

Л.И. Барташевская, А.С. Зайцев

## ПОТЕНЦИАЛ ПЛАЗМЫ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Розглянуто стрибок потенціалу та пояснена його природа в плазмі вуглеводневого полум'я низького тиску.

Рассмотрен скачок потенциала и объяснена его природа в плазме углеводородного пламени низкого давления.

The reason of jump of potential of plasma of flame in a reactionary zone is explained.

**Состояние вопроса.** Изучение электрических свойств углеводородного пламени на основе экспериментального определения функции распределения электронов по энергиям позволяет глубже проникнуть в сущность элементарных процессов, полнее познать механизм ионизации и возбуждения в плазме пламени.

В теории и практике зондовых измерений чрезвычайно важное значение имеет потенциал плазмы.

Все методы нахождения  $\Phi_{nl}$  основаны на явлении исчезновения призондового слоя, когда потенциал зонда становится равным потенциалу плазмы.

В последнее время появился интерес к радиочастотным зондам, применение которых позволяет сравнительно просто найти потенциал плазмы.

Иногда для определения потенциала плазмы применяют термозонды, которые обычно представляют собой проволочную петлю, накаливаемую от внешнего источника тока.

Наиболее распространенными методами определения потенциала плазмы являются методы, в которых потенциал плазмы  $\Phi_{nl}$  определяется из зависимостей

$$I = f(U), \quad \frac{dI}{dU} = f(U), \quad \frac{d^2I}{dU^2} = f(U).$$

При потенциале зонда, равном потенциалу плазмы, происходит изменение характера движения электронов: движение в задерживающем поле сменяется движением в ускоряющем. При этом на вольтамперной характеристике наблюдается излом. Место излома соответствует потенциалу плазмы  $\Phi_{nl}$ . Потенциал плазмы можно определить по излому кривой более точно, если построить зондовую характеристику в полулогарифмическом масштабе.

Излом характеристики не всегда выражен резко, поэтому для уточнения потенциала  $\Phi_{nl}$  используют значения производных тока зонда по напряжению.

Точка, где первая производная зондового тока  $\frac{dI}{dU}$  достигает максимума, будет соответствовать потенциалу плазмы. Во многих работах потенциал пространства определяется по второй производной зондового тока по напряжению.

Однако, среди авторов нет согласия в отношении вопроса, какая точка на кривой  $\frac{d^2I}{dU^2} = f(U)$  соответствует потенциалу плазмы.

Можно выделить четыре точки зрения –  $\Phi_{nl}$ :

- 1) соответствует максимуму второй производной;
- 2) соответствует нулю второй производной;
- 3) соответствует минимуму второй производной;

- 4) лежит в интервале  $\left(\frac{d^2I}{dU^2}\right)_{\max}$  и  $\left(\frac{d^2I}{dU^2}\right)_{\min}$ .

Если рассматривать идеальную плазму и идеальный зонд, то потенциал плазмы будет соответствовать точке, где  $\frac{d^2I}{dU^2} = 0$ . В идеальных условиях точки, соответствующие нулю и минимуму второй производной, совпадут.

Анализ известных методов определения потенциала плазмы показал, что в условиях плазмы пламени наиболее приемлемым является метод, в котором потенциал плазмы определяется по экспериментальной зависимости второй производной зондового тока по напряжению  $\frac{d^2I}{dU^2} = f(U)$ .

При работе с платиновым зондом отмечается резкий скачок потенциала плазмы в нижней части реакционной зоны. В этой области градиент потенциала достигает 45 В/м. Однако считать, что внутри пламени существует собственное электрическое поле с довольно большой напряженностью, нет достаточных оснований. Для выяснения природы отмеченного скачка потенциала плазмы пламени были проведены опыты с применением зондов из платины и нержавеющей стали.

На рис. 1 даны кривые зависимости  $\Phi_{nl} = f(x)$ .

На кривой 1 приведены значения потенциалов, полученных при концентрации ацетилен в горючей смеси  $C = 30\%$  и давлении в барокамере  $P = 400$  Па. Концентрация топлива в горючей смеси для кривой 2 равнялась  $C = 32\%$ , давление  $P = 266$  Па.

Применялся платиновый зонд диаметром  $d = 50$  мкм и рабочей длиной  $l = 8$  мм. Кривая 3 относится к пламени с такой же концентрацией горючей смеси, как и кривая 1, но давление, при котором осуществлялось горение, в данном случае составляло  $P = 266$  Па.

Для построения кривой 4 использованы значения  $\varphi_{пл.}$ , полученные с зондом из нержавеющей стали. Диаметр зонда  $d = 100$  мкм, рабочая длина  $l = 6$  мм. Концентрация топлива в горючей смеси равнялась  $C = 32\%$ .

