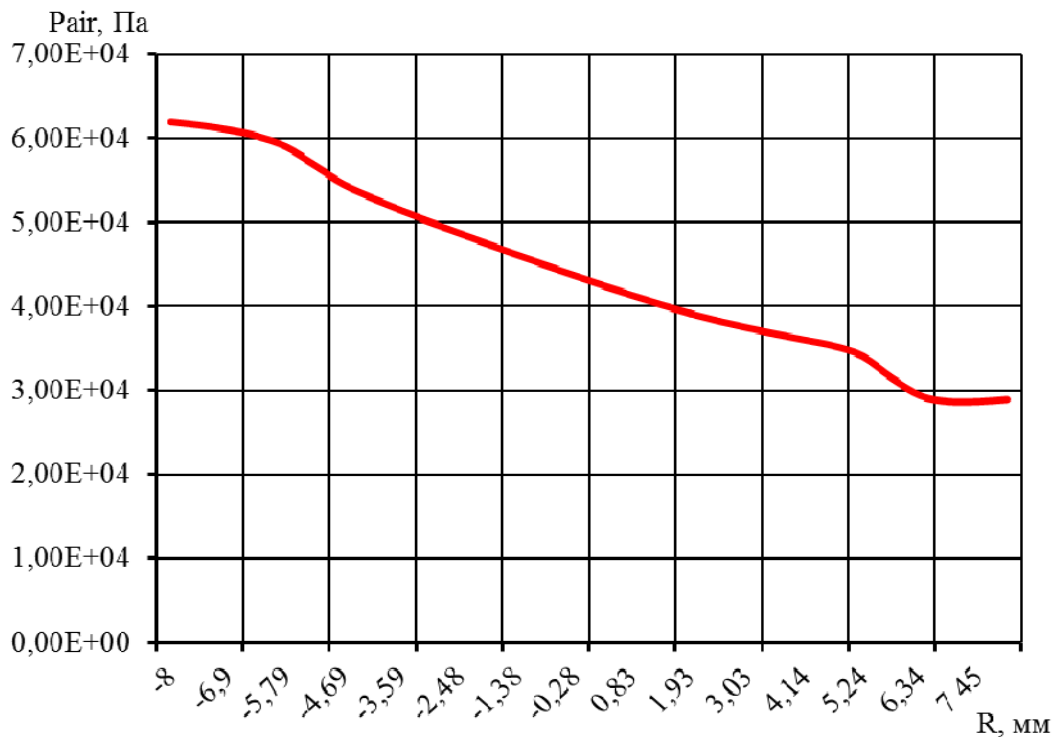
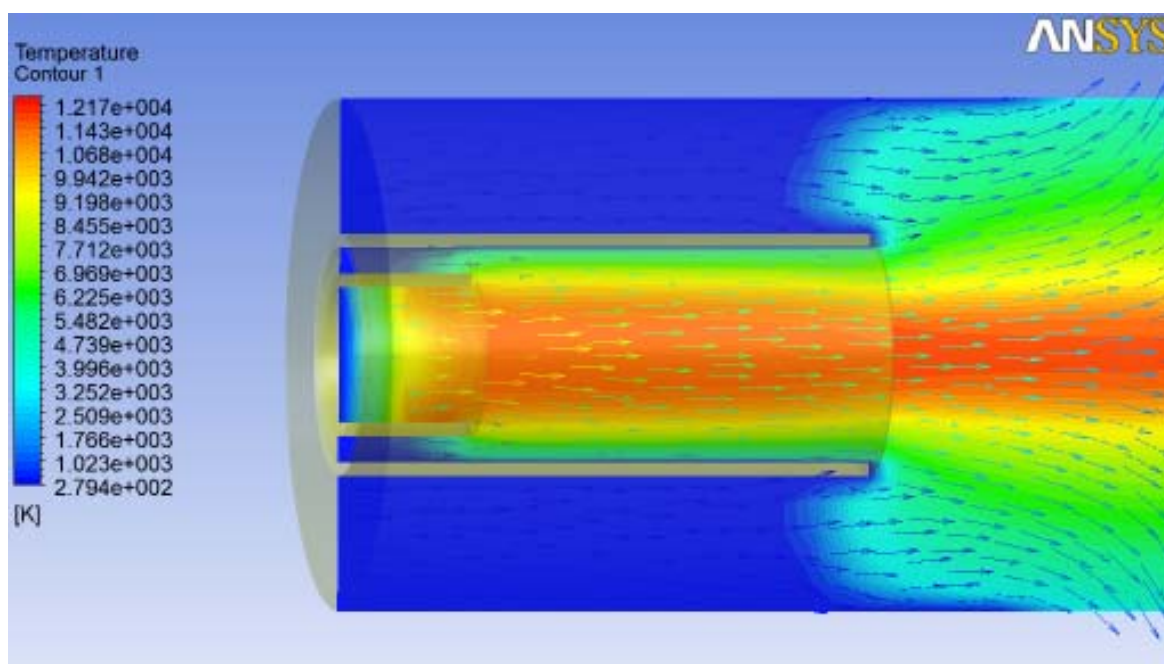


