

УДК 537.523 (575.2) (04)

## СВЧ-ПЛАЗМОТРОН КОАКСИАЛЬНОГО ТИПА

*Э.Б. Кулумбаев* – докт. физ.-мат. наук

*В.М. Лелевкин* – докт. физ.-мат. наук

*Г.В. Лысов* – канд. физ.-мат. наук (Москва)

On the basis of two-dimensional magnetic gaseous dynamic equations the calculation of features of microwave coaxial torch in nitrogen at atmospheric pressure is performed and exposed in the article.

**Введение.** СВЧ-разряды с коаксиальным подводом электромагнитной энергии находят широкое применение в различных научных, технических и технологических задачах [1–3]. Практика реализации различных схем СВЧ-разрядов в так называемых "обрезанных коаксиалах" (когда один из электродов коаксиальной линии короче другого) показала, что плазменное образование всегда стремится "достроить" укороченный электрод [1, 4]. Например, в традиционной схеме СВЧ-плазмотрона коаксиального типа разряд возбуждается на конце укороченного внутреннего водоохлаждаемого электрода (радиусом  $\sim 1$  см), а устойчивость пространственной локализации плазменного факела достигается прямоструйной или вихревой подачей рабочего газа между внутренним и внешним электродами коаксиальной линии [3]. В [4] предложен новый вариант генерации плазменного факела в импульсном режиме источника питания (магнетрона с частотой 2.45 ГГц), при котором укороченный внутренний электрод выполнен в виде трубки (радиусом  $\sim 1$  мм), обеспечивающей подачу плазмообразующего газа, а внешний электрод – в виде системы ("корзины") стержней. Длина внутреннего электрода от входа в коаксиальную часть выбирается так, чтобы торец трубки находился в максимуме электрического поля стоячей волны, образующейся без разряда при отражении бегущей

волны от зоны круглого запердельного волновода. При относительно низком уровне СВЧ мощности ( $\sim 1$  кВт) удается получить пробой и обеспечить генерацию факела в различных газах в широком диапазоне давлений, включая атмосферное.

В данной работе на основе двумерных магнитогазодинамических (МГД) уравнений проводится расчет характеристик плазмы азота при атмосферном давлении в СВЧ-плазмотроне коаксиального типа с укороченным внутренним электродом с целью оценки возможностей осуществления стационарного режима и масштабирования процесса генерации плазменного факела, предложенного в [4].

**Модель.** Рассматривается СВЧ-разряд, горящий в возбуждаемом ГЕМ-волной коаксиальном волноводе с укороченным внутренним электродом, выполненном в виде трубки для транспортировки плазмообразующего газа (варианты схем расчетной области приведены на рис.1–2). Считается, что материал электродов – идеально проводящий. Полагается, что образующаяся в зоне круглого запердельного волновода осесимметричная равновесная плазменная струя обеспечивает условия существования электромагнитного поля с компонентами  $\vec{E}(E_r; 0; E_z) \exp(i\omega t)$ ,  $\vec{B}(0; B_\phi = B; 0) \exp(i\omega t)$ .

**Уравнения.** Газодинамические, тепловые и электромагнитные характеристики СВЧ-разряда в осесимметричном МГД приближении

описываются на основе системы стационарных уравнений непрерывности, движения (Навье-Стокса), баланса энергии и волнового уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u) &= 0, \\ \rho \left( v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{4} \sigma (E_z B_\varphi^* + E_z^* B_\varphi) + \\ &+ \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2\eta v}{r^2} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{2}{3} \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \left( v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{4} \sigma (E_r B_\varphi^* + E_r^* B_\varphi) + \\ &+ 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r\eta \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \\ &- \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{2}{3} \eta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \\ \rho C_p \left( v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{1}{2} \sigma (E_r E_r^* + E_z E_z^*) - \\ &- \varphi_e + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\epsilon_k} \frac{\partial r B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\epsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} B &= 0. \end{aligned}$$

Компоненты напряженности электрического поля определяются из уравнений Максвелла:

$$E_r = \frac{i}{\omega \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_k} \frac{\partial B}{\partial z}, \quad E_z = -\frac{i}{\omega \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_k} \frac{1}{r} \frac{\partial r B}{\partial r}.$$

