

Моделирование процесса горения свободно горящей дуги атмосферного давления

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Отрабатывается математическая модель в рамках магнитогазодинамического описания плазмы как сплошной среды на основе уравнений газовой динамики, уравнений Максвелла и связей для термодинамических параметров в ионизированном газе. Модель пригодна для описания систем электрод – приэлектродная зона – плазма дуги и учитывает большинство особенностей процесса горения электрических дуг. Объектом исследования выбрана свободно горящая электрическая дуга атмосферного давления. Показано, что модель дает качественное совпадение с имеющимися данными и пригодна для проведения численных экспериментов.

Ключевые слова: плазма, приэлектродная область, электрическая дуга, плазмотрон, излучение, термозамесия.

Введение

Эффективное применение плазмотронов требует всесторонних исследований плазменных процессов с целью: выявления закономерностей процессов, протекающих в плазме; получения потока плазмы с требуемыми свойствами; определение оптимальных режимов работы плазмотронов; разработки новых конструкций плазмотронов; непосредственного управления плазмой и т.д. Поставленные задачи можно решать на основе экспериментального изучения и математического моделирования процессов в плазме. Зачастую экспериментальные методы имеют высокую погрешность из-за их не доскональности, и позволяют получать лишь интегральные характеристики плазмы. С другой стороны теоретическое исследование плазмы с помощью моделирования снимает многие ограничения натурального эксперимента [1].

Наиболее перспективным направлением для последующего развития промышленного плазменного оборудования это применение полых высоко-эмиссионных катодов, которые хорошо зарекомендовали себя в технике электровакуумных приборов, а также в электрореактивных двигательных установках, обеспечивая ресурс в несколько десятков тысяч часов.

Основной причиной выхода из строя систем с полым катодом работающих на атмосферном давлении является отравление материала катода кислородсодержащими газами. Поэтому создание моделей в рамках магнитогазодинамического подхода с учетом зависимости эмиссионных свойств катода от его температуры и состава газа является актуальной задачей. Однако такие модели должны быть предварительно отработаны на более простых объектах.

Постановка задачи

Наиболее подходящим объектом для численных исследований является осесимметричная задача о свободно горящей электрической дуге между стержневым катодом и плоским анодом в аргоне при атмосферном давлении. Эта конфигурация является наиболее доступным объектом для экспериментальных

исследований. Ее характеристики, а также параметры приэлектродных зон изучались как экспериментально, так и численно.

В качестве тестовой в настоящей работе рассматривалась следующая задача. Цилиндрический вольфрамовый катод имеет длину 30мм и диаметр 3.2 мм. Катод конически заточен под углом 60 градусов, и на конце имеет плоскую площадку диаметром 0.2мм. Плоский медный анод удален от конца катода на расстояние 5мм (см. рис.1). В расчетах задается расход защитного газа (аргона) через кольцевую щель размером 5мм, 10л/мин, что соответствует скорости 1,3 м/с. Температура на внешнем конце катода и на нижней поверхности анода фиксированная - 300 К. [2]

Исходя из рекомендаций работы [3] размеры ячеек для приэлектродных областей гексагональной сетки конечно-элементной модели были выбраны - 0.01см и 0.04см что соответствует соотношению $\frac{D_e}{W}$, где D_e – коэффициент диффузии электронов, а W – дрейфовая скорость электрона.

