

УДК 537.52

**ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ В. Ч. ФАКЕЛЬНОГО
РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ
ОТ 400 ДО 760 мм рт. ст.**

В. Я. ФЕДЯНИН, В. В. ТИХОМИРОВ, А. И. КУЗЬМИНЫХ, М. М. ПУГОВКИН

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Предложена простая формула, связывающая полный ток и мощность, выделяющуюся в единице длины в. ч. факельного разряда, со средними параметрами, характеризующими состояние газоразрядной плазмы. Измерены величины полного тока, термической мощности и газовой температуры в. ч. факельного разряда в воздухе в диапазоне давлений от 400 до 760 мм рт. ст.

По экспериментальным результатам оценена эффективная температура электронов.

Иллюстраций 1, таблиц 1, библиографий 8.

Предложена простая формула, связывающая полный ток и мощность, выделяющуюся в единице длины в. ч. факельного разряда со средними параметрами, характеризующими состояние газоразрядной плазмы. Измерены величины полного тока, термической мощности и газовой температуры в. ч. факельного разряда в воздухе в диапазоне давлений от 400 до 760 мм рт. ст. По экспериментальным результатам оценена эффективная температура электронов.

1. Высокочастотный факельный разряд в газах представляет собой плазменное образование с ярко выделенным каналом и оболочкой. При этом длина разряда много больше его поперечных размеров.

Высокочастотные плазмотроны факельного типа благодаря некоторым своим свойствам (стерильная чистота плазмы, не загрязненной продуктами эрозии электродов, легкость создания металлических конструкций, практически не ограниченное время работы) находят все более широкое применение в плазмохимической технологии [1—3] в качестве источника света в эмиссионном спектральном анализе для теплофизических испытаний некоторых материалов.

В настоящей работе делается попытка, используя уравнение баланса энергии электронов и молекул, связать параметры, характеризующие состояние газоразрядной плазмы с макроскопическими параметрами разряда: мощностью, выделяющейся в единице длины, и полным током.

2. Запишем уравнение баланса энергии электронного газа и нейтральных молекул для стационарного случая:

$$\frac{dW_{eE}}{dt} - \frac{dW_{em}}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dW_{em}}{dt} + \vec{\nabla}_x \vec{\nabla} T_m = 0. \quad (2)$$

Здесь $\frac{dW_{eF}}{dt}$, $\frac{dW_{em}}{dt}$ — средние скорости передачи энергии от в. ч. электромагнитного поля электронам и от электронов к молекулам, κ — коэффициент теплопроводности. Причем

$$\begin{aligned} \frac{dW_{em}}{dt} &= \left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{кол}} + \left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{вр}} + \left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{упр}} + \left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{днсс}} \equiv \\ &\equiv \frac{3}{2} \kappa n_e \nu_{em} \delta (T_e - T_r), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{кол}}$, $\left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{вр}}$, $\left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{упр}}$, $\left(\frac{dW_{em}}{dt}\right)_{\text{днсс}}$ — средние скорости передачи энергии от электронного газа к колебательным вращательным уровням, на поступательную степень свободы и диссоциацию молекул; n_e — плотность электронного газа; ν_{em} — эффективная частота соударений электрона с молекулами; δ — средняя относительная доля энергии, передаваемая электроном молекуле при соударении; T_e , T_r — температура электронов и тяжелых частиц соответственно. Подставляя (3) в (1) и (2) и усредняя все величины по объему, получим

$$\frac{3}{2} \kappa n_e \nu_{em} \delta (T_e - T_r) = P_e, \quad (4)$$

$$P_e \bar{n} a^2 = Q. \quad (5)$$

Здесь P_e — плотность источников тепла в разряде, Q — тепловой поток на единицу длины стенки плазматрона, a — радиус канала разряда. Комбинируя (4), (5) и используя закон Ома, получим

$$\frac{Q^2}{I^2} = \frac{1}{2} E_p^2 \frac{T_e (T_e - T_r)}{T_r^2}, \quad (6)$$

где $E_p = \sqrt{\frac{3\kappa T_r m \delta \nu_{em}^2 (T_r)}{e^2}}$ — характерное „плазменное поле“ [4],

I — действующее значение полного тока разряда.

3. Экспериментальные исследования проводились в в.ч. факельном разряде в воздухе. Разряд возбуждался в специально изготовленном кварцевом плазматроне — калориметре, подключенном в анодный контур в. ч. установки ЛД1-4. Давление менялось от 400 до 760 мм рт. ст. Полный ток разряда измерялся при помощи пояса Роговского, работающего в режиме трансформатора тока. Градуировка пояса Роговского и водяного калориметра проводилась по методу замещения.

