

Знаходження сталої часу теплової вимірювальної комірки з метою підвищення швидкодії газоаналітичних приладів

Олег Макар, Олександр Кріль,
Богдан Кріль

Кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
Національний університет "Львівська політехніка",
УКРАЇНА, м. Львів, вул. Устияновича, 5,
E-mail: olehmakar@ukr.net

Abstract – In gas analysing equipment heat detectors are widely used for converting thermal physical and mechanical parameters of the gaseous mixture into an electrical signal. Heated by electric current these detectors sense thermal conductivity, heat capacity and project gasous mixture expenditure. Sensitivity and performance velocity are among the main parameters of these detectors determining their metrological characteristics. The given paper provides the equation of time constant of the heat measuring cell, common in gas analysing equipment, for the purpose of studying the influence of detectors' mode changes on the performance velocity of gas analysing equipment.

Ключові слова – теплова вимірювальна комірка, тепловий чутливий елемент, газовий аналіз, стала часу.

I. Вступ

Вимірювальні комірки (ВК) з тепловим чутливим елементом (ТЧЕ) широко застосовуються в газоаналітичній техніці для вимірювання складу газових сумішей. Розширені функціональні можливості мають протічні вимірювальні з ТЧЕ, які сприймають теплофізичні (теплопровідність і теплоємність) та механічні (витрата, густина і в'язкість) параметри аналізованого середовища і можуть застосовуватися для побудови газоаналізаторів з комбінованими методами вимірювання.

II. Теплові вимірювальні комірки, які застосовуються в газоаналітичних приладах

Теплові чутливі елементи (ТЧЕ) розрізняють за конструкцією і за матеріалом, з якого виготовлений елемент. Конструктивно ТЧЕ виготовляються у формі циліндра чи кулі, які закріплені на тримачах. Конструкція тримача суттєво впливає на статичну характеристику ТЧЕ. Для виготовлення ТЧЕ застосовуються метали з великим температурним коефіцієнтом опору: платина, вольфрам, нікель, а також різні напівпровідникові матеріали. В газоаналітичній техніці елементи, як правило, мають зовнішнє покриття для збільшення механічної міцності та корозійної стійкості, виключення каталітичних ефектів. Матеріал покриття – скло, термостійкі полімери.

Значення номінального опору найбільш поширеної конструкції ТЧЕ складає близько 20 Ом, матеріал – платина з легуючими додатками металів платинової

групи. Робочий струм через ці елементи в серійних приладах знаходиться в межах 40–100 мА (більші значення можуть призвести руйнуванню через локальні перегриви). Температура елемента лежить в межах 100 – 300 °С. Об'ємну витрату газової суміші через ВК з ТЧЕ доцільно вибирати в межах 0.1 – 100 · 10⁻³ м³/год. Великі значення витрати ускладнюють конструкцію пристроїв прободготовки і конструкцію газоаналізаторів і при цьому не сприяють появі додаткових функціональних можливостей або інших переваг.

Функціональні можливості ТЧЕ в значній мірі визначаються також конструкцією вимірювальної комірки (ВК), в якій розміщений елемент.

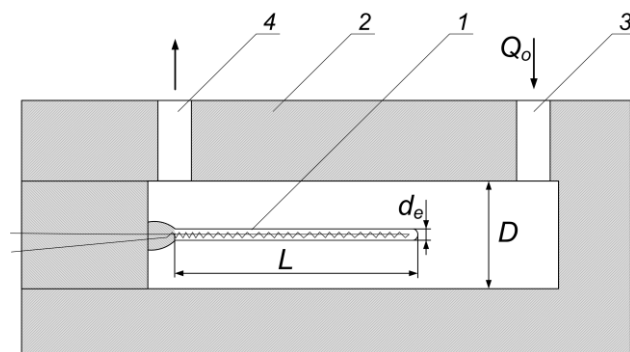


Рис. 1. Конструкція вимірювальної комірки з тепловим чутливим елементом

В найпростішій протічній комірці платиновий чутливий елемент 1 коаксіально розміщений в циліндричній камері 2 (рис. 1). Через канал 3 аналізована газова суміш підводиться в зону ТЧЕ і омиває його в повздовжньому напрямку. Канал 4 призначений для відведення газової суміші з комірки.

Конструктивні параметри досліджуваної ВК з ТЧЕ наступні: діаметр комірки – $D = 6$ мм; довжина комірки – 30 мм; діаметр ТЧЕ – $d_e = 0.6$ мм; довжина ТЧЕ – $L = 12$ мм; діаметр каналів для підведення та відведення газової суміші – 2 мм; опір ТЧЕ (при температурі $T_0 = 313$ К) – $R_0 = 22$ Ом; сила струму в номінальних режимах через ТЧЕ – $I = 60$ мА [1].

