

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО ПЛАЗМОТРОНА С ПОЛЫМ КОЛЬЦЕВЫМ КАТОДОМ

Безруков И.А., г. Новосибирск, «Центр электротехнологий» НГТУ;
Голубев А.О., г. Новосибирск, Кафедра ПЛА НГТУ golubeff@ngs.ru;
Косинов В.А., г. Новосибирск, ИТПМ СО РАН им. С.А. Христиановича;
Пархомук И.С., г. Новосибирск, «Центр электротехнологий» НГТУ;
Цыганков Д.А., г. Новосибирск, «Центр электротехнологий» НГТУ;
Малышев С.Н., г. Новосибирск, кафедра АЭТУ НГТУ, malushef@mail.ru

Плазмотроны с полым катодом используются в электротермических установках для различного назначения: в вакуумной электротермии, в порошковой металлургии, для переплава слитков и т.д.

Проведенные ранее экспериментальные исследования на опытно-промышленной вакуумной электропечи с полым катодом показали, что запуск плазмотрона с полым катодом и его последующая устойчивая работа возможны только при определенных расходах плазмообразующего газа [1]. Поэтому знание газодинамических характеристик плазмотрона является необходимым условием выхода плазмотрона на режим горения дуги с полым катодом (без контрагированного пятна) и условием дальнейшей его надежной работы.

В данной работе выполнена постановка задачи расчета газодинамических свойств вакуумного плазмотрона с полым кольцевым катодом и приведены первые результаты этого расчета. Расчёт проводился для “холодного” режима работы катода (без учета влияния столба плазмы при “горячем” режиме), при начальной температуре газа 20⁰С.

Основываясь на опыте газодинамических исследований плазмотронов [2, 3] и в результате сравнении результатов измерений параметров газового потока в “холодном” и “горячем” режимах работы катода, был сделан вывод о наличии устойчивых корреляционных зависимостей между “холодным” и “горячим” режимами работы катода, позволяющими прогнозировать характер течения газа. Таким образом, знание газодинамики полого катода при температуре 20⁰С

позволит сделать предварительные качественные предположения о “горячем” режиме работы катода.

Течение газа в плазмотроне описывается уравнениями газовой динамики, в основе которых лежат законы сохранения массы, импульса и энергии.

Система уравнений, записанная в рамках подхода Эйлера для декартовой системы координат, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_i v_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}((\rho E + P))v_k + q_k - \tau_{ik}v_i &= S_k v_k + Q_H,\end{aligned}$$

где t - время, v - скорость, ρ - плотность текучей среды, P - давление, S_i - массовые силы, действующие на единицу объема, E - полная энергия единичного объема, Q_H -тепло, выделяемое в единичном объеме [4],

$$\tau_{ik} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \text{тензор вязких сдвиговых напряжений,}$$

μ - коэффициент динамической вязкости, δ_{ij} - символ Кронекира,

k - кинетическая энергия турбулентности.

Кинетическая энергия турбулентности и ее диссипация определяются из решения следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k k) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho v_k \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}S_k &= \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_i P_b, \\ S_k &= 1.44 \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \mu_i C_b P_b \right) - 1.92 f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k},\end{aligned}$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} ,$$

$$P_b = - \frac{g_i}{0.9} \frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta x_i} ,$$

g_i - составляющие гравитационного ускорения, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $\sigma_k = 1$.

Решение системы уравнений в аналитическом виде можно получить лишь в частных случаях (одномерные течения, идеальный газ, и т.д.). Используя численные методы решения, можно получить решение практически для любой задачи.

Наиболее широко используемым методом численного решения является метод конечных элементов (МКЭ) [5].

Рассмотрим течение холодного газа в вакуумном плазмотроне с полым кольцевым катодом (схема плазмотрона приведена на рисунке 1). Расчет «холодного» режима важен для определения пусковых режимов плазмотрона, а так же позволяет определить, по корреляционным зависимостям, «горячий» режим плазмотрона [2, 3].

В плазмотрон через газоподводящие патрубки, независимо в каждую полость, подается инертный газ (аргон), с температурой 20⁰С, с относительными расходами $\frac{G}{F}$, равными $\frac{G_1}{F_1} = 4.1 \cdot 10^{-3}$, $\frac{G_2}{F_2} = 7.8 \cdot 10^{-3}$, $\frac{G_3}{F_3} = 8.1 \cdot 10^{-3} \frac{ea}{n \cdot i^2}$.

Газ, проходя полости плазмотрона, истекает в объем, соединенный трубопроводом с откачным постом, в котором поддерживается постоянное давление, равное 4x10⁻² Па. Со временем в исследуемом объеме устанавливается динамический вакуум.

