**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ**

**ТЕМПЕРАТУРЫ ПО РАДИУСУ ПЛАЗМЫ**

Тухватуллин Р.С., Закиров И.М., Залялиева Ф.Ф.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполев-КАИ, Россия, г.Казань, ул. К.Маркса, д.10, yafidka-kai@mail.ru*

При спектроскопическом определении распределения температуры в электродуговой и ВЧ-плазме иногда получаются значительные расхождения результатов. Это связано, в частности, с тем, что наиболее широко распространенные спектроскопические методы дают надежные результаты только тогда, когда свойства плазмы постоянны во времени. Если же плазма нестационарна, то в зависимости от степени нестационарности и характера усреднения исследуемой величины по времени она будет определена с той или иной погрешностью.

Целью данной работы является экспериментальное исследование пульсаций в осесимметричной низкотемпературной плазме и измерение температуры с учетом этих пульсаций.

Для исследований использовался плазмотрон с секционированной межэлектродной вставкой и вихревой газовой стабилизацией дуги. Диаметр дуговой камеры составлял *d* = 1 см, а длина межэлектродной вставки *a* = 10 cм. Плазмотрон состоял из катодного и анодного узлов, секций межэлектродной вставки, кольца закрутки газа, изолирующих и уплотняющих прокладок, необходимых для сборки плазмотрона фланцев, болтов и гаек. Анод плазмотрона и секции межэлектродной вставки были изготовлены из меди. Катодом служил гафниевый стержень, впрессованный в медный катододержатель. Секции вставки, изолированные друг от друга прокладками из фторопласта, охлаждались водой. Одна из секций является оптической. Она имеет прямоугольную щель высотой 1 см и шириной 0.1 см. Щель закрывается оптическим стеклом К8. Эта секция позволяет вести наблюдение столба дуги в определенном сечении канала. Меняя положение секции, можно изучать различные участки дуги. Дуга горела между охлаждаемыми водой катодом и цилиндрическим анодом. Воздух в дуговую камеру подавался тангенциально в начальном сечении через отверстия кольца закрутки. Для обеспечения ламинарности течения газа внутренняя поверхность канала плазмотрона полировалась.

Для исследования колебаний дуги использовалась высокоскоростная камера NAC Memrecam GX8. Излучение дуги выбранного сечения резко проектировалось в объектив камеры. Характеристики камеры позволяют снимать с минимальным временем экспозиции 600 нс, при этом достигается высокая чувствительность > 20 000 ISO. В ходе эксперимента цифровое изображение положения дуги фиксировалось в памяти камеры и далее передавалось для обработки в персональный компьютер. С использованием специальных программных пакетов обработки изображений была получена регистрограмма колебаний дуги в канале плазмотрона.

Исследование колебаний дуги проводились в диапазонах изменения тока *J* = 100–250 А; расхода газа 0,2 – 8,0 г/c; расстояния от катода *z* = 1.8–8.7 см. Результаты исследований показали, что дуга совершает низкочастотные (~ 300 Гц) и высокочастотные (~104 Гц) колебания и в дуговой камере происходят сложные физические процессы. Исследование высокочастотных колебаний дуги проводились при токах *J* = 100, 150, 200 и 250 А, расходах газа G = 0.4–8 г/с, расстояниях от катода *z* = 1.8–8.7 см.

Изучение регистрограмм показало, что при малых расходах газа колебания носят случайный характер и подчиняются закону нормального распределения

. (1)

Обработка регистрограмм позволила определить среднеквадратичные отклонения оси дуги σ*x* в зависимости от тока, расхода газа и расстояния от катода. Результаты показали, что амплитуда колебаний возрастает с ростом *G*, *z* и уменьшением *I*. Значения σ*x*, полученные в данной работе, хорошо согласуются с результатами работы [1]. Таким образом, при малых расходах газа в ламинарном режиме течения колебания дуги можно описать законом нормального распределения (1). Причиной случайных колебаний являются турбулентные пульсации, взаимодействие дуги с собственным магнитным полем и стенкой канала, вращение прианодного участка положительного столба и мелкомасштабное шунтирование разряда [2]. При расходах газа более 2 г/с картина колебаний носит уже другой характер (рис.1).

