

УДК 519.6 : 533.93

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ ¹⁾

В.С. ЖЕЛТУХИН¹, А.Ю. ШЕМАХИН²

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет,

² Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: vzheltukhin@gmail.com; shemakhin@gmail.com

SIMULATION THE FLOW OF frequency plasma under LOWER pressure

V.S. ZHELTUKHIN¹, A.Yu. SHEMAKHIN²

¹ Kazan National Research Technological University, ² Kazan Federal University

Аннотация

Разработана математическая модель течения разреженной ВЧ-плазмы в двухкомпонентном приближении. Проведены расчеты основных характеристик потока нейтральной и электронной компонент ВЧ-плазмы пониженного давления. Рассмотрены результаты моделирования.

Ключевые слова: Математическая модель, ВЧ-плазма, пониженное давление, плазмодинамика.

Summary

Mathematical model of the flow of rarefied RF plasma in a two-component approach is constructed. The calculations of the basic characteristics of the flow of neutral and electron components of the RF plasma at low pressure and the results of the simulation are presented.

Key words: Mathematical model, RF plasma, low pressure, plasma-dynamic.

1. Постановка задачи и математическая модель струйного течения ВЧ-плазмы пониженного давления

Обработка в ВЧ-плазме пониженного давления ($P = 13.3 - 133$ Па) с продувом газа широко применяется для модификации поверхностей материалов [1, 2]. Для эффективного управления технологическими параметрами плазменного воздействия необходим расчет характеристик потока плазмы с помощью адекватной математической модели, учитывающей газодинамику процессов течения и обтекания образца.

Струя ВЧ-плазмы пониженного давления отличается от потока нейтрального газа тем, что она является "паразитным" разрядом, горящим между колпаком вакуумной камеры и верхним витком индуктора (в индукционном разряде), либо верхним электродом (в ёмкостном разряде). Взаимодействие между заряженными частицами в разряде осуществляется дальнедействующими кулоновскими силами. В диапазоне давлений $P = 13.3 - 133$ Па плазма термически неравновесна, степень термической неравновесности $\theta = T_e/T_a = 10 - 100$, где T_e – электронная, T_a – газовая температуры.

Анализ элементарных процессов и оценка характерных масштабов плазмы показали, что течение электронного и нейтрального газов происходит в переходном режиме между течением сплошной среды и свободномолекулярным потоком. В струе ВЧ-плазмы пониженного давления число Кнудсена Kn для электронного газа $10^{-3} \leq Kn \leq 10^{-1}$, для газа ионов $5 \cdot 10^{-4} \leq Kn \leq 5 \cdot 10^{-3}$, для нейтрального газа $8 \cdot 10^{-3} \leq Kn \leq 7 \cdot 10^{-2}$. Для переходного режима не существует устоявшихся моделей типа уравнения Навье–Стокса [5,6]. Для расчета течения нейтрального газа в переходном режиме используется

¹⁾Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-01-00955, 14-01-00755) и Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, проект от 01.02.2014 г. № 2196)

метод прямого моделирования, разработанный Г.Бердом [4], который успешно применяется для широкого класса задач.

Струйное течение ВЧ-плазмы пониженного давления отличается от течения нейтрального газа присутствием в потоке заряженных частиц. В результате упругих столкновений электронов с атомами и ионами происходит нагрев тяжелых частиц. Частота упругих столкновений, в которых происходит обмен энергией между частицами плазмы в ВЧ-разряде пониженного давления составляет $10^{10} - 10^{11}$ Гц. В упругих столкновениях электроны передают атомам энергию

$$E_c = \frac{3}{2}k_B\delta\nu_c n_e(T_e - T_a), \quad (1)$$

где $\delta = m_e/2m_a$, m_a – масса атома, m_e – масса электрона, k_B – постоянная Больцмана, n_e – концентрация электронов. Поэтому течение плазмы отличается от течения нейтрального газа наличием распределенного источника тепла, удельной мощностью (1).