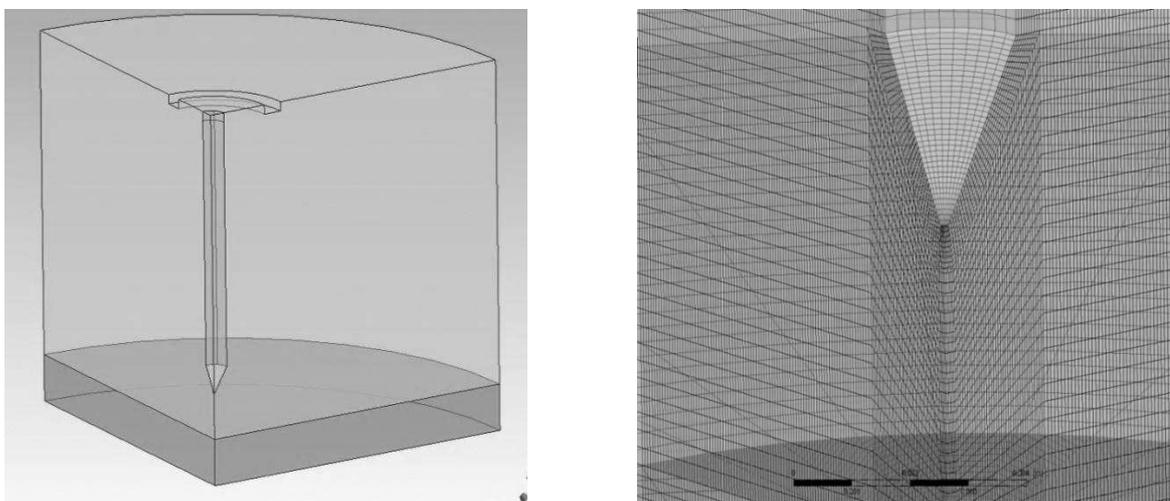


Рис. 1. Твёрдотельная модель и конечно-элементная сетка модели

1.2 Основные допущения

Математическое описание базировалось на магнитогазодинамическом подходе к плазме как к сплошной среде на основе уравнений газовой динамики, уравнений Максвелла и связей для термодинамических параметров в ионизированном газе.

За исключением прикатодной области модель была записана с учетом следующих предположений:

- Плазма предполагается квазинейтральной: $n_e = n_i$ или $n_e = \sum_a Z_a n_a$ в

случае многозарядных ионов или многокомпонентной плазмы;

- Термически равновесной – температура всех групп частиц одинакова;
- Состав газа, находящегося в термодинамическом равновесии, может быть определен через термодинамические параметры газа. Ионизационное равновесие в плазме описывается на основе уравнения Саха:

$$n_e \left(\frac{n_r}{n_{r-1}} \right) = 2 \frac{g_r}{g_{r-1}} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{U_I - \Delta U_I}{k T_e} \right)$$

- В плазме справедлив закон Ома в простейшей форме: $\bar{j} = \sigma \bar{E}$
- Выражение для давления может быть записана как сумма давлений отдельных компонент: $p = \sum_a n_a kT_a + n_e kT_e$
- Течение плазмы осесимметричное стационарное;
- Механизм эмиссии электронов предполагался термоэмиссионным, подчиняющимся закону Ричардсона.

1.3 Модель излучения

При решении задачи излучение плазмы моделировалось в виде отрицательного объемного источника. Для определения зависимости полного излучения от температуры была использована методика расчета, представленная в работе [6].

$$U_r = 1.14e^{-40} \sqrt{T} \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{kT}\right) n_e \left[n_i \exp\left(\frac{hv}{kT}\right) + 4n_{2i} \exp\left(\frac{hv^+}{kT}\right) \right], \quad (1)$$

где $hv = 2.85\text{eV}$; $hv^+ = 8.2\text{eV}$; $\Delta E_i = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R_D}$ – понижение потенциала ионизации; R_D – радиус Дебая.

Данная формула описывает лучистые потери, обусловленные тормозным и рекомбинационным излучением, а также дискретными переходами между возбужденными состояниями атома и иона. Результат расчета для равновесной аргонной плазмы по этой формуле приводится на рис. 2