Температура газа определялась спектроскопически — методом относительных интенсивностей [5]. Исследовалось распределение интенсивностей вращательных линий в Q — ветви полосы гидроксидов OH — с кантом 3064 Å (${}^2\Pi - {}^2\Sigma$). В работе [6] показано, что и вращательная температура гидроксидов в факельном разряде при давлениях, больших 100 мм рт. ст. совпадает с температурой газа.

Спектр фотогографировался на аэрофотопленку чувствительностью 1100 ед ГОСТа при помощи кварцевого спектрографа ИСП-28 (обратная дисперсия в области 3000 Å — 16 Å/мм). Исследования показали, что в области давлений от 400 до 760 мм рт. ст. температура газа от

давления не зависит и увеличивается слабо с повышением мощности, выделяемой в разряде. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Из экспериментально полученных значений Q , I , T_r по уравнению (6) определялась T_e . На рис. 1 представлена зависимость $\frac{T_e - T_r}{T_r}$ от давления при двух значениях $\frac{Q}{I}$.

При расчетах принималось, что сечение соударений электронов с молекулами не зависит от скорости электрона и равно для воздуха $4,4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$ [4], средняя относительная доля энергии, передаваемая электроном молекуле при одном столкновении, вычислялась по данным работы [7].

Из графиков на рис. 1 видно, что при увеличении давления $T_e \rightarrow T_r$ и неизотермичность плазмы в. ч. факельного разряда уменьшается. Абсолютные значения T_e при $T_r = 3500^\circ \text{ К}$ составляют, например, при $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$ 7000° К , что также соответствует литературным данным [8]. Таким образом, формула (6), на наш взгляд, с удовлетворительной точностью описывает связь между макроскопическими параметрами разряда и параметрами газообразной плазмы.

4. В заключение следует заметить, что при выводе формулы (6) было сделано два предложения:

1. Плазма канала неизотермична ($T_e > T_r$).

2. Механизм передачи в. ч. энергии в разряд описывается следующей схемой — энергия в. ч. электромагнитного поля передается в основном электронам; затем при упругих и неупругих соударениях передается молекулам и за счет механизма молекулярной теплопроводности выводится из зоны разряда (теплопроводностью электронного газа и переносом энергии излучением можно пренебречь).

Таким образом, уравнение (6) применимо не только к факельному разряду, но и разрядам других типов, для которых условия 1 и 2 выполняются (например, для тлеющих разрядов и дуг постоянного тока при средних давлениях).

Таблица 1

№ п. п.	P (мм рт. ст.)	Q вт/см	I (а)	T_r °К
1	400	71,03	1,14	3200
2	450	71,17	1,17	3250
3	500	71,72	1,19	3300
4	600	71,72	1,24	3400
5	760	71,72	1,24	3500

$\frac{T_e - T_r}{T_r}$

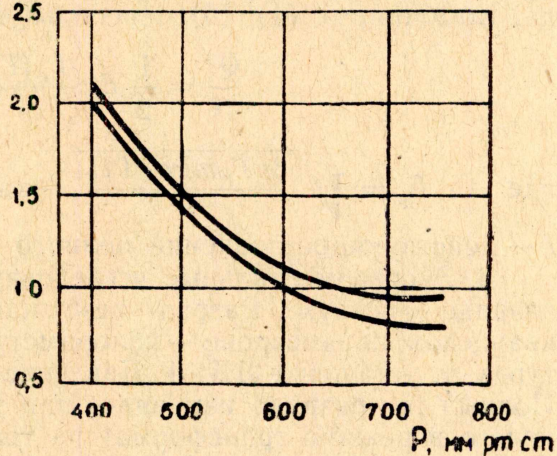


Рис. 1. Зависимость $\frac{T_e - T_r}{T_r}$ от давления

$$1 - \frac{Q}{I} = 62 \frac{\text{в}}{\text{см}}, \quad 2 - \frac{Q}{I} = 60 \frac{\text{в}}{\text{см}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тихомиров и др. В сб.: «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы». Алма-Ата, изд-во КазГУ, 1970.
 2. West C. D., Hume D. N. «Analyt. Chem.», 36, № 2, 412 (1964).
 3. В. К. Захаров. В сб.: «Вопросы общей и прикладной физики». Алма-Ата, изд-во КазГУ, 1969.
 4. В. Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., «Наука», 1967.
 5. Оптическая пирометрия плазмы. Сб. статей под ред. Н. И. Соболева. М., ИЛ., 1960.
 6. М. З. Хохлов. «Оптика и спектроскопия», 4, в. 4 (1958).
 7. Farsky V., Janca J. «Beitr. Plasmaphys». 8, № 2 (1968).
 8. Mollwo L. «Ann. Phys.», 7, v. 2 (1958).
-