где  $\vec{V} (V_r = v, V_\varphi = 0, V_z = u)$  – скорость;  $T$  – температура;  $p$  – давление;  $\omega = 2\pi f$  – частота;  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $C_p$ ,  $\eta$ ,  $\varphi_e$  – плотность, теплопроводность, теплоемкость, вязкость, излучательная способность;  $\epsilon_k = \epsilon - i\sigma/\omega_0\epsilon$ ;  $\epsilon = 1 - \sigma/\epsilon_0 v_e$  – диэлектрическая проницаемость;  $\sigma = e^2 n_e v_e / m_e (\omega^2 + v_e^2)$  – электропроводность;  $v_e$ ,  $n_e$ ,  $e$ ,  $m_e$  – эффективная частота столкновений, концентрация, заряд и масса электронов;  $c$  – скорость света;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $i$  – мнимая единица; верхний индекс \*

обозначает комплексно сопряженную величину.

Граничные условия ставятся по всему контуру расчетной области (см. рис.1–2): для скорости – условия прилипания на твердых поверхностях и заданных значений во входном сечении; давление в выходном сечении – атмосферное; для температуры – условия сопряжения с заданной температурой внешнего контура, за исключением выходной границы, где задается условие теплового равновесия. Для индукции магнитного поля – условия идеально проводящих электродов (равенство нулю тангенциальной к стенке составляющей напряженности электрического поля), условия излучения в кольцевом сечении подвода ТЕМ-волны и в выходном сечении. Граничные условия запишутся в виде:

$$\begin{aligned} z = z_{\min}, R_i < r < R_e : \\ \frac{\partial B}{\partial z} - ikB &= -2ikB_1 \frac{R_{i2}}{r} \exp(-ikz); \\ z = z_{\max}, 0 < r < R_e : \quad \frac{\partial B}{\partial z} + ikB &= 0. \end{aligned}$$

Полагается, что размеры коаксиала  $R_i$ ,  $R_e$  (радиусы внутреннего и внешнего электродов соответственно) для данной частоты поля "обеспечивают" распространение только ТЕМ-волны

$$B = B_1 \frac{R_i}{r} \exp(-ikz) + B_R \frac{R_i}{r} \exp(+ikz):$$

падающей с амплитудой  $B_1 = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega P_1}{\pi k c^2 R_i^2 \ln(R_e / R_i)}}$

и мощностью  $P_1$ , и отраженной с амплитудой  $B_R = -\frac{\partial B / \partial z + ikB}{\partial B / \partial z - ikB} \Big|_{R_i < r < R_e}$  и мощностью

$$P_R = \frac{B_R B_R^*}{B_1 B_1^*} P_1; \quad k = \omega / c.$$

Условие на выходной границе соответствует прошедшей волне, распространяющейся вдоль плазменного факела в положительном направлении оси  $z$  с продольным волновым числом  $k$ .

Интегральный баланс электромагнитной энергии контролировался в расчетах условием:  $P_1 = P_R + P_T + P_d$ ,

где мощность "прошедшей" волны и диссипируемая мощность определяются выражениями:

$$P_T = \frac{\pi}{\mu_0} \int_0^{R_e} E_r B^* r dr ;$$

$$P_d = 2\pi \int_0^{R_e} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \frac{1}{2} \sigma (E_r E_r^* + E_z E_z^*) r dr dz .$$

Для численного решения система уравнений дискретизируется методом контрольного объема на прямоугольной неравномерной сетке. Для компонент скорости используются смещенные сетки, а поле давления определяется методом коррекции SIMPLER [5]. На каждом шаге итерационной процедуры дискретные аналоги относительно поправок для зависимых переменных решаются методом исключения Гаусса. В качестве критерия окончания счета используются условия ограничения (не больше  $10^{-5}$ ) на евклидовы нормы векторов невязок дискретных аналогов для зависимых переменных по всем контрольным объемам.

**Результаты.** Проведены расчеты характеристик СВЧ-разряда ( $f = 2,45$  ГГц) в азоте, термодинамические и переносные свойства плазмы которого при атмосферном давлении заимствованы из [6]. Концентрация электронов берется из расчета равновесного состава, а зависимость частоты соударений электронов от температуры восстанавливается по значениям коэффициента электропроводности  $\sigma_0$  при  $\omega = 0$ :  $\nu_e = e^2 n_e / m_e \sigma_0$ .