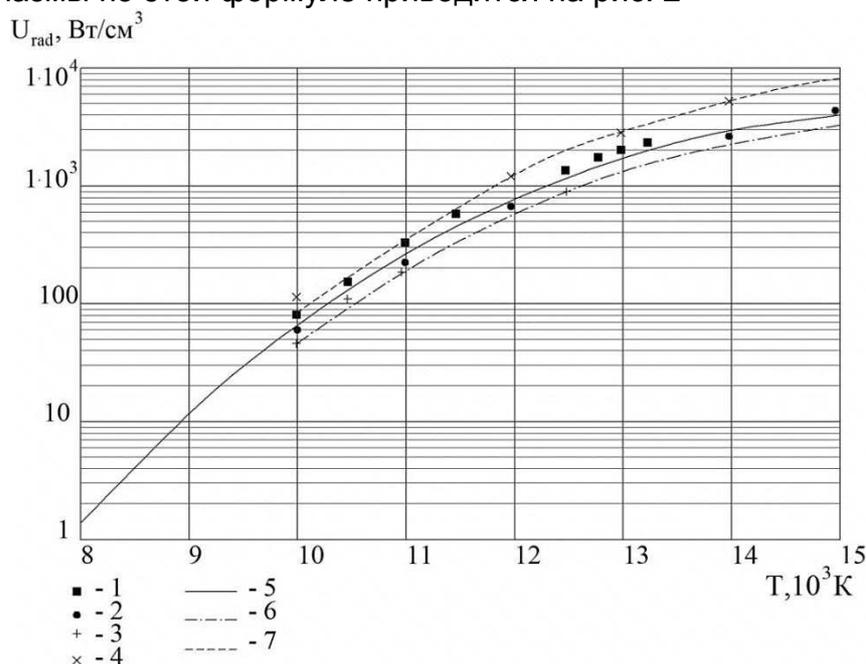


Рис. 2. Полное излучение равновесной аргонной плазмы в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1, 2, 3, 4 – экспериментальные данные; 5, 6, 7 – расчётные данные

Излучения с поверхности катода рассчитывалось с помощью закона Стефана-Больцмана

$$P_{rad} = -\sigma \epsilon T^4 \quad (2)$$

2.1 Модель приэлектродной области

Для приэлектродной области выделим три наиболее важных типа отклонений от ЛТР: отклонение температуры электронов от температуры тяжелых частиц; нарушение ионизационного равновесия; нарушение квазинейтральности. Приэлектродная область условно разделена на несколько подслоев – слой плазмы в ЛТР; переходный слой Кнудсена, слой пространственного заряда и поверхность катода.

Граничными условиями для приэлектродной области будут значения равновесных концентраций заряженных и нейтральных частиц для столба плазмы в ЛТР что дает нам возможность использовать уравнение Саха [7].

$$n_e \left(\frac{n_i}{n_a} \right) = 2 \frac{g_i}{g_a} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{U_i - \Delta U_i}{k T_e} \right), \quad (3)$$

с учетом условия квазинейтральности $n_e = n_i$ уравнение можно записать в виде:

$$\frac{n_e^2}{n_a} = A \frac{g_i}{g_a} T_e^{3/2} \exp \left(- \frac{U_i}{k T_e} \right), \quad (4)$$

где n_i, n_e, n_a - концентрации ионов, электронов и атомов в плазме соответственно, $A = 4.85 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}/\text{К}^{3/2}$, U_i - энергия ионизации, T_e - температура электрона, k - постоянная Больцмана, g_i, g_a - статистические суммы для ионов и атомов. Для аргоновой плазмы примем $g_i = 6, g_a = 1, U_i = 15.75 \text{ eV}$ [8].

Другим условием ЛТР является выполнение закона идеального газа:

$$p_t = \sum_k n_k k T_k = n_e k (T_e + T_a) + n_a k T_a, \quad (5)$$

где p_t - давление;

Для расчета концентрации заряженных частиц для переходного слоя воспользуемся упрощенной формулой:

$$\frac{n_{\pm}}{n_{\pm}} = (0.9107 + 0.2363\beta) \sqrt{\frac{1+1/\mu}{1+\beta}} \quad (6)$$

где n_{\pm} концентрация заряженных частиц в прикатодной области, $\beta = \frac{T_h}{T_e}$ - отношение температуры тяжелых частиц к температуре электронов, μ - отношение ионизации к частоте столкновений частиц.

Совместное решение уравнений 3, 4 и уравнения 5 позволяет определить концентрации заряженных и нейтральных частиц. В результате получаем следующую зависимость концентраций от температуры, рис.3.

