

УДК 669.187.58

**А. В. ИСАКОВ, В. П. КОЛЕСНИК, А. М. ОХРИМОВСКИЙ,  
Н. П. СТЕПАНУШКИН, А. А. ТАРАН***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В АНОМАЛЬНОМ ТЛЕЮЩЕМ  
РАЗРЯДЕ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ**

*Проведено измерение распределений потенциала плазмы, температуры и концентрации электронов в технологическом генераторе плазмы зондовым методом. Основные параметры плазмы определены также с помощью жидкостной модели. Получено количественное и качественное соответствие расчетных данных с экспериментальными в пределах погрешности зондового метода измерений. Проведено сравнение экспериментально измеренного распределения плотности тока по длине катода-мишени с расчетным. Показана возможность использования жидкостной модели для проведения количественного и качественного определения профиля зоны эрозии катода-мишени.*

**Ключевые слова:** жидкостная модель, аномальный тлеющий разряд, зондовый метод, локальные параметры плазмы, технологический генератор плазмы.

**Введение**

Газовые разряды в скрещенных электрических и магнитных полях широко используются в технологии получения тонких пленок. Нанесение защитных покрытий на детали машин и устройств аэрокосмической техники позволяет увеличить их ресурс. Для нанесения покрытий в вакууме без магнитного поля используются такие системы как диодная и триодная. Однако эти системы не позволяют получать покрытия с высокой скоростью осаждения. Более высокие плотности плазмы в разрядном промежутке и, соответственно, более высокие плотности тока на катоды-мишени позволяют получать методы с использованием скрещенных электрических и магнитных полей.

При использовании разрядов в скрещенных электрическом и магнитном полях с большим количеством электродов сложно учесть все особенности движения заряженных частиц в этих полях. Поэтому необходима разработка таких численных моделей, которые бы в течение приемлемого времени расчета позволяли определить все основные параметры исследуемого процесса.

В работе [1] предложена жидкостная модель, которая позволяет определять распределения потенциала плазмы, концентрации и температуры электронов в разрядном промежутке, а также определять распределение плотности ионного тока по длине катода-мишени технологического генератора плазмы.

**Постановка задачи исследования**

Методы диагностики плазмы можно разделить на контактные и бесконтактные. Бесконтактные ме-

тоды позволяют определять осредненные параметры плазмы во всем объеме разряда. Контактные методы диагностики параметров плазмы позволяют определять параметры плазмы в конкретном месте разрядного промежутка. Наиболее эффективным методом диагностики локальных параметров плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях является зондовый метод диагностики [2, 3].

Определение плотности тока по длине катода-мишени возможно двумя способами: с использованием ленгмюровского зонда и с использованием катода-мишени с расположенными на нем плоскими зондами. Наиболее эффективным способом является использование катода-мишени с расположенными на нем плоскими зондами. Это связано не только со сложностью измерений ленгмюровским зондом вблизи катода-мишени, но и с расположением ленгмюровского зонда относительно магнитного поля (диффузия электронов вдоль силовых линий магнитного поля ниже, чем поперек силовых линий).

**Определение локальных характеристик  
плазмы в разрядном промежутке  
и распределения плотности тока  
по длине катода мишени**

Для измерения потенциала плазмы, концентрации и температуры электронов использовались стандартные зонды Ленгмюра [4–6]. К зонду предъявляются жесткие требования: с одной стороны, он не должен вносить возмущения в плазму, с другой стороны – не должен разрушаться под действием плазмы.

Одним из основных ограничений зондового метода при использовании стандартной методики

обработки данных являются высокие значения приложенного магнитного поля [2]. Поэтому радиус зонда выбирают из следующих условий: ларморовский радиус электрона должен быть больше радиуса зонда, а дебаевский радиус экранирования электрона - меньше радиуса зонда.

Зонд – керамическая трубка из керамики 22ХС диаметром 5 и длиной от 50 до 300 мм, во внутреннее отверстие которой, диаметром 3 мм, устанавливалась проволока из сплава ВР5 диаметром 1 мм, которая выступала на 10 мм. Вольфрамиевая проволока центрировалась в керамической трубке с помощью установочных втулок из керамики 22ХС.