При указанных выше предположениях газодинамические свойства квазинейтральной струи ВЧ-плазмы пониженного давления описываются системой начально-краевых задач:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} - \text{div} (D_a \text{grad} n_e - \mathbf{v}_a n_e) = \nu_i n_e, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n_e|_{\text{inlet}} &= n_{e\text{inlet}}, \\ n_e|_{\text{outlet}} = 0, n_e|_{\text{walls}} &= 0, n_e|_{\text{body}} = 0, \end{aligned}$$

$$\mathbf{v}_a(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{c} f(\mathbf{c}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{c},$$

$$c_p \rho_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \text{div} \left(\lambda_e \text{grad} T_e - \frac{5}{2} k_b n_e T_e \mathbf{v}_e \right) + \frac{3}{2} k_b \delta \nu_c n_e (T_e - T_a) = \sigma E^2 - \nu_i n_e E_I, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_e|_{\text{inlet}} &= T_{e\text{inlet}}, \\ T_e|_{\text{outlet}} = T_{e\text{room}}, T_e|_{\text{walls}} &= T_{e\text{room}}, \end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial T_e}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{body}} = 0,$$

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v}_a - (D_a/n_e) \text{grad} n_e$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{c} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{c}} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\text{coll}}, \quad (4)$$

$$T_a|_{\text{inlet}} = T_{a\text{inlet}}, T_a|_{\text{outlet}} = T_{a\text{room}}, T_a|_{\text{walls}} = T_{a\text{room}},$$

$$\mathbf{v}_a|_{\text{inlet}} = \mathbf{v}_{a\text{inlet}}, \left. \frac{\partial \mathbf{v}_a}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{outlet}} = 0, \quad \mathbf{v}_a|_{\text{body}} = 0, \mathbf{v}_a|_{\text{walls}} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial n_a}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{inlet}} = n_{a\text{inlet}}, \left. \frac{\partial n_a}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{outlet}} = 0, \quad \left. \frac{\partial n_a}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{walls}} = 0, \left. \frac{\partial n_a}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\text{body}} = 0,$$

где $f(\mathbf{c}, \mathbf{r}, t)$ – функция распределения плотности частиц нейтральной компоненты ВЧ-плазмы в фазовом пространстве, \mathbf{c} и \mathbf{r} – вектора скоростей и координат соответственно.

2. Численный метод и результаты расчетов

Для решения поставленной задачи с помощью метода, предложенного в работе [3], создан программный комплекс, использующий библиотеки DSMC и FVM пакета OpenFoam, который работает под ОС Linux. Комплекс программ рассчитывает газодинамические параметры ВЧ-плазмы в струе ВЧ-разряда пониженного давления. Расчет проведен для модели вакуумной камеры радиусом $R = 0.2$ м, радиусом входного отверстия $r = 0.012$ м и длиной камеры $L = 0.5$ м. Давление рабочего газа Аргон на входе $P = 55 - 155$ Па, температура $T = 400 - 750$ К, расход газа $G = 0.12 - 0.24$ г/с. Степень ионизации в камере $\delta = 10^{(-4)} - 10^{(-7)}$, начальное давление в камере $P = 5.5 - 15.5$ Па.

Проведены расчеты нейтрального газа и заряженной коспоненты ВЧ-плазмы пониженного давления. Из расчетов видно, что в свободном режиме течения профиль поперечного сечения скорости имеет колоколообразную форму, при чем с удалением от входного отверстия высота "колокола" (значение скорости по оси потока) уменьшается, а основание увеличивается, т.е. струя расширяется.

Проведен расчет давления и температуры в камере при скорости 1000 м/с на входе в камеру. Из графиков видно, что на небольшом удалении от входного отверстия ($z = 0.001$ м) происходит перегрев струи по границе потока, разность температур на краю и в центре потока составляет около 115 К (рис. 1, кривые 1, 2). С удалением от входного отверстия в направлении потока на расстояние $z > 0.1$ м профили давления и температуры выравниваются, однако заметно, что имеет место переход кинетической энергии атомов струи в тепловую (рис. 1, кривые 5, 6). Данный переход осуществляется, по-видимому, из-за расширения струи и резкого торможения молекул при входе в вакуумную камеру. Для модели с образцом расчет показал, что скорость убывает при приближении потока газа к телу, а далее вокруг тела становится заметно больше, чем в области столкновения потока с плоскостью образца (рис. 2), что соответствует экспериментальной картине движения газа. Проведен расчет давления и температуры в камере. Представлены профили и изолинии температуры, давления и скорости потока газа.