Отношение концентраций заряженных частиц для прикатодного слоя и столба дуги связано с падением потенциала в прикатодной области критерием Больцмана:

$$U_v = \frac{k T_e}{e} \ln \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\pm}} \right) \quad (7)$$

Из уравнения 7 получаем следующую зависимость падения потенциала от температуры электронов см. рис. 4

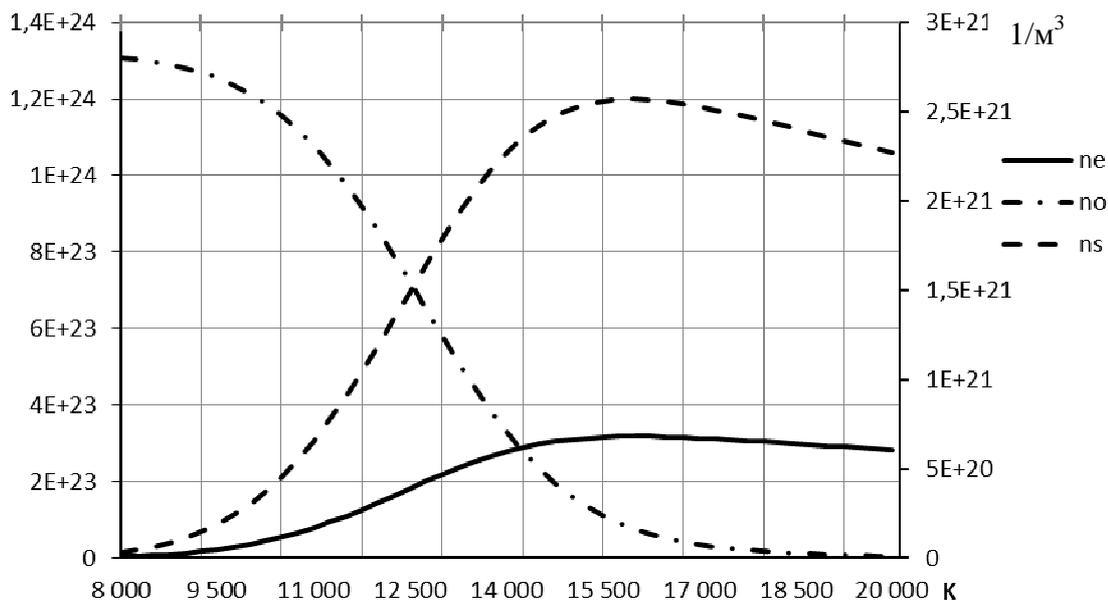


Рис. 3. Зависимость концентрации частиц от температуры (значения ne и no отложены по левой оси ординат)

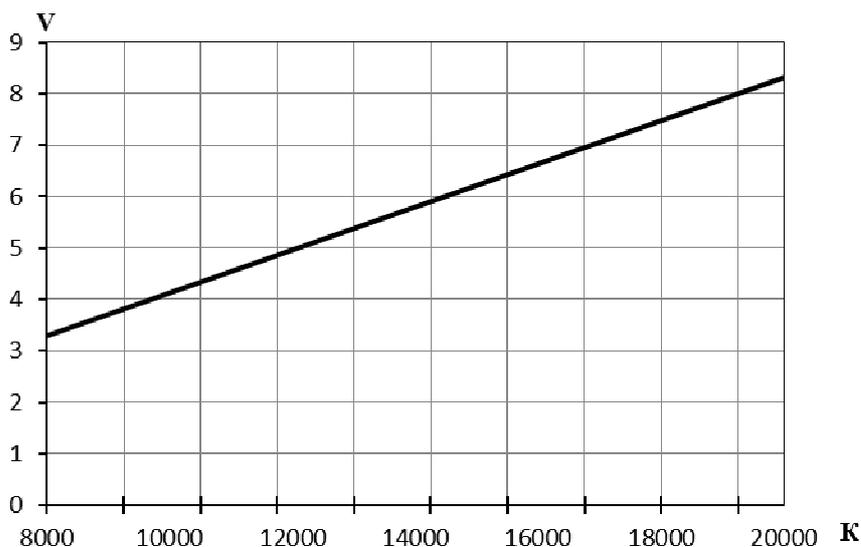


Рис. 4. Падение потенциала в прикатодной области в зависимости от температуры

Полный ток на поверхности катода рассчитывается по формуле:

$$j = j_{em} - \frac{en_s}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} e^{-eU_s/kT} \quad (8)$$

Ток эмиссии определяется исходя из уравнения Ричардсона-Дэшмана

$$j_{em} = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (9)$$

где j_e – плотность тока термоэмиссии, A/m^2 ; $A=1.2 \cdot 10^6 A/m^2 \cdot K^2$; T – температура твердого тела, К; $e\phi$ – работа выхода.

