

УДК 536.532

РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ ЗА ПОКАЗАМИ ТЕРМОПАР

© Фединець В.О., 2006

Національний університет "Львівська політехніка"

Розроблена методика і розрахункові формули для визначення температури газового потоку за показами термопар в залежності від параметрів потоку і геометричних розмірів спаю, чутливого елемента та камери гальмування перетворювачів температури

Температура чутливого елемента (спаю термопари), що фіксується вимірювальним приладом, завжди відрізняється від температури газового потоку при великих її значеннях (більше 1000 К). Ця відмінність обумовлена випромінюванням робочого спаю, кондуктивним тепловідводом по термоелектрододах і неповнотою гальмування потоку газу на робочому спаї.

Усунути вплив випромінювання спаю на покази термопари при холодних оточуючих стінках неможливо без застосування спеціальних методів, які значно ускладнюють методику вимірювань. Тому для звичайних термопар необхідно розрахувати поправку до їх показів із-за випромінювання спаю. За відсутності всіх необхідних вихідних даних цю поправку точно обчислити неможливо. А для зменшення абсолютної величини поправки застосовують екрановані термопари з просмоктуванням газу [1]. Оскільки відносна похибка обчислення поправки для екранованої термопари є більшою, ніж для термопари з відкритим спаєм, то в деяких випадках точність розрахунку температури газового потоку за показами екранованої термопари може бути гіршою, ніж для термопари з відкритим спаєм. Однак, навіть в цьому випадку застосування жаростійких екранів для термопар в високотемпературному газовому потоці оправдано тим, що зменшує температуру електроізоляційних матеріалів, які при високих температурах (1800 °С і вище) перестають бути ізоляторами, і збільшує міцність конструкції перетворювача температури.

Метод розрахунку температури газу за показами екранованої термопари при відсутності кондуктивного тепловідводу наведений в [2]. Для розрахунку необхідно знати температуру стінок камери гальмування, температур термоелектродів в місці їх встановлення в захисну арматуру та швидкість газового потоку в камері гальмування. Необхідно відмітити, що величина розрахункової поправки до показів термопар значно залежить від швидкості потоку в камері гальмування.

На основі аналізу публікації [2] та власних досліджень автор пропонує більш точну і більш детальну методику розрахунку температури газового потоку за геометричними розмірами спаю, термоелектродів і камери гальмування. Дана методика розрахунку може бути застосована для конкретної конструкції екранованого перетворювача температури.

На рис.1 схематично представлені дві конструкції перетворювачів температури з екранованими термопарами, які застосовувалися при вимірюваннях. Конструкції відрізняються між собою за виходом газового потоку із камери гальмування. В конструкції на рис. 1а газ виходить через два бокових отвори в стінках екрана в кінці камери гальмування. В іншій конструкції (рис. 1б) – через зазори між ізоляційною трубкою і стінкою екрана. Параметром в розрахунковій моделі для обох конструкцій служить відносна швидкість газу $\bar{V}_k = V_k/V_z$, де V_k - швидкість потоку в камері гальмування (швидкість, з якою омивається спай термопари); V_z - швидкість набігаючого потоку.

Розрахункова формула для перерахунку показів екранованої термопари T_{oe} до температури відновлення газу на спаї T_r , яка визначає поправку на випромінювання θ_{oe} , має наступний вигляд:

$$\theta_{oe} = \frac{T_r - T_{oe}}{T_r} = \theta_o \left\{ 1 - \frac{1 - \varphi}{1 + \frac{\bar{\epsilon}_o \epsilon_e}{\bar{\epsilon}_e \epsilon_o} E_o \sigma_o} - \varphi \frac{\left[(0,01T_z)^4 - (0,01T_{c\text{эф}})^4 \right]}{\left[(0,01T_r)^4 - (0,01T_{c\text{эф}})^4 \right]} \right\} \frac{1 + 4E_o \sigma_o}{\frac{\alpha_{oe}}{\alpha_o} + 4E_o \sigma_o}, \quad (1)$$

де ϵ_o, ϵ_e - відповідно ступінь чорноти спаю і екрана, T_z - температура газового потоку.