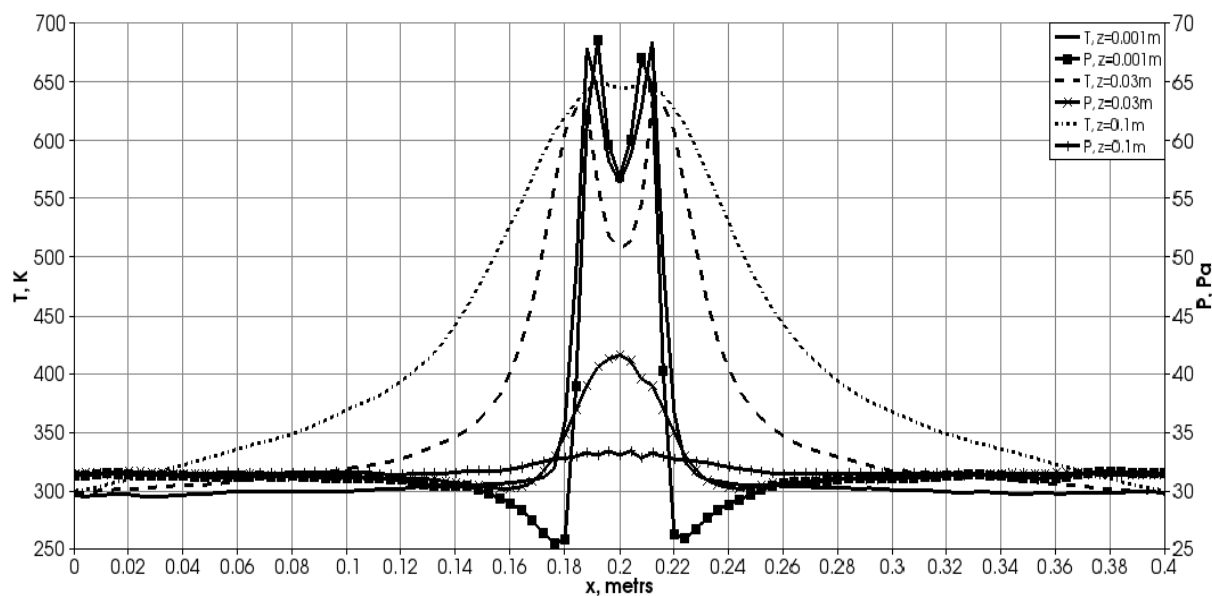


Рис. 1: Распределение давления и температура в поперечном сечении невозмущенной струи в зависимости от расстояния от входного отверстия

Разработанная комбинированная модель струйного течения ВЧ-плазмы пониженного давления соединяет в себе статистическую модель для нейтрального газа и модель сплошной среды для газа заряженных частиц. Результаты расчетов нейтральной компоненты ВЧ-плазмы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000. – 348 с.
2. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокоочастотной плазме пониженного давления: монография – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007. – 356 с.

