

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ СЛАБОТОЧНОГО ПЛАЗМОТРОНА

Г.А. Арзунов<sup>1,3</sup>, В.О. Нехорошее<sup>2,3</sup>

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. Ю.Д. Королёв<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>3</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: gaa3@tpu.ru

### Введение

Нестационарный слабоочный плазмотрон – один из примеров генератора низкотемпературных плазменных струй атмосферного давления. Анализ электрического поля рассматриваемого плазмотрона проведен с помощью компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics. В результате моделирования оценен вклад электрического поля в процессы формирования и поддержания плазмы в струе. Полученные результаты будут использованы в дальнейшем, для изучения плазменных струй атмосферного давления, с учетом потока газа и теплового поля.

### Компьютерная модель

Программный пакет COMSOL Multiphysics позволяет рассчитывать электрические поля в одно, двух и трехмерном пространстве. В нашем случае геометрия плазмотрона является осесимметричной, поэтому моделирование проведено в декартовой системе координат относительно продольной оси плазмотрона. Геометрия задачи соответствует действительным размерам плазмотрона, подробно описанного в работах [1– 3]. Пространство между электродами, по условию задачи, имеет электрические свойства воздуха атмосферного давления, т.е.  $\varepsilon_r=1$ . Граничными условиями являются потенциалы электродов: внешний электрод (анод) заземлён, потенциал катода  $V_c = -1$  кВ, что соответствует среднему значению напряжения горения разряда. Расчетная область совместно с введенной системой координат представлена на рис. 1. Распределение потенциала описано в соответствии с уравнением Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

где  $\varphi$  – электрический потенциал,  $\rho$  – плотность распределения заряда,  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость среды, а  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

### Анализ результатов моделирования

Из полученного пространственного распределения потенциала  $\varphi$  (рис.1) построена графическая зависимость напряженности электрического поля ( $\frac{d\varphi}{dy}$ ) от расстояния до катода – координаты  $y$ . На графиках, представленных на рисунках 3 и 4, координата  $x = 0$  (показана на рисунке 1), а  $y$  соответствует представленной на рисунке 1.

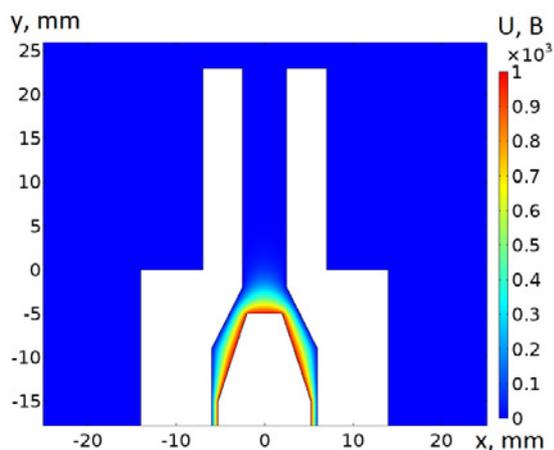


Рис. 1. Распределение потенциала

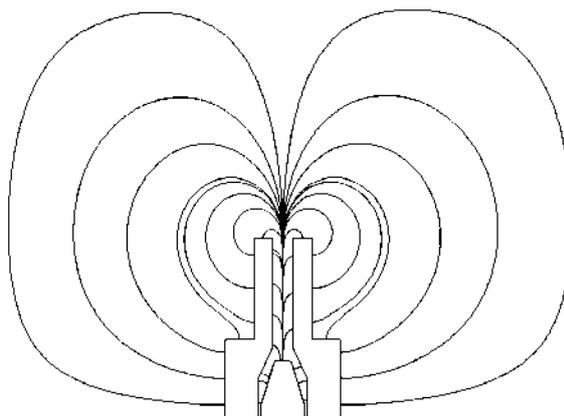


Рис. 2. Линии напряженности электрического поля

Линии напряженности электрического поля (рис. 2) показывают траекторию, по которой движутся заряженные частицы плазмы, а величина напряженности характеризует силу, с которой поле действует на заряженные частицы. Безусловно, стоит учитывать и влияние направленного потока газа, который играет существенную роль в движении заряженных частиц. Под его воздействием частицы в плазменной струе движутся со скоростью  $\sim 10$  м/с и выносятся через сопло. На данном этапе исследования будет представлена