Кількість тепла, що підводиться до теплового чутливого елемента, розподіляється наступним чином (рис.2):

- шляхом теплопровідності через газову суміш передається до стінок вимірювальної комірки ($q1$);
- виноситься потоком газу при його проходженні через комірку ($q2$);
- шляхом теплопровідності переходить до корпусу вимірювальної комірки через торцеве під'єднання самого чутливого елемента ($q3$).

$$q = q1 + q2 + q3 \quad (1)$$

де q – кількість тепла, яке підводиться до чутливого елемента в одиницю часу;

$q1$ – кількість тепла, яке передається шляхом теплопровідності через газове середовище в одиницю часу;

$q2$ – кількість тепла, яке відноситься газовим середовищем в одиницю часу;

$q3$ – кількість тепла, яке передається через торцеве з'єднання в одиницю часу.

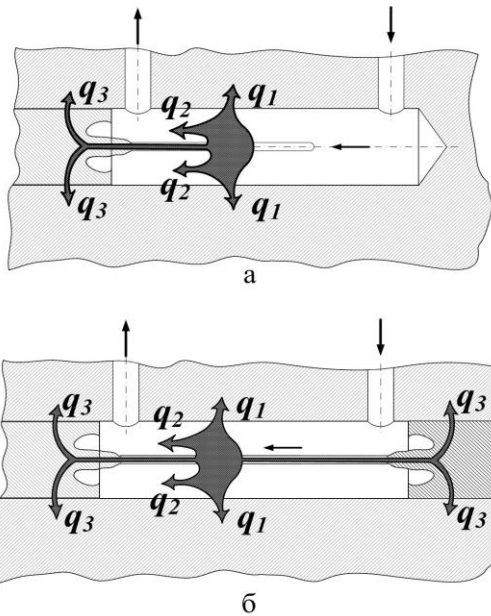


Рис. 2. Розподілення тепла, що виділяється тепловим чутливим елементом для чутливого елемента, який кріпиться лише з однієї сторони (а) і для чутливого елемента, який кріпиться з обох сторін (б)

Перерозподіли значень q_1 , q_2 і q_3 залежать від конструктивних параметрів вимірювальної комірки, від теплофізичних параметрів газової суміші і її витрати через вимірювальну комірку. Слід зазначити, що через мале відношення діаметру чутливого елемента до його довжини значення q_3 досить суттєве і може досягати до 10% від значення q .

III. Одержання виразу сталої часу теплової вимірювальної комірки

Статична характеристика теплового чутливого елемента є функцією електричного опору R від концентрації вимірюваного компонента газової суміші c :

$$R = f(c) \quad (2)$$

Рівняння статичної характеристики теплового чутливого елемента має наступний вигляд [2]:

$$I^2 \cdot R = (T_1 - T_2) \times \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_i}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] \quad (3)$$

де λ , C_p , ρ - теплопровідність, теплоємності і густина газової суміші; Q_m - масова витрата газової суміші густини; T_1 , T_2 - температури теплового чутливого елемента та газової суміші, відповідно; A , B , ψ - коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом, для конкретної конструкції ВК з ТЧЕ.

Залежність (3) необхідно доповнити відношенням, яке відображає взаємозв'язок електричного опору теплового чутливого елемента і його температури. В даному випадку для платинового чутливого елемента в вузьких межах зміни температури ТЧЕ можна обмежитися лінійною залежністю:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_1 - T_0)) \quad (4)$$

де R_0 - опір теплового чутливого елемента при T_0 , Ом; $\alpha = 38 \cdot 10^{-4}$ 1/К - температурний коефіцієнт опору.

Фізичні параметри газової суміші λ , C_p , ρ , змінюються, при зміні складу газової суміші:

$$\lambda = f(c); \quad C_p = f(c); \quad \rho = f(c) \quad (5)$$

На основі моделі конкретної теплової комірки (3) запишемо рівняння зміни кількості тепла q теплового елемента:

$$\frac{dq}{dt} = I^2 \cdot R - (T_1 - T_2) \times \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_i}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] \quad (6)$$

Ця зміна кількості тепла пов'язана зі зміною температури теплового чутливого елемента наступною залежністю:

$$\frac{dq}{dt} = m_e \cdot C_e \cdot \frac{dT_1}{dt}, \quad (7)$$

де m_e та C_e - відповідно маса і питома теплоємність матеріалу теплового елемента.