На зонд от источника питания ТВ-3 подавалось постоянное напряжение относительно заземленной вакуумной камеры. Потенциал зонда и ток в его цепи регистрировались датчиком напряжения, выполненном на основе датчика 91SS12-2, и датчиком тока CSLA1CD. Показания датчиков записывались на жесткий диск персонального компьютера при помощи программируемого логического контроллера К201.

Величины концентраций заряженных частиц определялись по ионной части вольт-амперной характеристики (ВАХ) одиночного зонда, так как ионная компонента плазмы более инертная и соответственно менее подвержена влиянию магнитного поля, чем электронная компонента плазмы (см. рис. 1). В нашем случае плазма в разрядном промежутке квазинейтральна, что видно из незначительного изменения потенциала плазмы в разрядном промежутке, рассмотренного далее.

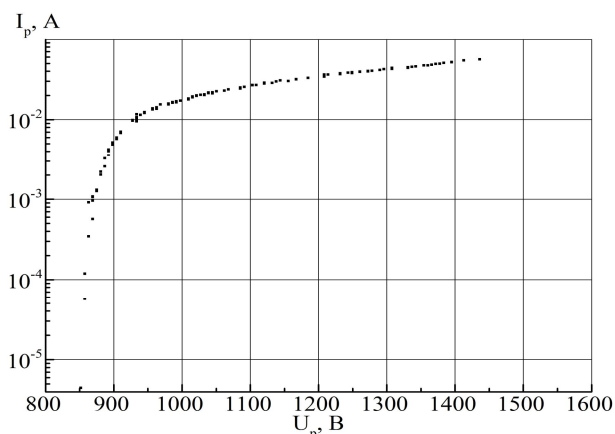


Рис. 1. ВАХ одиночного цилиндрического зонда для технологического генератора с радиальными потоками плазмы

На рисунке 1 представлена ВАХ одиночного зонда, на которой виден достаточно протяжённый прямолинейный участок. Наличие прямолинейного участка на ВАХ свидетельствует о максвелловском распределении электронов по энергиям [7].

В качестве электрода (1) для измерения плот-

ности тока использовался катод-мишень, изготовленный из титанового сплава ВТ1-0 (см. рис. 2). На поверхности электрода (1) располагались дисковые зонды (2) диаметром 7 мм из того же сплава титана, толщиной 0,5 мм, которые были изолированы от электрода (1). Дисковые зонды (2) и электрод (1) находились под одним потенциалом  $\varphi = 0$ .

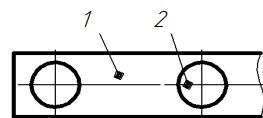


Рис. 2. Схема электрода для измерения плотности тока: 1 – плоский электрод, 2 – дисковый зонд

## Результаты исследований

Измерения по определению параметров плазмы в технологическом генераторе проводились при давлении технологического газа аргона  $p = 0,2$  Па. Напряжение разряда между анодом и катодом  $U_d = 900$  В. Величина магнитной индукции на плоскости симметрии  $B = 0,02 \dots 0,15$  Тл.

Измерения были проведены в четырех плоскостях: на плоскости симметрии ( $h = 0$ ) (см. рис. 3 а, б) и на расстояниях  $z = 0,25 h$  (см. рис. 3 в, г),  $z = 0,5 h$  (см. рис. 3 д, е),  $z = 0,75 h$  (см. рис. 4), где  $2h$  – высота разрядного промежутка. Плоскость симметрии – срединная плоскость технологического генератора плазмы.

Для определения расчетных распределений параметров плазмы в разрядном промежутке и плотности тока по длине катода-мишени, использовалась жидкостная модель со следующими начальными условиями: температура технологического газа  $T = 300$  К; подвижность электронов при отсутствии магнитного поля  $\mu_{DC} = 8,1 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>/(В·с) [8]. Функция распределения электронов по энергиям – максвелловская. Для расчетов принято, что начальная концентрация электронов и ионов  $n_e = n_i = 10^{11}$  м<sup>-3</sup>, начальная энергия электронов  $w = 2$  эВ и начальная молярная концентрация возбужденных атомов аргона  $c_{Ar^*} = 10^{-6}$  моль<sup>-1</sup>.