Из рис. 1 видно, что на случайные колебания накладываются гармонические. По регистрограммам построены функции распределения колебаний оси дуги. Результаты показали что ось дуги колеблется в области канала 0–2.5 мм и наиболее вероятное положение дуги находится не на оси канала, а на некотором расстоянии от нее и с ростом тока амплитуда колебаний увеличивается. На основании проведенных экспериментов можно предложить следующую модель осесимметричной плазменной дуги: при малых расходах газа (до 2 г/с) ось дуги совершает случайные колебания, подчиняющиеся закону Гаусса. При расходах газа свыше 2 г/с дуга начинает вращаться как единое целое (рис. 2). Ось дуги O*’* в плоскости *z* = const движется по окружности радиуса *а,* центр О которой подвержен случайным колебаниям, описываемым формулой (1). На этом рисунке сплошная окружность представляет истинный размер плазмы, большая пунктирная окружность – наблюдаемый размер плазмы, а малая пунктирная окружность радиуса *а* – траектория вращения плазмы радиуса *R*. ХОY – лабораторная система координат, Х*’*О*’*Y*’* – система координат, связанная с плазмой.

 Y

X

O

O’

X*’*

Y*’*

*a*

*R*

**Рис. 1. Схема пульсаций дуговой плазмы. ХОY – лабораторная система координат, Х*’*О*’*Y*’* – система координат, связанная с плазмой. *R* – радиус плазмы, *а* – радиус вращения дуги**

Функция распределения гармонических колебаний представляется в виде:

, *а ≤ х ≤ а*, φ2 = 0, *а* < | х |. (2)

Соответственно функция распределения с учетом гармонических и случайных колебаний точки О*’* будет равна:

. (3)

Чтобы определить температуру плазмы с учетом ее пространственных колебаний, надо получить осредненное по времени распределение интенсивности излучения по высоте для спектральной линии *Iv*(*x*). Зная функцию распределения ϕ(*x*), истинное распределение *qv*(*x*) можно определить путем решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода

 (4)

где *R* – радиус плазмы. В данном случае функция распределения ϕ1 (*x*–*x*') описывается распределением (1). Уравнение (4) решено методом регуляризации Филипса–Тоуми. Программа была составлена на языке С++. Результаты для токов *J* =100 и 250 A, расхода газа *G* = 6 г/с, *z* =5.2 см представлены на рис. 2.

**Рис.2. Распределение интенсивности *Iv*(*x*) и *qv*(*x*) при *z* =5.2 см, *G* = 6 г/с, при *J* =100 (1;3) и 250 A (2;4)**

Распределения *Iv*(*x*) определялись спектрометрическим способом по линии NI 493.5 нм, а *qv*(*x*) найдены по формуле (4) с использованием опытных данных для *Iv*(*x*) и функции распределения (3). Видно, что колебания приводят к занижению интенсивности на оси дуги и к ее завышению на периферии. С ростом тока профиль линии становится более наполненным.

По измеренным значениям *Iv*(*x*) и *qv*(*x*) были найдены радиальные излучательные способности и температуры. Результаты представлены на рис. 3, из которого видно, что колебания электрической дуги влияют на характер распределения температуры по радиусу. Пренебрежение колебаниями дуги приводит к занижению температуры в приосевой зоне и ее завышению на периферии, а также к искажению профиля температуры.

**Рис.3. Распределение температуры по радиусу дуги при *z* =5.2 см, *G* = 6 г/с, *J* =100 (1;2) и 250 A (3;4)**

**ЛИТЕРАТУРА**

1.Закиров И.М., Залялиева Ф.Ф., Тимеркаева Д.Б., Тухватуллин Р.С. Экспериментальное исследование пространственных перемещений электродуговой плазмы. *ТВТ*. **Т. 49. № 3.** С. 338. 2011.

2. Даутов Г.Ю. *Устойчивость электрической дуги в плазмотронах постоянного тока. Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме*. Сб. М.: Наука. С.185-208. 1974.