составляющая только электрического поля. Данные графика, представленного на рис. 3 свидетельствуют о том, что напряженность электрического поля вблизи катода составляет единицы кВ/см, что оказывает существенное влияние на перенос заряженных частиц в этой области. На удалении от катода более чем на 10 мм ( $y > 5$  мм), напряженность поля в струе составляет единицы – десятки В/см, что в меньшей степени, но всё же оказывает влияние на перенос заряженных частиц в плазменной струе. В соответствии с данными, представленными на рисунке 4, напряженность поля на расстоянии более 15мм от катода ( $y > 10$  мм) составляет менее 1 В/см. Поле такой величины практически не играет роли в движении заряженных частиц плазмы и, тем более, в ионизационных процессах.

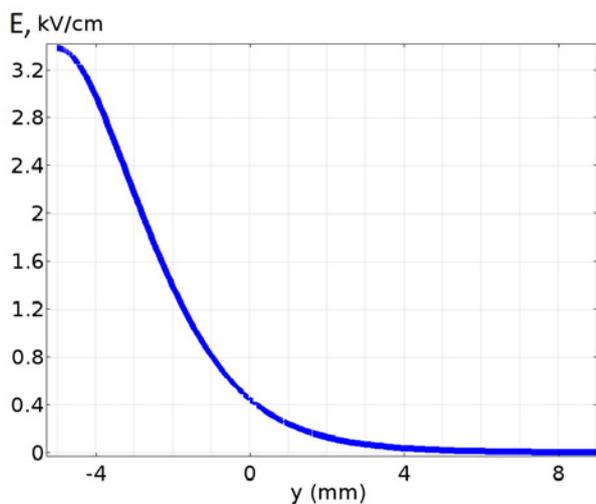


Рис. 3. Зависимость напряженности поля (E) от координаты y

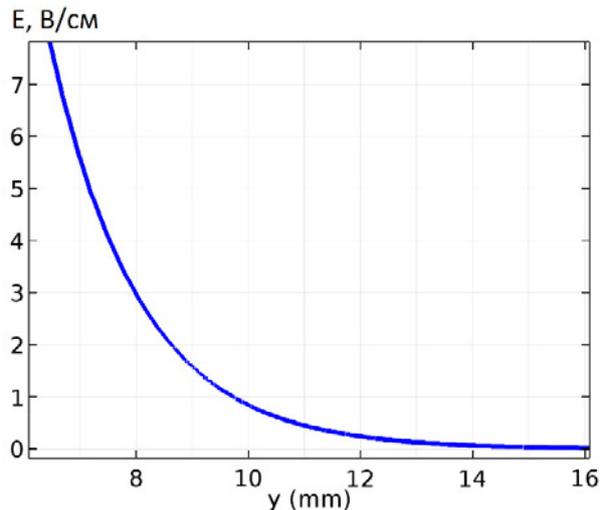


Рис. 4. Зависимость напряженности поля (E) от координаты y в области малых значений E

### Заключение

Представленная модель имеет определённые упрощения, например – не учитывается объёмный заряд в области плазменной струи, который искажает электрическое поле. Однако, полученные данные, всё же, позволяют оценивать влияние электрического поля на процессы переноса заряженных частиц. Анализ данных, полученных в ходе компьютерного моделирования, позволил выявить характерные области вблизи электродов плазматрона. Было установлено, что металлическое сопло плазматрона оказывает значительное влияние на снижение напряженности электрического поля по его длине. Установлены области, в которых электрическое поле практически не участвует в переносе заряженных частиц. В дальнейшем планируется дополнить данную модель движением потока газа и распределением теплового поля, что позволит более точно описать движение заряженных и нейтральных частиц в плазменной струе.

### Список литературы

1. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V. et al. Nonsteady-state gas-discharge processes in plasmatron for combustion sustaining and hydrocarbon decomposition // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009. – Vol. 37, No. 4. – P. 586–592.
2. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V. et al. Low-current plasmatron as a source of nitrogen oxide molecules // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – Vol. 40, No. 11. – P. 2837–2842.
3. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V. et al. Plasma-assisted combustion system based on nonsteady-state gas-discharge plasma // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2009. – Vol. 37, No. 12. – P. 2314–2320.