Рассмотрены различные конфигурации плазмотрона, отличающиеся геометрией электродов коаксиальной линии. Внутри полого внутреннего электрода в отличие от [4] соосно располагается транспортирующая диэлектрическая трубка. В начальном сечении предусмотрена подача газа между коаксиальными проводниками с расходом  $G_1$ ; между внутренним электродом и диэлектрической трубкой с расходом  $G_2$ ; через транспортирующую трубку с расходом  $G_3$ .

На рис. 1–2 приведены результаты расчета для двух конфигураций плазмотрона, иллюстрирующих возможности осуществления генерации плазмы в стационарном режиме и про-

ведения оптимизации конструкции с целью, например, увеличения коэффициента диссипации энергии электромагнитного поля. Видно, что разряд возбуждается вблизи среза внутреннего электрода вследствие сильной концентрации в этой области величины электрического поля (рис. 1–2). Вытекающий из внутреннего электрода плазмообразующий газ приводит к формированию плазменного факела, "продавленного" на оси и отделенного от среза сопла "холодным" промежутком, термоизолирующим внутренний электрод. Вниз по потоку, за счет теплопроводности и конвективного теплообмена, поле изотерм расширяется, а затем сужается по мере уменьшения источников тепловыделения (снижение диссипации энергии электромагнитного поля) и охлаждения стенками внешнего электрода коаксиальной линии.

Газодинамическая структура потока способствует пространственной стабилизации разряда. Основное количество транспортируемого между внутренним электродом и диэлектрической трубкой холодного газа (расход  $G_2$ ) обтекает высокотемпературную область и стабилизирует пространственное положение зоны диссипации энергии электромагнитного поля даже при нулевом расходе  $G_1$  (рис. 2), наличие которого в традиционной схеме СВЧ-плазмотрона коаксиального типа имеет принципиальное значение для устойчивости пространственной локализации плазменного факела [3]. Поэтому транспортируемый между проводниками коаксиальной линии газ играет только "термоизолирующую" роль по отношению к внешнему электроду. Газ, подаваемый через диэлектрическую трубку, способствует формированию "тепловой воронки" из-за конвективного охлаждения приосевой зоны, и по мере нагрева, расширяясь, втекает в высокотемпературную область. Такой характер течения транспортируемого через диэлектрическую трубку газа может быть использован в различных технологических приложениях. На торцевой поверхности среза внутреннего электрода давление понижено и осуществляется подсос натекающего (рис. 1) или окружающего газа с образованием системы тороидальных вихрей (рис. 2).

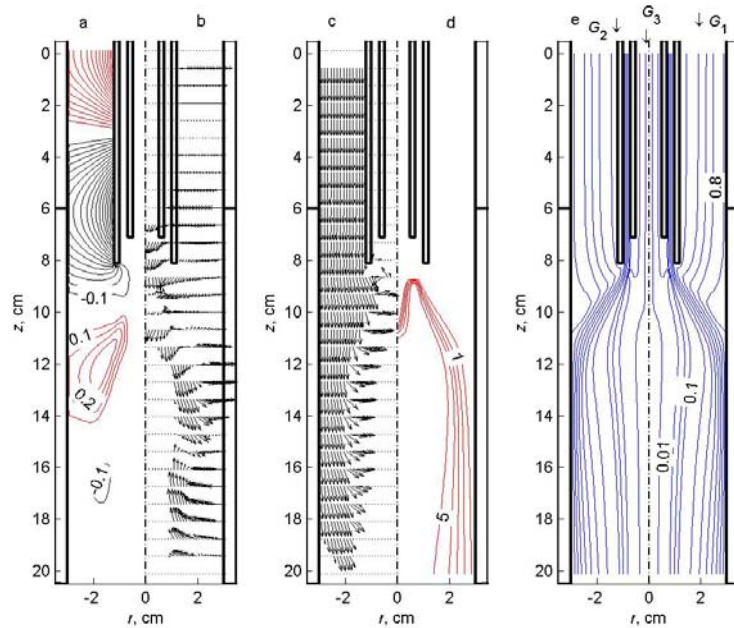


Рис. 1. Рассчитанные характеристики СВЧ-плазматрона: изолинии индукции магнитного поля (а); поля направлений напряженности электрического поля (б); вектора Пойнтинга (с); изотермы (d) и линии тока газа (е) при  $P_1 = 5,00$  кВт ( $P_R = 1,73$  кВт;  $P_T = 0,05$  кВт;  $P_d = 3,22$  кВт);  $G_1 = 20$  л/мин;  $G_2 = 20$  л/мин;  $G_3 = 3$  л/мин.