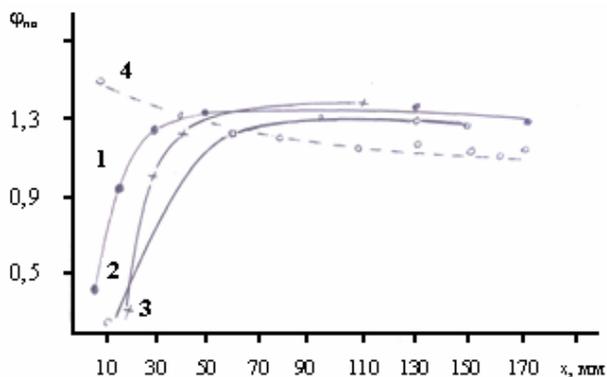


Рис. 1. Потенциал плазмы ацетилено-кислородного пламени

На всех кривых, полученных с платиновым зондом, наблюдается скачок потенциала в нижней части реакционной зоны. В то же время на кривой 4 резкого возрастания потенциала не отмечается, а наоборот, потенциал слегка уменьшается с увеличением высоты.

Обнаруженный скачок потенциала плазмы при работе с платиновым зондом можно объяснить изменением работы выхода поверхности платинового зонда. Платина, как отмечено в работе [1], легко адсорбирует водород с образованием на поверхности пленки водорода. При этом работа выхода для платины с пленкой водорода, адсорбированного на пленке, снижается на 1,15 В по сравнению с работой выхода для чистого металла.

Из рис. 1 видно, что в опытах с платиновым зондом изменение потенциала составляет около 1 В. Визуальные наблюдения за платиновым зондом, находящимся в плазме, также подтверждают высказанный взгляд на природу скачка потенциала. В нижней части реакционной зоны, начиная с высоты  $x = 30$  мм, зонд раскаляется, а потенциал плазмы резко возрастает и затем почти не меняется. Измерения с помощью пирометра дали температуру поверхности зонда  $T_{зонда} = (1200 \div 1500)$  К.

При такой высокой температуре пленка водорода на поверхности зонда разрушается, вследствие чего резко изменяется работа выхода.

В отличие от платинового зонда на поверхности зонда из нержавеющей стали адсорбирование не происходит, и на кривой зависимости  $\varphi_{пл} = f(x)$  не наблюдается резкого скачка потенциала в нижней части реакционной зоны пламени.

Таким образом, наблюдаемое изменение потенциала плазмы ацетилено-кислородного пламени можно объяснить образованием пленки на поверхно-

сти платины и её разрушением при нагревании зонда до температуры  $T = (1200-1500)$  К.

Потенциал, который принимает изолированный зонд, помещенный в плазму, называется плавающим потенциалом, а иногда – стеночным потенциалом.

Так как скорость электронов значительно больше скорости положительных ионов, плавающий потенциал всегда будет отрицательным относительно потенциала плазмы.

Если зонд находится при плавающем потенциале  $\varphi_f$ , то плотность тока насыщения положительных ионов  $j_i$  будет равна плотности тока электронов  $j_e$

$$j_i = j_e; \tag{1}$$

$$j_i = \frac{1}{2} n \left( \frac{kTe}{M} \right)^{\frac{1}{2}}; \tag{2}$$

$$j_e = \frac{1}{2} n \left( \frac{2kTe}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-e\varphi_f/kTe}. \tag{3}$$

Из равенств (1), (2), (3) вытекает, что

$$\varphi_f = \frac{1}{2} \frac{kTe}{e} \ln \left( \frac{3680}{\pi} A \right), \tag{4}$$

где  $A$  – молекулярная масса положительного иона.

Если молекулярную массу положительного иона принять  $A = 20$ , а температуру электронов  $T_e = 1660$  К, то

$$\varphi_f = 0,67 \text{ В.}$$

В ацетилено-кислородном пламени, горящем при давлении  $P = 250$  Па, с концентрацией топлива в горючей смеси  $C = 32\%$  из вольтамперной характеристики на высоте  $x = 60$  мм получено  $\varphi_1 = 0,61$  В, на высоте  $x = 100$  мм получено  $\varphi_2 = 0,64$  В.

Сопоставление опытных данных о плавающем потенциале и рассчитанных по формуле (4) говорит об удовлетворительном согласии.

Это может служить дополнительным подтверждением того, что выбор способа нахождения потенциала плазмы по точке, в которой вторая производная зондового тока по напряжению равна нулю, является правильным.

### Список литературы

1. Царёв Б.М. Контактная разность потенциалов. – М.: ГИТТЛ, 1949.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.В. Соболевим 09.09.09