

УДК 621.793.7:533.924

Єршов А.В.<sup>1</sup>, Зеленина О.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. лаб. НУ «Запорізька політехніка»

### МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ

При визначенні променевого теплового потоку від плазмового струменя приймається модель абсолютно чорного тіла [1, 2]. Густина теплового потоку, що випромінює абсолютно чорне тіло, визначається формулою Стефана-Больцмана

$$q_c = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  і  $T$  – ступінь чорноти і температура поверхні, що випромінює;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана.

Однак для використання зазначеної моделі розрахунку ступінь чорноти плазми повинен бути наближений до одиниці. В іншому випадку плазма є оптично прозорою, і для розрахунку використовується модель об'ємного випромінювання. Густина об'ємного випромінювання плазми залежить від її температури і тиску. Як еквівалентну модель об'ємного випромінювання короткої циліндричної дуги можна уявити плазмову сферу, об'єм якої дорівнює об'єму короткої циліндричної дуги. При довжині плазмового струменя, що витікає з сопла плазмотрона 5 мм і радіусі струменя 1,5 мм, радіус сфери еквівалентного об'єму дорівнює 2 мм. Густина теплового потоку  $q_v$ , який створюється на границі оптично тонкої сфери плазми радіуса  $R$ , дорівнює густині об'ємного випромінювання, помноженої на відношення об'єму сфери до площі її поверхні

$$q_v = UR/3, \quad (2)$$

де  $U$  – густина об'ємного випромінювання плазми, що залежить від температури [3].

Наведена формула не враховує розподілу густини об'ємного випромінювання за радіусом. Якщо врахувати, що розподіл густини об'ємного випромінювання плазми за радіусом сфери нерівномірний, то густина теплового потоку випромінювання повинна бути менша, ніж дає формула (2). При уточненні (2) можна прийняти розподіл густини об'ємного випромінювання плазми за радіусом сфери у вигляді

$$U = U_0[1 - (r/R)^3], \quad (3)$$

де  $U_0$  – густина об'ємного випромінювання в центрі плазми,  $r$  і  $R$  – поточний радіус сфери і радіус границі зони плазми, що світиться.

Для визначення густини теплового потоку випромінювання слід визначити випромінювання об'єму сфери з урахуванням радіального розподілу густини об'ємного випромінювання (3) і поділити його на площу випромінювальної поверхні

$$q_v = \frac{R}{3} \int_0^1 U_0 [1 - (r/R)^3] d(r/R)^3 = U_0 R / 6. \quad (4)$$

Зіставлення формул (2) і (4) показує, що при обліку розподілу густини об'ємного випромінювання плазми за радіусом сфери у вигляді (4) густина теплового потоку на границі плазми зменшується в 2 рази.

Порівняння густини теплових потоків для плазми аргону в наближенні абсолютно чорного тіла і для моделі об'ємного випромінювання дано в таблиці 1 для інтервалу температур  $(8...20) \cdot 10^3$  К. Тут же наведені ступінь чорноти плазми і густина конвективного теплового потоку залежно від температури плазми. Приймалося, що плазма має радіус сфери 2 мм, що приблизно відповідає радіусу і формі короткого плазмового струменя, який витикає з плазмотрона на поверхню дроту, що нагрівається. На всьому інтервалі температур густина потоку об'ємного випромінювання значно менше густини випромінювання чорного тіла, що свідчить про те, що плазма оптично прозора.

Таблиця 1 – Розрахунки густини теплових потоків випромінювання чорного тіла  $q_{\text{ч}}$ , об'ємного випромінювання плазми аргону  $q_v$  і ступеня чорноти плазми  $\epsilon$

$T, \cdot 10^3$ К	12	14	16	18	20
$U, \text{Вт/м}^3$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$
$q_{\text{ч}}, \text{Вт/м}^2$	$1,2 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^9$	$5,4 \cdot 10^9$	$8,2 \cdot 10^9$
$q_v, \text{Вт/м}^2$	$4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^7$	$0,6 \cdot 10^8$	$0,7 \cdot 10^8$	$0,5 \cdot 10^8$
$\epsilon$	0,0035	0,012	0,016	0,012	0,006

Найбільший ступінь чорноти плазми, визначений відношенням густини потоку об'ємного випромінювання до густини випромінювання чорного тіла, становить 0,016 і спостерігається при температурі  $16 \cdot 10^3$  К. Таким чином, використання розрахунку випромінювання для плазми аргону в наближенні абсолютно чорного тіла призводить до помилки на два порядки величини.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нагрев и плавление проволоки – анода при плазменно-дуговом напылении / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик и др. // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 5–11.

2. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача / Б.Н. Юдаев. – Москва: Высшая школа, 1988. – 479 с.