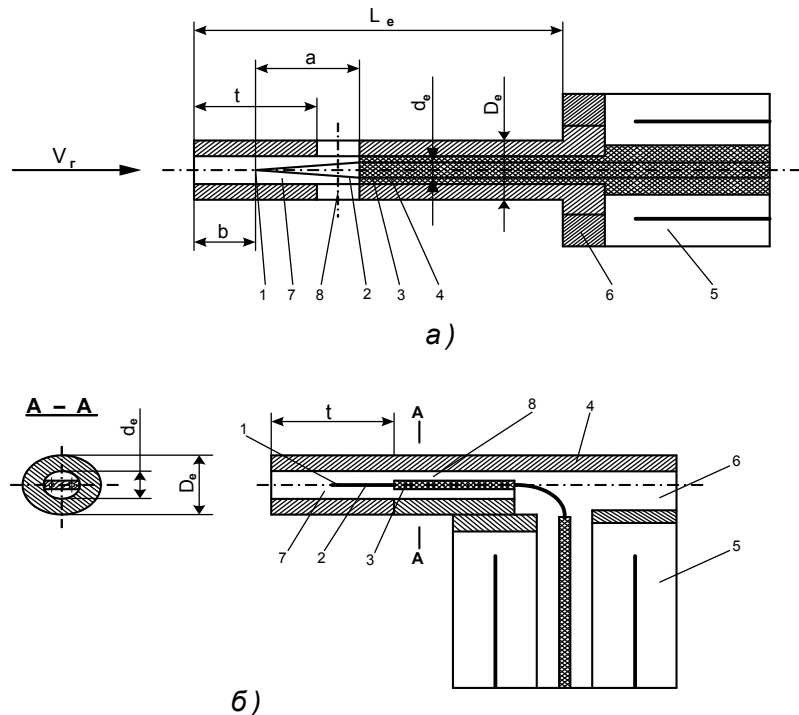
Випромінювання оточуючих термопару тіл можна представити у вигляді випромінювання

ефективної стінки з температурою $T_{c\text{эф}} = \sqrt[4]{T_{ct}^4(1-\varphi_o) + T_c^4\varphi_o}$, де T_c - температура стінок; φ_o - коефіцієнт опромінення екрана (або спаю термопари без екрана) газовим потоком.

Коефіцієнт опромінення спаю термопари в екрані газовим потоком (кутовий коефіцієнт випромінювання) є суто геометричним фактором і залежить від форми, розмірів та взаємного розташування спаю і екрана. Його можна представити формулою:

$$\varphi = \frac{\sqrt{d^2/4 + b^2} - b}{2\sqrt{d^2/4 + b^2}}. \quad (2)$$

Всі геометричні позначення для екрана вказані на рис.1. При відношенні $b/d \geq 1,5$ величина $\varphi \leq 0,025$. При умові $T_c/T_r \leq 1,5$ що, як правило, виконуються на практиці, можна наближено прийняти $\varphi = 0$ і його не враховувати в формулі (1).



а) – через бокові отвори в стінках екрана; б) – через поздовжні зазори; 1 – робочий спай; 2 – термопара; 3 – електроізоляційна трубка; 4 – екран; 5 – водоохолоджуваний корпус термозонда; 6 – втулка для кріплення екрана до корпусу; 7 – камера гальмування газового потоку; 8 – отвори для виходу газу

Рис.1 Схема термоперетворювачів з виходом газового потоку

Поправка на випромінювання i_o того ж спаю при відсутності екранів визначається так:

$$i_o = \frac{\epsilon_o \gamma \left[(0,01T_o)^4 - (0,01T_{c\text{эф}})^4 \right]}{\bar{\epsilon}_o T_r} = \frac{E_o \left(1 - \frac{T_{c\text{эф}}^4}{T_r^4} \right)}{1 + 4E_o \alpha_o}, \quad (3)$$

де T_o - температура спаю; σ - стала Больцмана; E_o - основний параметр випромінювання спаю, який визначається залежністю

$$E_o = \frac{\epsilon_o \gamma (0,01T_r)^3}{\bar{\epsilon}_o}, \quad (4)$$

де α_o - коефіцієнт конвективної тепловіддачі від набігаючого газового потоку до неекранованого

спаю термопари.

При характерному для термопар діапазоні чисел Рейнольдса від 200 до 2000 [3]

$$\alpha_o = 0,72 \frac{\lambda_c}{d_c} \text{Re}_c^{0,5} \text{Pr}_c^{0,33}, \quad (5)$$

де λ_c - коефіцієнт теплопровідності набігаючого газового потоку; Re_c - критерій Рейнольда при швидкості набігаючого потоку V_c ; Pr_c - критерій Прандтля для газового потоку.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі для спаю в екрані α_{oe} також обчислюється за залежністю (5) при підстановці в неї замість V_c швидкості в камері

гальмування V_k . З врахуванням цього $\bar{b}_{oe}/\bar{b}_o = \bar{V}_k^{0,5}$.

Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі від газового потоку до поверхні екрана визначається за формулами для вимушеного ламінарного поздовжнього обтікання пластин довжиною l (див. рис.1) [3]:

$$Nu_l = 0,33 Re_l^{0,5} Pr_l^{0,33}. \quad (6)$$

Таким чином, залежність всіх коефіцієнтів конвективної тепловіддачі від числа Рейнольдса прийнята степеневою з показником степеня 0,5. Тоді відношення коефіцієнтів тепловіддачі α_o/α_e при такому допущенні буде залежати тільки від співвідношення геометричних розмірів екрана і спаю та відносної швидкості V_k .

Функції ξ_o і ξ_e в формулах (1) і (3) за величиною близькі до одиниці і можуть бути апроксимовані після розкладення їх в ряд наступними залежностями:

$$\alpha_o = \frac{1-1,5E_o}{1+4E_o}, \quad \alpha_e = \frac{1-1,5E_o \frac{\bar{b}_o \epsilon_e}{\bar{b}_e \epsilon_o}}{1+4E_o \frac{\bar{b}_o \epsilon_e}{\bar{b}_e \epsilon_o}}. \quad (7)$$

Після обчислення за формулою (1) температури відновлення T_r температура гальмування газового потоку обчислюється за відомою формулою [4]:

$$T_z^* = \frac{T_r \left(1 + \frac{k-1}{2} M_z^2 \bar{V}_k^2 \right)}{1 + r \frac{k-1}{2} M_z^2 \bar{V}_z^2}, \quad (8)$$

де k – коефіцієнт адіабати газу; M_z - число Маха для газового потоку; r – коефіцієнт відновлення (для звукових потоків в діапазоні чисел Рейнольдса від 200 до 2000 $r \approx 0,85$).

Розрахунок величини T_z^* проводиться методом послідовних наближень, починаючи з обчислень основного параметра випромінювання E_o за формулою (4). В першому наближенні в формулі (3) замість T_r підставляють покази термопари T_{oe} . Із цим значенням $E_o^{(1)}$ знаходять величини $\xi_o^{(1)}$ і $\xi_e^{(1)}$ за формулою (7), $\theta_o^{(1)}$ за формулою (3) і $T_r^{(1)}$ за формулою (1). Потім значення $T_r^{(1)}$ знову підставляється в (3) як значення T_r і т. д. Оскільки в практиці вимірювань, як правило, $E_o < 0,1$, то процес обчислення T_r швидко збігається і друге або третє наближення є достатнім для забезпечення потрібної

точності. При розрахунку T_z^* крім показів термопари T_{oe} повинні бути задані значення ϵ_o і ϵ_e в даному діапазоні температур, швидкість потоку для розрахунку коефіцієнтів конвективної тепловіддачі, геометричні розміри екрана і спаю, а також температура T_{ceff} .

Величина відносної швидкості в камері гальмування \bar{V}_k повинна визначатися експериментально. На основі вимірювань швидкості \bar{V}_k в камері гальмування для конструкцій, зображених на рис.1, встановлено, що значення \bar{V}_k можна представити так:

$$\bar{V}_k = 0,6 \frac{F_{вих}}{F_{ex}}, \quad (9)$$

де F_{ex} - площа поперечного січення камери гальмування, $F_{вих}$ - площа двох вихідних отворів.

Як приклад запропонованої методики були виконані розрахунки температури газу за наведеними вище залежностями для екранів з геометричними розмірами: $d_e = 3$ мм, $D_e = 6$ мм, $t = 10$ мм і $b/d \geq 1,5$ (тобто $\varphi \approx 0$). На рис. 2 представлені значення основного параметра випромінювання спаю E_o в залежності від температури відновлення газового потоку при $\epsilon_o = 0,2$ (для платинових і іридієвих термопар) і $\epsilon_o = 0,8$ (для хромель/алюмелевих термопар). Параметром до залежності є розмірна величина $c_r V_z / d_e$, яка має назву густини потоку маси, що проходить через одиницю площі поперечного січення каналу з газовим потоком за одиницю часу. Вона характеризує коефіцієнт конвективної тепловіддачі (c_r - густина газу).

На рис.3 представлена залежність поправки на випромінювання $\eta_{oe} = \frac{T_r - T_{oe}}{T_r}$ від параметра випромінювання спаю E_o при $\epsilon_e/\epsilon_o = 1$ і 4. Параметром до наведених залежностей служить відносна швидкість в камері гальмування \bar{V}_k .

