

И.И.Гусев, Г.С.Кулешов, Л.П.Муркин,
В.И.Мартынов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ
ВИХРЕВОГО ПЛАЗМОТРОНА

П р и н я т ы е о б о з н а ч е н и я

q - удельный тепловой поток; λ - коэффициент теплопроводности; T - температура; r - текущий радиус; C_p - теплоемкость; ρ - плотность; U' - пульсация скорости; T' - пульсация температуры; σ - удельная электропроводность; E - напряженность электрического поля; S - функция теплопроводности; l - длина пути смешения; ω - угловая скорость; μ - масса киломоля; R - газовая постоянная; B_0 - константа; I - сила тока; r_1 - радиус плазмотрона; r_0 - радиус электрической дуги; M_1 - число Маха на периферии плазмотрона; T_1 - температура на периферии трубы; m - расход воздуха на плазмотрон; L - длина плазмотрона; p - давление; J_0 - функция Бесселя.

Можно полагать, что в установившейся области течения по всему поперечному сечению плазмотрона, исключая область пристеночного пограничного слоя, имеет место квазитвердое вращение плазмы, какое наблюдается в вихревой трубе [1, 2]. В дальнейшем с целью упрощений будем считать, что тангенциальная составляющая скорости значительно больше радиальной и осевой, градиент температуры направлен радиально, электрическая дуга, расположенная в окрестности оси трубы, имеет форму цилиндра, кинетическая энергия и энергия излучения малы по сравнению с Джоулевой теплотой [2].

Удельный тепловой поток с учетом молекулярной и молярной составляющих может быть представлен в виде

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} + C_p \rho U' T'.$$

Используя уравнение движения, состояния, выражения для пульсаций U' , T' [1], закон Ома и Джоуля-Ленца, уравнению энергии можно придать вид:

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(A^* r \frac{dS}{dr} - B \lambda r^2 \right) = 0, \quad (1)$$

где $B = \frac{\kappa-1}{\kappa} \frac{\mu \omega^2 A^*}{R}$ - константа; $A^* = \frac{c_p \rho \ell^2 \omega}{\lambda}$ - безразмерный комплекс, подлежащий экспериментальному определению.

В области проводимости dp/dr значительно меньше, чем в непроводящей [2]. Ввиду этого уравнение (1) можно записать так:

$$\sigma E^2 + \frac{A}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dS}{dr} \right) = 0, \quad (2)$$

где $dS = \lambda dT$.

После подстановки в (2) $x = \frac{ErB_0}{\sqrt{A}}$ и последующего решения уравнения, например, методом Меккера [3], получим выражения для радиального распределения функции теплопроводности, напряженности электрического поля, силы тока и радиуса электрической дуги:

$$S = S_1 + (S_0 - S_1) \mathcal{J}_0(x); \quad E = \frac{2,405}{r_0} \sqrt{A \frac{S_0 - S_1}{\sigma_0}};$$

$$I = 3,260 r_0 \sqrt{A \sigma_0 (S_0 - S_1)}; \quad r_0 = r, \exp \left[\frac{S_{ст} - S_1}{1,290 (S_0 - S_1)} \right],$$

где $A = A^* + 1$.

Для непроводящей области уравнение (1) сводится к виду

$$\frac{d}{dr} \left(A r \frac{dS}{dr} - B \lambda r^2 \right) = 0.$$

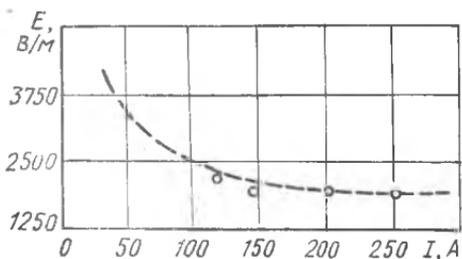
Оно позволяет найти радиальное распределение функции теплопроводности:

$$S = \left[S_1 - S_{ст} - \frac{\kappa-1}{2} M_1^2 T_1 \frac{A^*}{A} (\bar{r}_0^2 - 1) \frac{dS}{dT} \right] \left(\frac{\ln \bar{r}}{\ln \bar{r}_0} - 1 \right) +$$

$$+ S_1 + \frac{\kappa-1}{2} M_1^2 T_1 \frac{A^*}{A} (\bar{r}^2 - \bar{r}_0^2) \frac{dS}{dT},$$

где $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{r_1}$, $\bar{r} = \frac{r}{r_1}$.

В предельном случае, когда на оси плазматрона нет теплоисточника, использованные в данной работе системы уравнений позволяют получить радиальное распределение температуры, давления, плотности, являющиеся основой при расчете предельных характеристик вихревого эффекта.



Р и с. 1. Зависимость напряженности электрического поля от силы тока: $r_1 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $A = 4$; $m = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$; $\alpha = 6 \cdot 10^{-2} \text{ М}$; рабочее тело - воздух; о-о-о - экспериментальные точки; --- - расчетная кривая

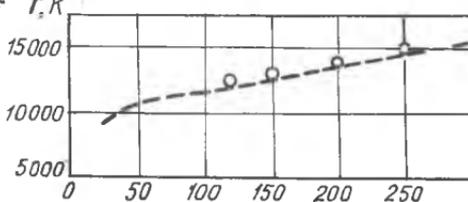
На рис. 1 и 2 приведены сравнения результатов расчета и эксперимента по электрической дуге. Имеется удовлетворительное совпадение.

Подводя итоги, отметим, что принятая к рассмотрению модель позволяет относительно просто произвести приближенную оценку параметров электрической дуги, а при соответствующих граничных условиях получить основные соотношения, качественно описывающие вихревой эффект.

Работа может быть использована в инженерных расчетах плазмотронов с вихревой стабилизацией дуги.

Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.
2. Жук ов М.Ф., Смоляков В.Я., Уркуков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). - М.: Наука, 1973.
3. Меккер Г. О характеристиках цилиндрической дуги. - В сб.: Движущаяся плазма. - М.: Ил, 1961.



Р и с. 2. Зависимость температуры от силы тока. См. обозначения на рис. 1