В работе [1] приведены уравнения, описывающие граничные условия для плотности потока электронов, плотности потока энергии электронов и плотности потока тяжелых частиц (нейтральный атом аргона, возбужденный атом аргона, ион аргона).

В таблице 1 представлены граничные условия на электродах (аноде, катоде-мишени, торцевом электроде), оси симметрии и плоскости симметрии. В таблице использовался следующий перечень условных сокращений:  $U$  – напряжение на торцевом электроде,  $I$  – ток на торцевом электроде,  $C$  – внешняя емкость,  $R$  – внешнее активное сопротивление,  $\mathbf{n}$  – орт внешней нормали,  $\mathbf{D}$  – электрическое

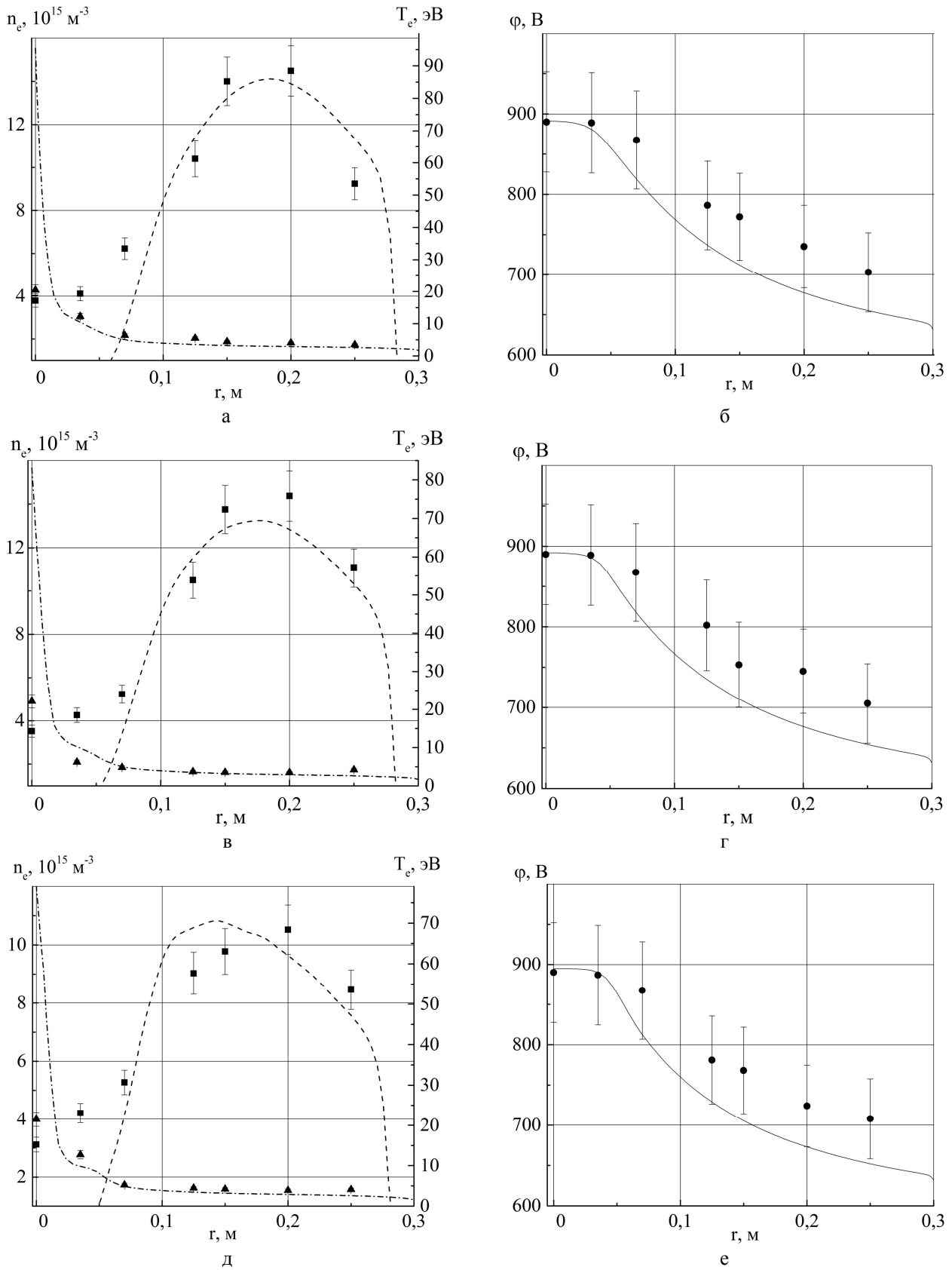