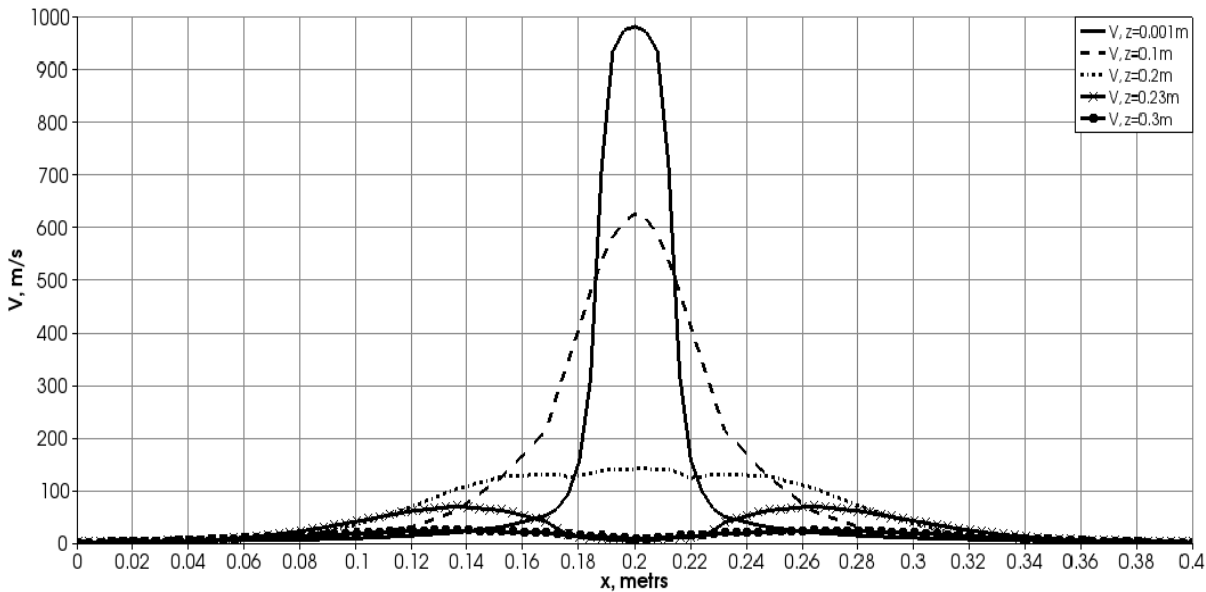


Рис. 2: Модуль скорости в поперечном сечении струи при наличии образца в зависимости от расстояния от входного отверстия

3. **Желтухин В.С., Шемахин А.Ю.** Расчет газодинамики струй ВЧ-плазмы пониженного давления // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2011. – Т. 153, кн.4. – С. 135-142.
4. **Bird G.A.** Bird G.A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. – Oxford University Press, 1994. – 476 p.
5. **Дулов В.Г., Лукьянов Г.А.** Газодинамика процессов истечения. – М: Наука, 1984. – 234 с.
6. **Белоцерковский О.М.** Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 518 с.

REFERENCES

1. **Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Kashapov N.F.** Radio-frequency plasma-blasting materials at low pressures. Theory and Practice [Vysokochastotnaya plazmenno-struynaya obrabotka materialov pri ponizhennykh davleniyakh. Teoriya i praktika primeneniya]. – Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo Universiteta, 2000. – 348 p. (in Russian).
2. **Abdullin I.Sh., Zheltukhin V.S., Sagbiev I.R. and Shaekhov M.F.** Nanolayers Modification in Low Pressure RF Plasma [Modifikatsiya nanosloyev v vysokochastotnoy plazme ponizhennogo davleniya]. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhnol. un-ta, 2007. – 356 p. (in Russian)
3. **Zheltukhin V.S., Shemakhin A.Yu.** Calculation of gasdynamic jet RF plasma at low pressure [Raschet gazodinamiki struy VCH-plazmy ponizhennogo davleniya] // Uchen. zap. Kazan. un-ta. Ser. Fiz.-matem. nauki. – 2011. – V. 153, № 4. – P. 135–142. (in Russian)
4. **Bird G.A.** Bird G.A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. – Oxford University Press, 1994.- 476 p.
5. **Dulov V.G., Lukyanov G.A.** Gas dynamics of processes of the expiration [Gazodinamika protsessov istecheniya]. – Moscow: Nauka, 1984. – 234 p. (in Russian)
6. **Belotserkovskii O.M.** Numerical modeling in continuum mechanics [Chislennoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred]. – Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984. – 518 p. (in Russian)