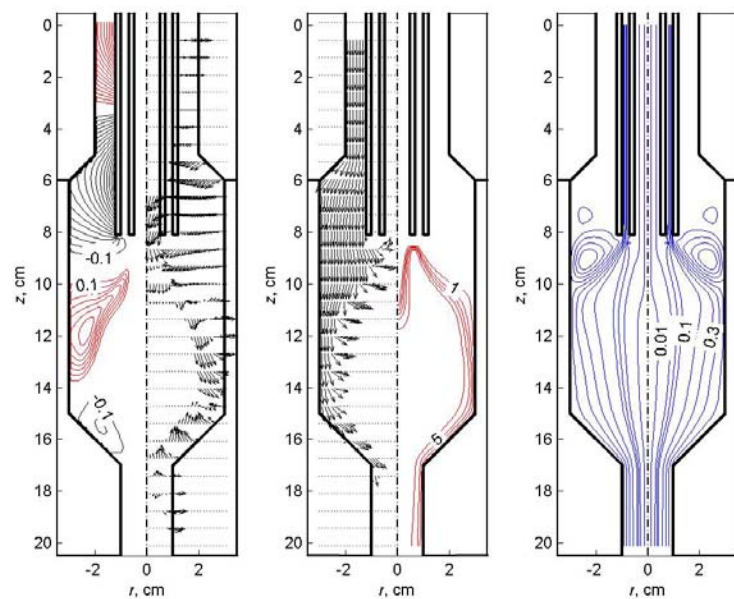


Рис. 2. Рассчитанные характеристики СВЧ-плазматрона: изолинии индукции магнитного поля (а); поля направлений напряженности электрического поля (б); вектора Пойнтинга (с); изотермы (d) и линии тока газа (е) при  $P_1 = 5,00$  кВт ( $P_R = 0,08$  кВт;  $P_T = 0,00$  кВт;  $P_d = 4,92$  кВт);  $G_1 = 0$  л/мин;  $G_2 = 20$  л/мин;  $G_3 = 3$  л/мин.

Как следует из результатов расчетов (рис. 1–2), СВЧ-плазмотрон коаксиального типа допускает изменение геометрии внешнего электрода и позволяет увеличить коэффициент диссипации энергии электромагнитного поля  $P_d/P_1$  от 0.64 (рис. 1) до 0.98 (рис. 2). Отметим (конструкция рис. 2), что определяющим фактором для осуществления непрерывной генерации плазмы становится длина выступающей (после расширения внешнего электрода) части внутреннего электрода. Как и в [4], необходимо, чтобы длина внутреннего электрода была равна нечетному числу четвертей длины волны, так чтобы его торец находился в максимуме электрического поля стоячей волны, образующейся без плазмы при отражении бегущей ТЕМ волны от зоны круглого запредельного волновода.

**Выводы.** На основе численного анализа МГД уравнений показана возможность осуществления стационарной генерации плазмы в СВЧ-плазмотроне коаксиального типа с укороченным внутренним электродом, выполненным в виде полый трубки для подачи плазмообразующего газа.

### Литература

1. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Edited by С.М. Ferreira and М. Moisan., Plenum Press. – New York, 1993. NATO ASI Series, Series B: Physics. – V. 302.
2. СВЧ-генераторы плазмы. Физика, техника, применение / В.М. Батенин, И.И. Климовский, Г.В. Лысов, В.Н. Троицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
3. ВЧ- и СВЧ-плазмтроны / С.В. Дресвин, А.А. Бобров, В.М. Лелевкин и др. // Низкотемпературная плазма. – Т. 6. – Новосибирск: Наука СО, 1992. – 319 с.
4. *Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Malykh N.I., Misakyan M.A., Temchin S.M., Bark Y.B.* Plasma coaxial discharge as a new type of the microwave surface wave discharge. – Moscow: GPI RAS. – Preprint 1. – 1999. – 24 P.
5. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Теория столба электрической дуги / В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков и др. // Низкотемпературная плазма. – Т. 1. – Новосибирск: Наука СО, 1990. – 376 с.