Рис. 3. Распределения концентрации и температуры электронов (а, в, д), потенциала плазмы (б, г, е) на расстояниях  $z = 0; 0,25 \text{ h}; 0,5 \text{ h}$ , соответственно (■ – экспериментальная и --- расчетная концентрация электронов, ▲ – экспериментальная и - · - · - расчетная температура электронов, ● – экспериментальные и — — расчетные значения потенциала плазмы), в зависимости от расстояния между осью симметрии и катодами-мишенями

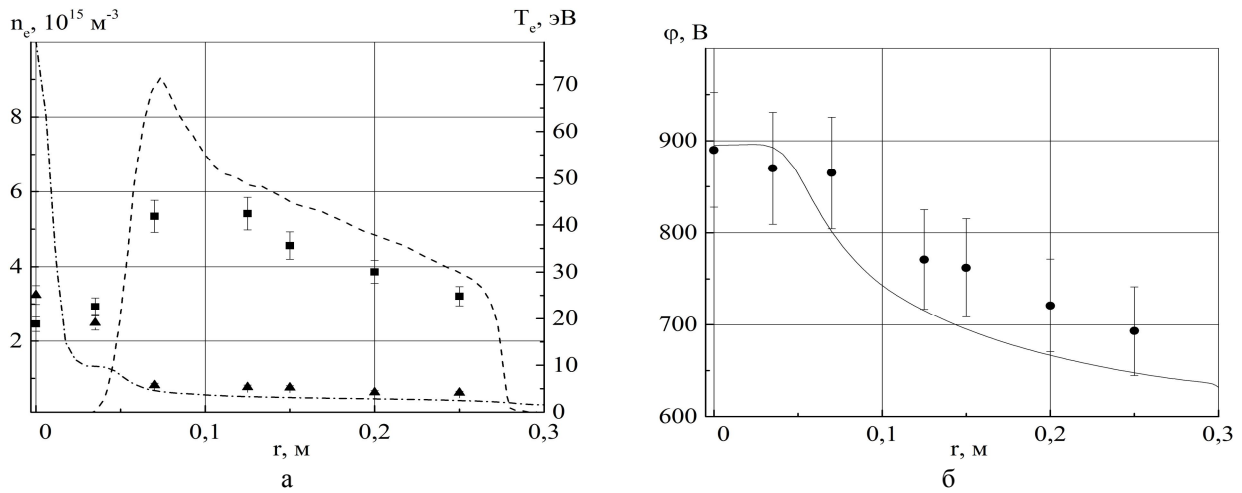


Рис. 4. Распределения концентрации и температуры электронов (а), потенциала плазмы (б) на расстоянии  $z = 0,75 h$ , соответственно (■ – экспериментальная и --- расчетная концентрация электронов, ▲ – экспериментальная и - · - · - расчетная температура электронов, ● – экспериментальное и — — расчетные значения потенциала плазмы), в зависимости от расстояния между осью симметрии и катодами-мишенями