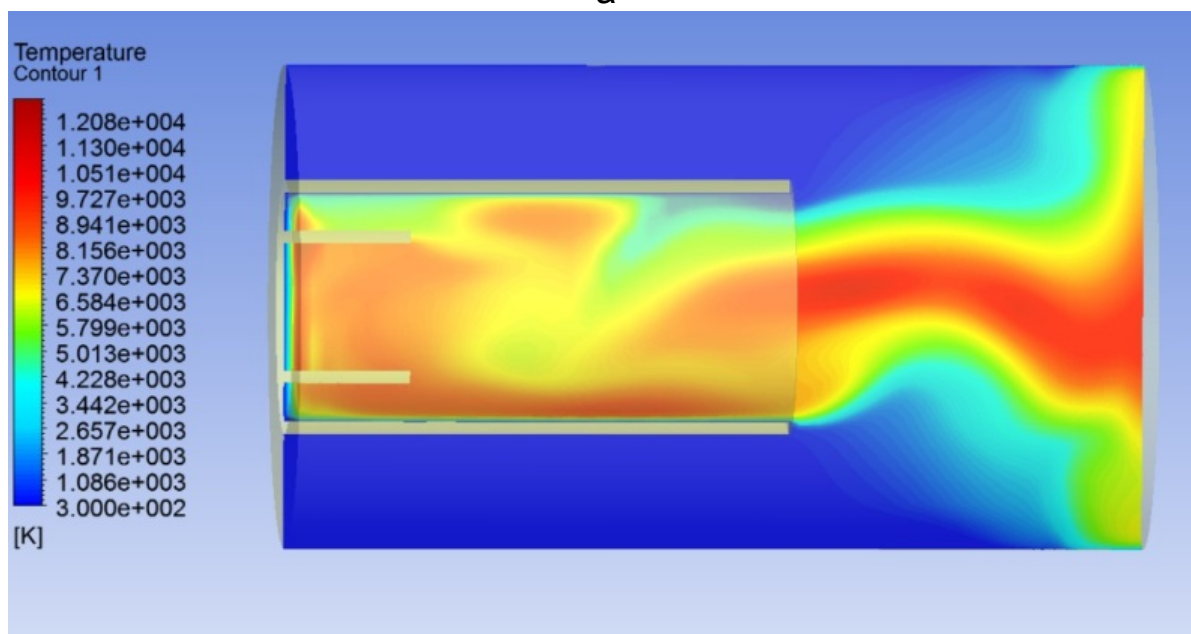
Рисунок 5 – Парциальное давление воздуха на срезе катода при продувках в МГД-постановке

Такая разница в результатах объясняется, прежде всего, неравномерностью температурного поля внутри газоразрядного канала (см. рис. 6).

При газодинамическом подходе учитывается только один механизм проникновения кислородсодержащих газов в прикатодное пространство – встречная диффузия вдоль стенки канала в пограничном слое. В случае МГД-задачи основным механизмом проникновения отравляющих газов является их попадание в зону обратного течения, возникающую в результате хаотического перемещения и искривления электрической дуги, вызванного взаимодействием самой дуги с потоком холодного газа и действием электромагнитной силы Лоренца.



а



б

Рисунок 6 – Распределение температур для тестовой задачи в рамках газодинамического (а) и магнитогазодинамического подходов (б)

### Выводы

1. Проанализированы современные методы моделирования физических процессов в плазмотронах. На примерах тестовых задач показана область применения каждого из подходов при проектировании газодинамической защиты катодных узлов.

2. Отличия в результатах вызваны невозможностью учета динамики электрической дуги в рамках газодинамического подхода,

однако перемещение опорных пятен дуги, режимы перепривязки существенно влияют на характер течения, создавая зоны обратных течений которые способствуют более быстрому переносу воздуха к прикатодному пространству.

#### Список использованных источников

1. Abschlussbericht «Strömungssimulation von Lichtbogen - und Plasmaprozessen». TU Dresden, Institut für Produktionstechnik. – Dresden, 2005. – 116 p.
2. Планковский, С.И. Научные основы создания высокоресурсных термоэмиссионных катодных узлов оборудования для плазменной обработки материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Планковский Сергей Игоревич. – Х, 2009. – 333 с.
3. Кривцов, В.С. Газодинамічні характеристики потоку інертного газу в каналі плазмотрона [Текст] / В.С. Кривцов, С.І. Планковський, Є.В. Цегельник, Є.К. Островський, А.О. Таран, А.В. Лоян // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – № 2. – С. 87 – 99.
4. Кривцов, В.С. Состав газа в плазмотроне с ламинарным потоком плазмообразующего инертного газа [Текст] / В.С. Кривцов, С.И. Планковский, Е.В. Цегельник, Е.К. Островский, А.А. Таран, А.В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4 (20). – С. 19 – 24.
5. Цегельник, Є.В. Обґрунтування параметрів газодинамічного захисту катодів плазмотронів для наземних випробувань літальних апаратів: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 / Цегельник Євген Володимирович – Х., 2010. – 174 с.
6. Дресвин, С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч.1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы [Текст]: учеб. пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 227 с.

*Поступила в редакцию: 15.03.2013.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*