Перетворимо рівняння (4):

$$\frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha_k} = T_1 - T_2 \quad (8)$$

І на його основі, після диференціювання отримаємо:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{R_0 \cdot \alpha_k} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (9)$$

В результаті підстановки (7), (8) і (9) в (6) отримаємо:

$$\frac{m_e \cdot C_e}{R_0 \cdot \alpha_k} \frac{dR}{dt} = I^2 \cdot R - \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_m}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] \times \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha_k} \quad (10)$$

Прийнявши припущення, що склад газової суміші змінюється повільно, тобто $\frac{dR}{dt} = 0$, отримаємо:

$$I^2 \cdot R_c = \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_m}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] \times \frac{R_c - R_0}{R_0 \cdot \alpha_k} \quad (11)$$

де R_c - опір теплового елемента, який відповідає постійному значенні концентрації. Тоді підставивши (11) в (10) через

$$\left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_i}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] \text{ отримаємо:} \quad \frac{m_e \cdot C_e}{I^2 \cdot R_0^2 \cdot \alpha_k} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{R_c - R}{R_c - R_0} \quad (12)$$

Помножимо обидві частини рівняння (12) на $R_c - R_0$, отримаємо:

$$\tau \frac{dR}{dt} + R - R_c = 0 \quad (13)$$

де τ – стала часу теплового елементу.

$$\tau = \frac{R_c - R_0}{I^2 \cdot R_0^2 \cdot \alpha_k} \cdot m_e \cdot C_e \quad (14)$$

Значення R_c у рівнянні (14) знаходиться з рівняння (11):

$$R_n = \frac{R_0 \cdot \left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_i}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right]}{\left[\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \left(A + B \cdot \frac{4 \cdot C_p \cdot d_e \cdot Q_i}{\lambda \cdot \pi \cdot (D^2 - d_e^2)} \right) + \psi \right] - I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha_k} \quad (15)$$

З врахуванням того, що маса елементу рівна:

$$m_e = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot L \cdot \rho_e \quad (16)$$

де ρ_e – густина матеріалу елементу.

Підставивши рівняння (16) в рівняння (14), отримаємо:

$$\tau = \frac{R_c - R_0}{I^2 \cdot R_0^2 \cdot \alpha_k} \cdot \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot L \cdot \rho_e \cdot C_e \quad (17)$$

IV. Дослідження впливу змін режимів роботи на чутливість та сталу часу теплової вимірювальної комірки

Для досліджуваного теплового чутливого елемента з наведеними вище конструктивними розмірами, і з $\rho_e = 2500 \text{ кг/м}^3$, $C_e = 600 \text{ Дж/(кг·К)}$, поміщеного в азот ($Q_m = 0$), значення сталої часу становить $\tau = 3.3 \text{ с}$.

Збільшення сили струму, що протікає через чутливий елемент, призводить до збільшення чутливості ТЧЕ і збільшення сталої часу. Результати розрахунків відображені на рис.3, 4.

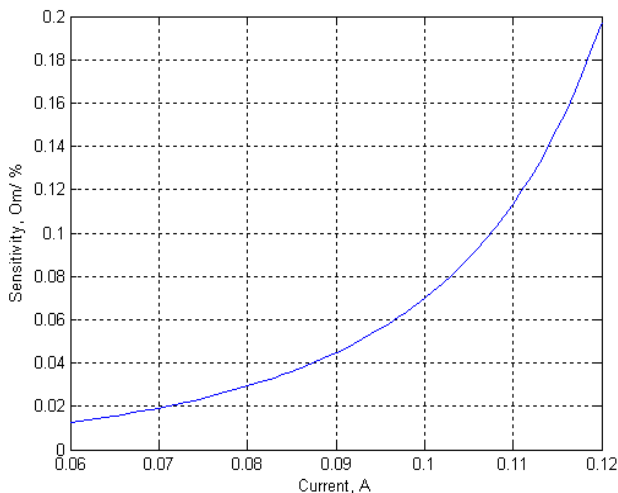


Рис. 3. Залежність чутливості ТЧЕ від сили струму, що протікає через елемент

Чутливість в статичному режимі кількісно оцінюється рівнянням:

$$S = \frac{dy}{dx}, \quad (18)$$

де x - вхідна величина, концентрація азоту у газовій суміші азоту з аргоном, %; y - вихідна величина, електричний опір теплового чутливого елемента, Ом.

Отже, рівняння чутливості теплового чутливого елемента матиме наступний вигляд [3]:

$$S = \frac{dR}{dc_1}, \quad (19)$$

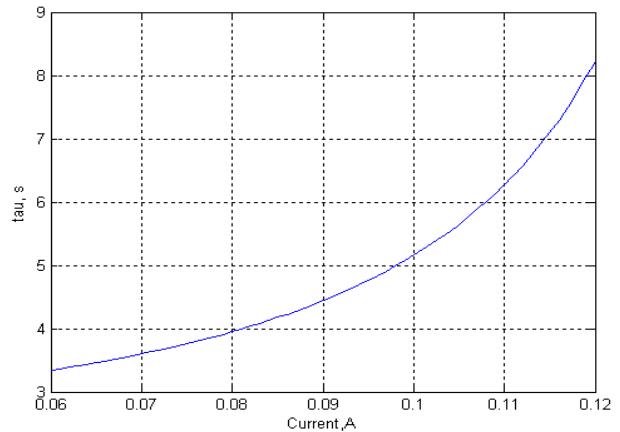


Рис. 4. Залежність сталої часу ТЧЕ від сили струму, що протікає через елемент

При значенні сили струму $I = 100 \text{ мА}$, розрахунковим шляхом знайдено, що платинова дротина нагрівається приблизно до $450 \text{ }^\circ\text{C}$, що є не припустимим, оскільки це може призвести до руйнування елемента. Щоправда, в цьому разі температуру чутливого елемента можна зменшити, збільшивши витрату газової суміші через вимірювальну комірку, але при цьому існує ризик пошкодження платинової дротини, при різкому зменшенні витрати.

При збільшенні витрати, що протікає через вимірювальну комірку, зменшується чутливість і зменшується стала часу ТЧЕ:

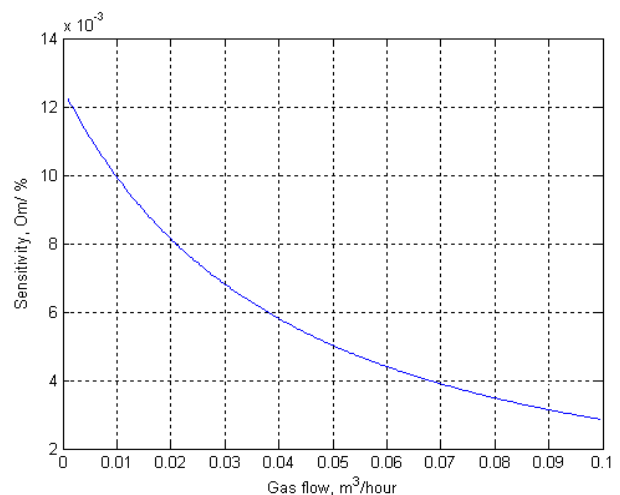


Рис. 5. Залежність чутливості ТЧЕ від витрати газової суміші, що протікає через вимірювальну комірку

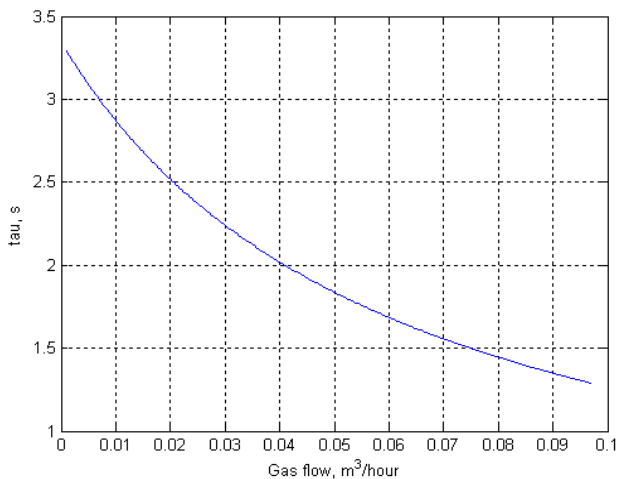


Рис. 6. Залежність сталої часу ТЧЕ від витрати газової суміші, що протікає через вимірювальну комірку

ВИСНОВОК

Отримана залежність для знаходження сталої часу теплової вимірювальної комірки може бути використана при дослідженні шляхів підвищення швидкої газоаналізаторів, визначенні оптимальних режимів

роботи вимірювальних схем до складу яких входять теплові чутливі елементи.

References

- [1] B. A. Kril, “Razrabotka teplovyh gazodinamicheskikh analizatorov sostava gazovyh smesej” [The development of gas-dynamic thermal analyzers composition of gas mixtures], Ph.D. dissertation, Dept. Analytical chemistry, Lviv Polytechnic Univ., Lviv, 1985.
- [2] B. A. Kril and O. V. Makar, “Matematychna model vymiriuvalnoi komirky z teplovym chutlyvym elementom” – Mathematical model of the measuring cell with heat sensing element, “Visnyk natsionalnoho universytetu “Lvivska politehnika”” – Herald of the Lviv Polytechnic National University, no. 712, pp. 152-156, 2011.
- [3] O. V. Makar and B. A. Kril, “Doslidzhennia chutlyvosti vymiriuvalnoi komirky z teplovym chutlyvym elementom” – Investigation of the sensitivity of the measuring cell with a heat sensitive element, in Proceedings of the 18th International Conference on Automatic Control “Automatics-2011”: September 28-30, 2011, Lviv, Ukraine. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki Publ., 2011. p. 399.