Таблица 1

Граничные условия жидкостной модели

|                                     | Анод   | Катод-мишень                                | Торцевой электрод   | Ось симметрии                                | Плоскость симметрии                      |
|-------------------------------------|--|---|---|--|--|
| Электрическое поле                  | $\varphi = 900 \text{ В}$  | $\varphi = 0 \text{ В}$                     | $\frac{dU}{dt} + \frac{1}{C} \left( I - \frac{U_d - U}{R} \right) = 0;$ | $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial r} = 0$ | $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0$        |
| Плотность потока электронов         | $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = \left( \frac{1}{2} v_e n_e + n_e (\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n} \right) - \sum_p \gamma_p (\mathbf{\Gamma}_p \cdot \mathbf{n})$                         |   |   | $\frac{\partial n_e}{\partial r} = 0$        | $\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = 0$ |
|                                     | $\gamma_p = 0$   | $\gamma_p = 0.17$                           | $\gamma_p = 0.15$   |  |  |
| Плотность потока энергии электронов | $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_w = \left( \frac{5}{6} v_e n_e T_e + \frac{5}{3} n_e T_e (\boldsymbol{\mu}_e \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{n} \right) - \sum_p \gamma_p w_p (\mathbf{\Gamma}_p \cdot \mathbf{n})$ |   |   | $\frac{\partial (n_e T_e)}{\partial r} = 0$  | $\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_w = 0$ |
|                                     | $\gamma_p = 0;$<br>$w_p = 0 \text{ эВ}$  | $\gamma_p = 0,015;$<br>$w_p = 1 \text{ эВ}$ | $\gamma_p = 0,017;$<br>$w_p = 0,9 \text{ эВ}$                           |  |  |
| Плотность потока тяжелых частиц     | $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_k = M_k S_{sk} + M_k c_k \mu_k z_k (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})$  |   |   | $\frac{\partial n_k}{\partial r} = 0$        | $\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_k = 0$ |

смещение,  $\mathbf{\Gamma}_e$  – плотность потока электронов,  $v_e$  – тепловая скорость электронов,  $\boldsymbol{\mu}_e$  – тензор подвижности электронов,  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля,  $\gamma_p$  – коэффициент вторичной электронной эмиссии,  $\mathbf{\Gamma}_p$  – плотность потока положительных ионов на стенку,  $r$  – расстояние от оси симметрии до катодов-мишеней,  $\mathbf{\Gamma}_w$  – плотность потока энергии электронов,  $T_e$  – температура электронов,  $w_p$  – энергия вторичных электронов,  $\mathbf{j}_k$  – диффузионный поток частиц типа  $k$ ,  $M_k$  – молярная масса частиц типа  $k$ ,  $S_{sk}$  – скорость взаимодействия частицы типа  $k$  с поверхностью,  $c_k$  – молярная концентрация  $k$ -ой частицы,  $\mu_k$  – усредненная подвижность частицы типа  $k$ ,  $z_k = 1$  – для однозарядного иона,  $z_k = 0$  – для нейтральных и метастабильных атомов,  $n_k$  – концентрация частиц типа  $k$ .

Из рисунков 3 и 4 видно, что при  $z = 0; 0,25 h$ ,

0,5 h характер изменения величины концентрации электронов не меняется, а при  $z = 0,75 h$  максимум перемещается ближе к оси симметрии. Это вызвано влиянием анода и торцевого электрода на характер распределения концентрации электронов.

Незначительное отличие экспериментальных и расчетных данных вблизи оси симметрии объясняется неполным выполнением критериев сходимости за данное время расчета. Уменьшить эту расходимость представляется возможным путем уменьшения размеров элементов сетки расчетной области. Как следствие, за счет этого увеличится время расчета, но это неоправданно, так как значения параметров плазмы в остальных точках останутся практически без изменения.

Небольшая расходимость расчетных данных с экспериментальными данными в разрядном проме-

жутке связана с погрешностью зондового метода. На рисунках 3 и 4 приведены абсолютные погрешности измерений, которые составляют не более 10 % от измеряемой величины. Отметим, что по литературным данным погрешность зондового метода не превышает 40 % [9]. Высокая погрешность зондового метода связана с рядом причин: радиус собирающей поверхности зонда больше суммы самого радиуса зонда и радиуса Дебая, это связано с проникновением электрических полей зонда в плазму; заряженные частицы приобретают дополнительную энергию в электрическом поле зонда, которая при обработке данных не учитывается [4-6].