Таким чином, із рис.3 видно, що для зменшення поправки на випромінювання необхідно забезпечувати найбільшу швидкість газу V_k через камеру гальмування. Але необхідно відмітити, що при цьому збільшується поправка на неповноту гальмування газового потоку в камері гальмування.

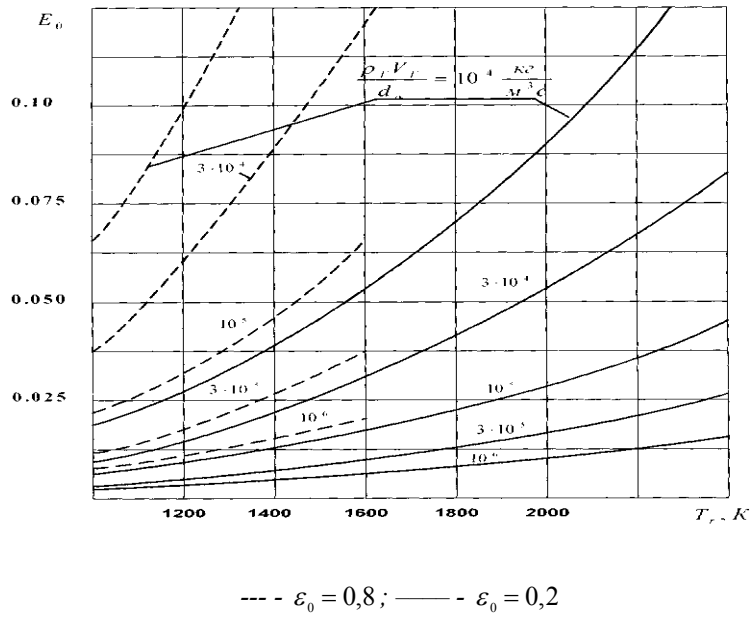


Рис.2. Залежність основного параметра випромінювання робочого спаю від температури

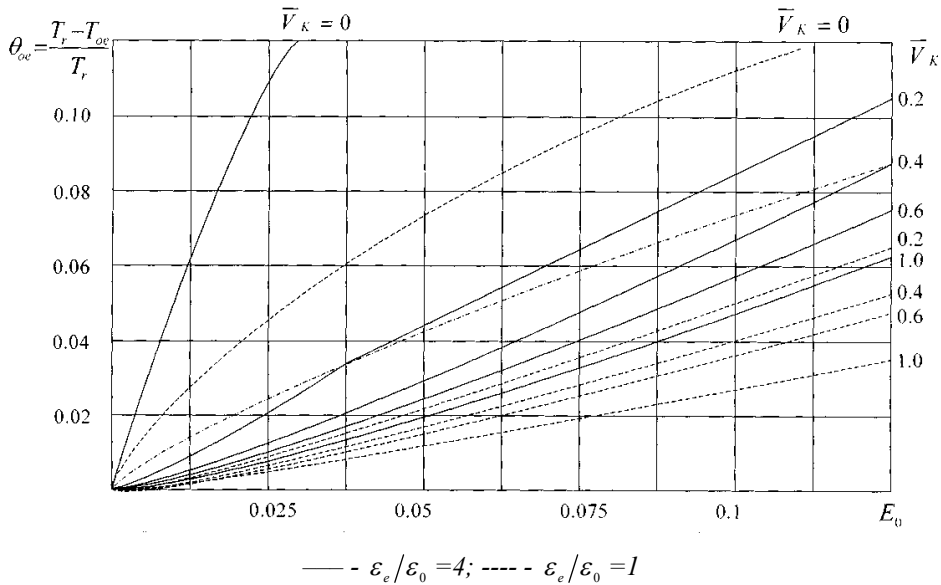


Рис.3. Залежність поправки на випромінювання до показів екранованої терморпарі від основного параметра випромінювання робочого спаю

І.Фединець В. Вплив захисних екранів термометровуювача на похибку від випромінювання при вимірюванні температури газових потоків //Вісн. НУ "Львівська політехніка". – 2003. – №476. – С.67-72. 2. Рекин А.Д. Влияние экрана на показания терморпар в

высокотемпературном потоке газа //Теплоэнергетика. – 1978. – №10. – С. 48-53. 3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343с. 4. Петунин А.Н. Измерение параметров газового потока. – М.: Машиностроение, 1974.–260с.