

А. Ю. Ш е м а х и н (Казань, КФ(П)У). **Моделирование газодинамики струйного ВЧ разряда пониженного давления в открытой среде CSC-ELMER.**

В работе [1] построена замкнутая самосогласованная математическая модель ВЧ разряда с продувом газа при пониженных давлениях (13,3–133 Па). Однако скорость потока в ней аппроксимируется по экспериментальным данным, поэтому возможности практического использования этой модели ограничены. Для эффективного управления технологическими параметрами струйного ВЧ разряда пониженного давления необходимо учитывать газодинамику потока и процессов обтекания образца.

Число Кнудсена для плазменного потока при пониженных давлениях $0,03 < \text{Kn} < 0,2$, т. е. течение осуществляется в переходном режиме, для которого нет общепризнанных моделей, подобных уравнению Навье–Стокса для сплошных сред. Однако можно использовать уравнение Навье–Стокса, дополнив его вязкостными членами, тем самым стабилизировав поток и приблизив его к реальной плазменной структуре. Запишем уравнения Навье–Стокса в виде

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) - \nabla \sigma = \rho \mathbf{f}, \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho \right) + \rho (\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

где σ — тензор напряжений. Для Ньютоновской жидкости он записывается в виде

$$\sigma = 2\mu\varepsilon - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})I - pI, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где μ — вязкостный коэффициент.

Расчеты проводились в предположении модели идеального совершенного газа, т. е. выполняется соотношение

$$\rho = \frac{p}{RT}. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности представлено в виде

$$\rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \tau : \varepsilon + \rho h, \quad \tau = 2\mu\varepsilon, \quad (4)$$

где c_v — теплоемкость газа.

Теоретических исследований разрешимости и единственности системы уравнений (1)–(4) не существует, поэтому единственный способ исследования — использование численных методов.

Путем численного моделирования установлено, что для корректных результатов при пониженных давлениях необходимо учитывать вязкостные силы.

С помощью среды CSC-ELMER [2] проведен расчет системы уравнений теплопроводности и Навье–Стокса для цилиндрического плазматрона радиусом 0,1 м, длиной 0,3 м, с рабочим газом аргон при температуре 380° К, скорость потока $v = 20$ –200 м/с. Для расчетов использовалась треугольная сетка. Вязкостная модель — модель Carreau–Yasuda.

Результаты расчетов показали, что поток устанавливается достаточно быстро и численная схема достигает точности 10^{-6} . Однако при увеличении скорости потока течение не устанавливается. Для установления течения при скорости $v > 200$ м/с ведется подбор адекватной вязкостной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-01-00728а) и Минобрнауки РФ (госконтракт от 06.09.2010 г. № 14.740.11.0080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кашапов Н. Ф.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000.
2. CSC-IT Center for Science Elmer Models Manual. P.O. Box 405 FI-02101 Espoo, Finland, 2008.