При получении расчетных значений параметров плазмы, представленных на рис. 3 и 4, был сделан ряд предположений. Так как расстояние между катодами-мишенями много больше темного катодного пространства, то влияние катодов-мишеней на распределение потенциала плазмы и температуры электронов можно не учитывать. Поэтому при численном определении этих параметров плазмы использовались следующие допущения: катод находится под потенциалом порядка  $\phi = 600$  В. Концентрация электронов определялась при условии, что катод находится под нулевым потенциалом.

Достоверность приведенных допущений можно оценить на основании сравнения экспериментальных данных с расчетными данными, полученными в цилиндрическом магнетроне (см. [1]) и в технологическом генераторе плазмы (см. рис. 3 и 4). Из сравнения полученных результатов можно сделать вывод, что математическая модель позволит качественно и количественно определить основную зону ионизации, распределения потенциала плазмы и температуры электронов в разрядном промежутке. Таким образом, предложенная математическая модель позволяет проводить оптимизацию конфигураций технологических генераторов плазмы.

В большей части разрядного промежутка кривые распределений основных параметров плазмы совпадают (см. рис. 3 и 4), поэтому разработанная жидкостная модель позволяет с достаточно высокой точностью и за относительно небольшое расчетное время определять основные параметры плазмы в технологических генераторах с радиальными потоками плазмы.

На рисунке 5 представлено распределение расчетной плотности тока, полученной с помощью жидкостной модели, и экспериментального распределения плотности тока. Для экспериментального определения значений плотности тока по длине катода-мишени была проведена серия измерений в нескольких точках по длине катода-мишени.

Для определения ширины доверительного интервала взята доверительная надежность 0,9. Из ри-

сунка 5 видно, что кривая в большей части находится в доверительном интервале.

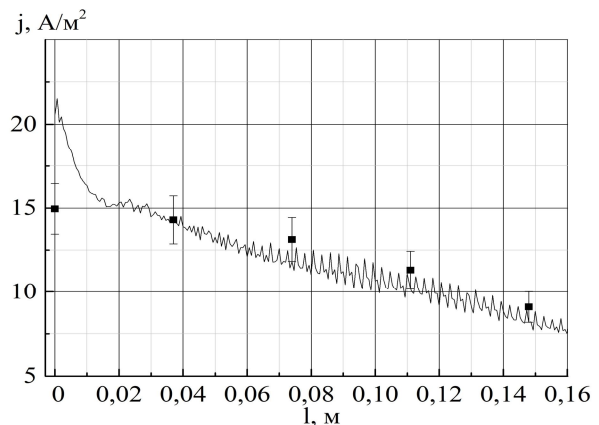


Рис. 5. Распределения экспериментальной и расчетной плотности тока по длине катода-мишени (■ — экспериментальная плотность тока, — — расчетная плотность тока)

Из полученных распределений плотности тока можно сделать вывод, что разработанная математическая модель позволяет определять плотность тока по длине катода с точностью до 10 %. Таким образом, предложенная математическая модель позволяет не только определять распределение плотности тока по длине катода, но и в дальнейшей работе проводить количественное и качественное определение профиля зоны эрозии катода-мишени.

Незначительное отличие экспериментальных и расчетных данных вблизи плоскости симметрии объясняется неполным выполнением критериев сходимости за данное время расчета. Уменьшить эту расходимость возможно путем уменьшения размеров элементов сетки расчетной области. Как следствие, за счет этого увеличится время расчета, но это неоправданно, так как значения плотности тока в остальных точках останутся практически без изменения.

Для более качественного описания темного катодного пространства вблизи катода на выбранных временах расчета необходимо использовать сетку с мелким размером элементов, что приводит к наблюдаемой пилообразности на рисунке 5.

## Выводы

В работе проведено сравнение экспериментальных данных, полученных зондовым методом, и расчетных, полученных с помощью жидкостной модели. Результаты демонстрируют хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными, полученными для разных конфигураций технологических генераторов плазмы.

Установлено, что предложенная модель обеспечивает прогнозирование профиля зоны эрозии катода-мишени с погрешностью, не превышаю-

щей 10 %. Это дает возможность применения жидкостной модели для оптимизации конструкции технологических генераторов плазмы с точки зрения повышения эффективности использования материала катодов-мишеней.