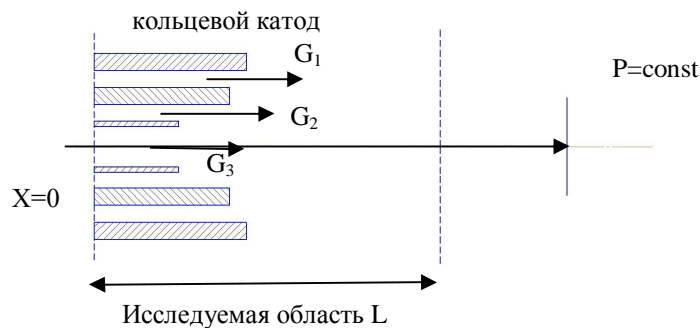


Рисунок 1. Расчетная схема плазмотрона.

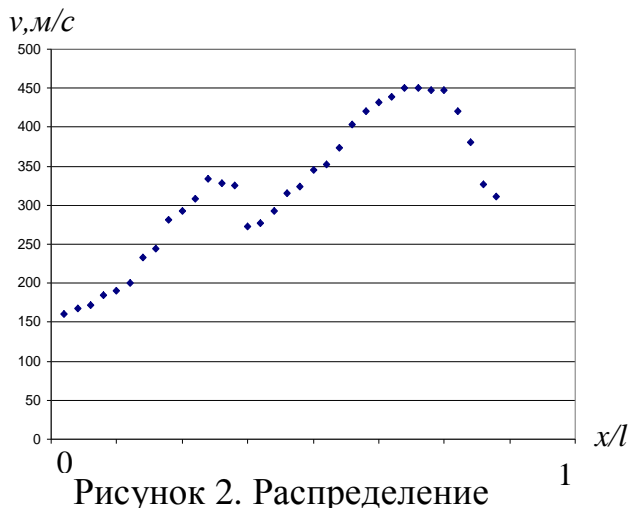


Рисунок 2. Распределение скорости газа вдоль оси плазмотрона

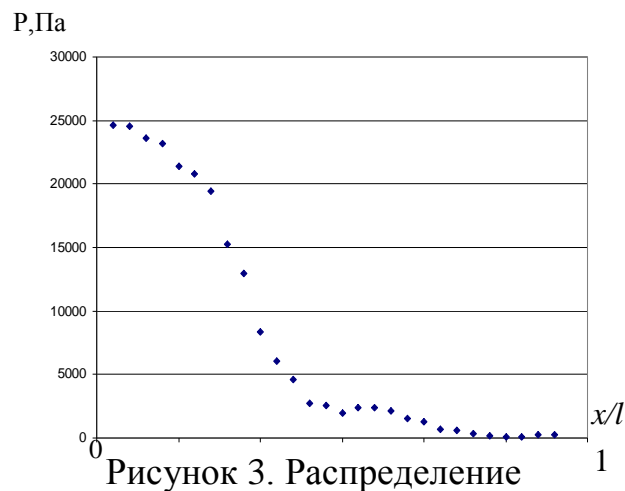


Рисунок 3. Распределение давления газа вдоль оси плазмотрона

Выполнены расчеты системы методом конечных элементов, при этом получены распределения скорости и давления газа в приосевой области струи (рисунок 2 и рисунок 3). Анализ структуры потока указывает на неоптимизированный режим подачи газов по каналам и связанный с этим локальный минимум скорости в приосевой зоне, соответствующий выходу потока из трубки, и смешению с более медленным потоком, движущимся концентрично. Полученное распределение скорости и давления в «горячем» режиме катода соответствуют замедленному и неустойчивому выходу катода в режим полого катода и связанные с этим повышенную эрозию катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косинов В.А., Кириченко В.А. и др. Исследование сильноточных дуг с полым катодом с целью создания промышленных плазмотронов для переработки металлических материалов. Отчет о НИР. Новосибирск, НЭТИ, 1984г. с. 144.
2. Безруков И.А., Захаркин Р.Я., Крошко В.Н., Маринин А.С. Исследование структуры потока газа в плазмотроне с проницаемой стенкой.// XI Всесоюзная конференция по генераторам низкотемперной плазмы.- Новосибирск: ИТФ, 1989, ч.1, с.24-25.
3. Безруков И.А., Захаркин Р.Я., Широков Ю.Р. Исследование структуры потока газа в канале плазмотрона с проницаемой стенкой с пористым вдувом.- Новосибирск: Известия СО АН СССР, Сер.техн. наук, вып.5, 1989. с.83-88.
4. Алямовский А.А. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. Изд. БВХ Петербург, С-Петербург, 2005г., с 800.
5. Д. Норри, Ж. де Фриз. "Введение в метод конечных элементов" (перевод с английского), – издательство "Мир", Москва, 1981 г., с.304.