Второй член с правой стороны уравнения 8 описывает вторичные токи и ток Герца-Кнудсена-Ленгмюра.

Результаты моделирования

Контроль сходимости решения осуществлялся исходя из условия:

$$\max \left| \frac{\varphi(M) - \varphi^*(M)}{\varphi(M)} \right| \leq \varepsilon \text{ для всех } M \quad (10)$$

где φ есть значение искомой переменной в узле M контрольно объема, полученное при предыдущей итерации решения, а φ^* есть значение в данной итерации, $\varepsilon = 0.005$.

Критерием окончания итерационной процедуры являлось достижение значения величины невязки дифференциального уравнения $R \approx 0.0001$.

На рис. 5 представлена картина изотерм и течения, полученная в результате моделирования, максимальная температура составила 21800 К, а максимальная скорость на оси в катодной струе составила 275 м/с, что удовлетворительно согласуется с результатами других авторов. На рис.6 представлена зависимость температуры от расстояния до оси катода полученная как экспериментально, так и численно

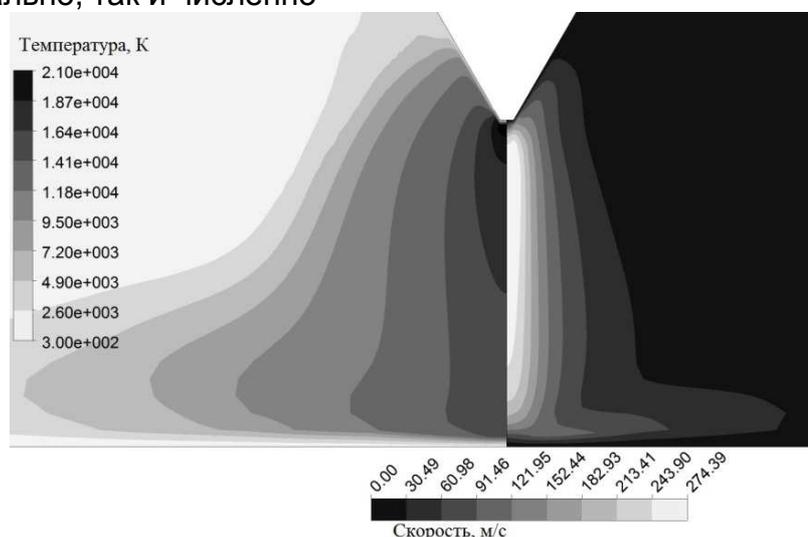


Рис. 5. Поле температуры (слева) и течения аргонной плазмы

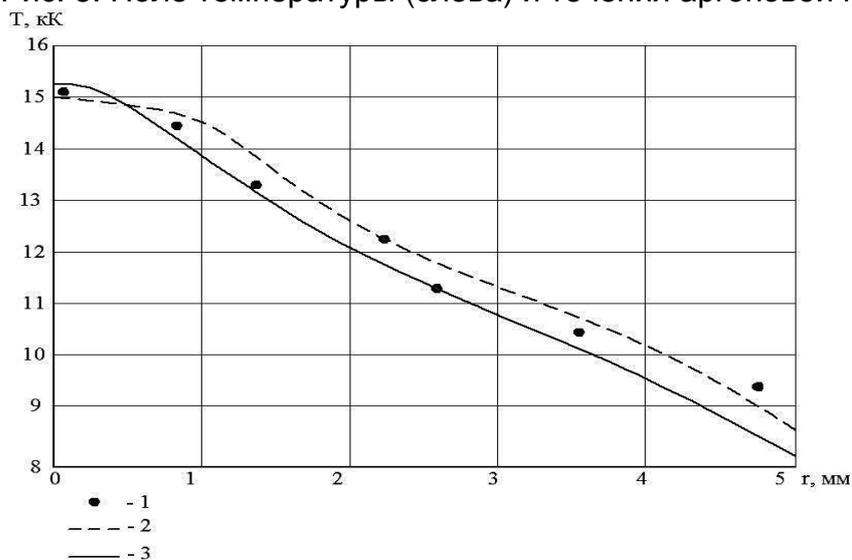


Рис. 6. Зависимость температуры от расстояния от оси катода, 1 - экспериментальные данные Haddad, Farmer (1984); 2 – расчетные данные Саломатов В.В. (2003); 3 – данные автора

Заключение

Таким образом, была разработана и апробирована замкнутая модель для расчета процессов при горении свободно горящих дуг атмосферного давления на аргоне. Результаты расчетов качественно совпадают с экспериментальными данными, что существенно расширяет рамки применимости данной модели для исследований не только свободно горящих дуг но и процессов в электродуговых нагревателях. Модель пригодна для описания систем электрод – приэлектродная зона – плазма дуги и учитывает большинство особенностей процесса горения электрических дуг к которым можно отнести процессы конвективного и радиационного теплообмена, турбулентный характер течения. При этом все еще остается ряд нерешенных вопросов касающихся учета многокомпонентного течения, а также определения условий привязки дуги к поверхности электродов.

Список литературы

1. Нгуен Куок Ши. Исследование индукционных и дуговых плазмотронов: дисс. д-ра техн. наук: / Нгуен Куок Ши. - Санкт-Петербург, 2002. - 439 с.
2. Саломатов В.В. Математическое моделирование процессов в электродуговых генераторах низкотемпературной плазмы: дис. канд. физ. мат. наук: 05.13.18. – Новосибирск, 2003. – 116 с.
