

03:04

## **Аналитические соотношения между параметрами плазмы канала высоковольтного разряда в жидкости и плазмы струйного выброса в вакуумированную камеру**

© В.А. Поздеев

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

*Поступило в Редакцию 31 декабря 1996 г.*

В работе получены аналитические соотношения между параметрами плазмы высоковольтного электрического разряда в жидкости и параметрами плазмы струйного выброса в вакуумированную камеру. Эти соотношения позволяют по измеренным в эксперименте температуре плазмы факела и его геометрическим характеристикам определить расчетным путем температуру и давление плазмы в приосевой зоне канала разряда.

Одним из фундаментальных вопросов физики плазмы высоковольтного электрического разряда в жидкости является задача выявления распределения параметров плазмы по радиусу канала. Можно считать, что нагрев поверхностного слоя плазмы канала экспериментально достаточно изучен и результаты, полученные различными исследователями, хорошо согласуются между собой. Экспериментальная оценка температуры внутренней области канала разряда впервые и оригинальным методом получена в работе [1], а результаты эксперимента обсуждались в работе [2]. Суть этого экспериментального метода заключается в измерении температуры плазменной струи, испускаемой через отверстие в плоском электроде, которое располагается по оси канала. В результате эксперимента было установлено, что температура факела превышает температуру поверхности канала. Однако в работах [1,2] не было сделано никаких оценок относительно различия температуры плазмы канала и температуры плазмы факела. В [3] автором была рассмотрена математическая модель предложенного в [1] метода диагностики температуры плазмы во внутренней области канала разряда.

Следуя [3], для получения аналитических соотношений между параметрами плазмы канала и параметрами струйного выброса принимаем следующие допущения. Плазму считаем идеальным газом как с точки зрения газодинамики, так и с позиций термодинамики. Параметры плазмы канала (давление  $p_1$ , плотность  $\rho_1$ , температуру  $T_1$ ) и параметры плазмы факела (давление  $p_2$ , плотность  $\rho_2$ , температуру  $T_2$ ) во время замеров считаем постоянными или медленно меняющимися величинами. Принятые допущения позволяют воспользоваться следующими известными термодинамическими соотношениями [4]

$$p_i = \rho_i R T_i, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$p_2/p_1 = (\rho_2/\rho_1)^\gamma, \quad (2)$$

где  $R$  — газовая постоянная,  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты плазмы. Рассматривая процесс истечения плазмы через отверстие в вакуумированную камеру как стационарный, воспользуемся соотношением, известным в газодинамике [4]

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{\rho_1}{p_1} u^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (3)$$

где  $u$  — осевая скорость истечения плазмы из отверстия со стороны камеры.

Полагая известными из эксперимента температуру плазмы факела  $T_2$  и скорость истечения плазмы через отверстие  $u$ , на основании выражений (1)–(3) получаем искомые соотношения связи параметров плазмы канала и плазмы факела

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{u^2}{RT_2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}; \quad (4)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{u^2}{RT_2}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Температура плазмы факела, как показано в [1,2], может быть измерена непосредственно в эксперименте. Скорость истечения плазмы найдем следующим образом из равенства расхода плазмы через отверстие изменению массы плазмы в объеме факела в рамках допущения о постоянстве плотности

$$u \simeq \frac{1}{f} \frac{dV}{dt}, \quad (6)$$

где  $f$  — площадь отверстия ( $f = \pi y_0^2$ ),  $y_0$  — радиус отверстия,  $V$  — объем плазменного факела. Рассматривая факел как тело вращения с образующей  $y(x)$ , объем факела найдем в виде интеграла

$$V = 2\pi \int_0^l y^2(x) dx, \quad (7)$$

где  $l$  — текущая длина факела,  $x$  — осевая координата.

В качестве конкретного представления для функции  $y(x)$  принимаем зависимость вида

$$y(x) = a \left(1 - \frac{x}{l}\right)^{1/2} - b \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad (8)$$

где  $a, b$  — постоянные, определяемые из условий:

$$y|_{x=0} = y_0; \quad \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = y'_0. \quad (9)$$

Используя условия (9) из (8), находим

$$a = 2y'_0 l + 2y_0; \quad b = 2y'_0 l + y_0. \quad (10)$$

Подставляя представление для образующей (8) в выражение (7), с учетом (10), получаем

$$V = \frac{22}{15} \left(1 + \frac{8}{11}\beta + \frac{2}{11}\beta^2\right) l, \quad (11)$$

где  $\beta = y'_0 l / y_0$ . Теперь в соответствии с формулой (6), используя (11), получаем следующее выражение для скорости истечения плазмы

$$u = 1.46(1 + 1.46\beta + 0.546\beta^2) \frac{dl}{dt}. \quad (12)$$

В случае сильно вытянутого факела ( $\beta \rightarrow D$ ) из выражения (12) получаем оценку для скорости истечения вида

$$u \simeq 1.46 \cdot \frac{dl}{dt}. \quad (13)$$

В случае критического характера истечения плазмы скорость истечения становится равной скорости звука [4]

$$u = c = \left( \frac{2\gamma}{\gamma + 1} RT_2 \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Тогда соотношения для параметров плазмы канала и плазмы факела (4) упрощаются и принимают вид

$$\frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right). \quad (15)$$

Так, при  $\gamma = 1.25$  на основании соотношений (15) получаем следующие количественные значения:  $T_2/T_1 = 0.89$ ,  $p_2/p_1 = 0.56$ .

Таким образом, предложенная математическая модель истечения плазмы через отверстие в вакуумированную камеру позволяет определить давление и температуру плазмы в приосевой области канала разряда по измеренной температуре факела и его геометрическим характеристикам в общем случае и только по измеренной температуре в случае критического истечения. Приведенные аналитические соотношения просты и удобны для практики.

Полученный в данной работе результат усиливает различие температур плазмы в приосевой области канала и плазмы в поверхностном слое, значения которых приведены в работах [1,2].

## Список литературы

- [1] Пасечник Л.Л., Старчик П.Л., Федорович О.А., Попов Л.Ю. Электрический разряд и его применение в промышленности. Киев: Наук. думка, 1980. С. 12–13.
- [2] Адамян В.М., Гулый Г.А., Пушек Н.Л., Старчик П.Д., Ткаченко И.М., Швец И.С. // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18. № 2. С. 230–238.
- [3] Поздеев В.А. Теоретические основы гидродинамики в экспериментальной диагностики давления плазмы канала высоковольтного электрического разряда в жидкости. Николаев, 1996. 57 с. (Учебное пособие. НАН Украины, ИИПТ).
- [4] Гинзбург И.П. Аэрогазодинамика. М.: Изд. Высшая школа. 1966. 404 с.