### Литература

1 Numerical simulation of abnormal glow discharge processes in crossed electric and magnetic fields [Text] / A. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy et al. // Int. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and the Adjoint Workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas": book of abstracts, Kharkiv, 15–18 sept. 2014. – Kharkiv, 2014. – P. 133.

2 Козлов, О. В. Электрический зонд в плазме [Текст] / О. В. Козлов. – М. : Атомиздат, 1969. – 291 с.

3 Чен, Ф. Электрические зонды. В кн. : Диагностика плазмы [Текст] / Ф. Чен ; под. ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. – М. : Мир. – 1967.

– С. 94–164.

4 Kudrna, P. Langmuir Probe Diagnostics of Low Temperature Non-Isotermal Plasma in a Weak Magnetic Field [Text] / P. Kudrna, E. Passoth // J. of Contrib. Plasma Phys. – 1997. – V. 37, № 5. – P. 417–429.

5 Орлов, К. Е. Диагностика низкотемпературной плазмы [Текст] : учеб. пособие / К. Е. Орлов. – СПб : Изд-во политехн. ун-та, 2005. – 111 с.

6 Laframboise, J. G. Theory of spherical and cylindrical Langmuir probes in a collisionless, maxwellian plasma at rest [Text] / J. G. Laframboise. – Toronto : UTLAS, 1967. – 205 p.

7 Лёб, Л. Основные процессы электрических разрядов в газах [Текст] / Л. Лёб. – М. – Л. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. – 672 с.

8 Райзер, Ю. П. Физика газового разряда [Текст] / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.

9 Обухов, В. А. Источники тяжелых ионов. В кн. : Плазменные ускорители и ионные инжекторы / В. А. Обухов, В. Г. Григорьян, Л. А. Латышев. – М. : Наука, 1984. – С. 169–185.

Поступила в редакцию 8.11.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. научного отдела каф. физики А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ В АНОМАЛЬНОМУ ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ В СХРЕЩЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНОМУ І МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

**О. В. Ісаков, В. П. Колесник, А. М. Охрімівський, М. П. Степанушкін, А. О. Таран**

Проведено вимірювання розподілів потенціалу плазми, температури і концентрації електронів в технологічному генераторі плазми зондовим методом. Основні параметри плазми визначено також за допомогою рідинної моделі. Отримано кількісну і якісну відповідність розрахункових даних з експериментальними в межах похибки зондового методу вимірювань. Проведено порівняння експериментально вимірюваного розподілу густини струму за довжиною катода-мішені з розрахунковим. Показано можливість використання рідинної моделі для проведення кількісного та якісного визначення профілю зони ерозії катода-мішені.

**Ключові слова:** рідинна модель, аномальний тліючий розряд, зондовий метод, локальні параметри плазми, технологічний генератор плазми.

### DETERMINATION OF THE PLASMA PARAMETERS WITHIN THE ABNORMAL GLOW DISCHARGE IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

**O. V. Isakov, V. P. Kolesnik, A. M. Okhrimovskyy, N. P. Stepanushkin, A. A. Taran**

The plasma potential, electron temperature and density distributions in the technological plasma generator was measured using the probe method. The main parameters of plasma were determined using the fluid model. Qualitative and quantitative correspondence was obtained between the calculated and experimental data within the error of the probe measurement method. A comparison of the experimental and calculated results of current density distribution along the cathode-target was conducted. The possibility of using fluid model for quantitative and qualitative determination the profile of the erosion zone of the cathode target. The possibility of the liquid model application is shown for the quantitative and qualitative determination of the cathode erosion profile.

**Key words:** fluid model, abnormal glow discharge, probe method, local plasma parameters, technological plasma generator.

**Ісаков Алексей Владимирович** – аспирант каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lewka@3g.ua.

**Колесник Владимир Петрович** – канд. техн. наук, начальник НИЧ, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Охримовский Андрей Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Степанушкин Николай Петрович** – старший научный сотрудник научного отдела каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Таран Анатолий Алексеевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.