3. J Lowke and M Tanaka "LTE-diffusion approximation' for arc calculations", 2006 J. Phys. D: Appl. Phys. 39 3634
4. M Schnick "Modelling of gas-metal arc welding taking into account metal vapour "; M Schnick, U Fuessel, M Hertel, M Haessler, A Spille-Kohoff and A B Murphy, 2010 J. Phys. D: Appl. Phys. 43 434008.
5. Lowke, J.J., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 14 (1974) 11 1.
6. Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А. Лучистые потери аргонной плазмы и излучательная модель непрерывного оптического разряда.// ЖЭТФ -1974 -Т. 66- С. 954-964.
7. H Schmitz and K-U Riemann "Analysis of the cathodic region of atmospheric pressure discharges"/ 2002 J. Phys. D: Appl. Phys. 35 1727
8. Грановский В.Л., «Электрический ток в газе (установившийся ток)», Москва, Наука, 1971.

Рецензент: д. т. н., профессор Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 20.03.12

Моделювання процесу горіння вільно палаючої дуги при атмосферному тиску

Відпрацьовується математична модель в рамках магнітогазодинамічного описання плазми як суцільного середовища на основі рівнянь газової динаміки, рівнянь Максвелла і зв'язків для термодинамічних параметрів в іонізованому газі.

Модель придатна для описання систем електрод – приелектродна зона – плазма дуги і враховує більшість особливостей процесу горіння електричних дуг. Об'єктом досліджень вибрано вільно палаючу електричну дугу атмосферного тиску. Показано, що модель дає якісний збіг з існуючими результатами і придатна для проведення числових експериментів.

Ключові слова: плазма, приелектродна область, електрична дуга, плазмотрон, випромінювання, термоемісія

Numerical simulation of free burning arc at atmospheric pressure

The mathematical model describing the plasma as a continuum based on the equations of gas dynamics, Maxwell's equations and relations for the thermodynamic parameters of the ionized gas within magnetogasdynamics approach are investigated. The model is suitable for describing systems of electrode - electrode zone - plasma arc and takes into account most of the features of the process of burning electric arcs. Free burning arc at atmospheric pressure were chosen as the object of investigation. It is shown that the model gives qualitative agreement with the available data and is suitable for numerical experiments.

Keywords: plasma region near the electrode, electric arc, plasma torch, radiation, thermal emission