

**6. Висновок.** Результатом стали прототипи термометрів со встроєним контейнером с реперним матеріалом. На практиці доведена їх довговременна термічна і механічна стабільність в робочих умовах на ЕС. Термометри дозволяють зменшити погрешність вимірювання температури перегретого пара к менше чем 1 К. Это является значительной предпосылкой для уменьшения предписываемой минимальной разницы между температурой пара и граничными значениями для установки, что позволит повысить КПД ЕС.

Новая измерительная система передана для промышленного применения.

1. Boguhn D., Augustin S., Bernhard F., Mammen H. Phase transformations of technically pure metals and two-component alloys in miniature fixed-point crucibles. *High Temperature - High pressure*, 33 (2001). – № 4. – S. 419–426. 2. Boguhn D., Augustin

S., Bernhard F., Mammen H., Tischler M. Application Of Binary Alloys In Miniature Fixed-point Cells As Secondary Fixed Points In The Temperature Range From 500 °C To 660 °C. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 8th Symposium, Chicago 2002*. 3. Augustin S., Bernhard F., Boguhn D., Donin A., Mammen H. Industrial applicable miniature fixed-point thermocouples. *TEMPMEKO 2001 - 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Berlin, 2001. – Vol.1. – S. 3–8*. 4. Bernhard F., Boguhn D., Augustin S., Mammen H., Donin A. Application of Self-calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-point Cells in a Temperature Range from 500 °C to 650 °C in Steam Generators. *XVII IMEKO World Congress, June 2003, Dubrovnik*. 5. Donin A., Boguhn D., Bernhard F. Kalibrierwertermittlung bei Phasenumwandlungsvorgängen in Miniatur-Fixpunkt-Zellen. *Temperatur 2003, Berlin*. 6. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. *Библиотека по автоматике. – М., 1986*.

УДК 532.536

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

© Фединець В., 2003

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Досліджують динамічні характеристики термоперетворювачів залежно від умов їх теплообміну з газовим середовищем.*

*Исследуют динамические характеристики термопреобразователей в зависимости от условий их теплообмена с газовой средой.*

*Dynamic characteristics of converters of temperature are investigated depending on conditions of their heat exchange with the gas environment.*

**Постановка задачі.** Внаслідок певного значення теплоємності чутливого елемента (ЧЕ) термоперетворювача (ТП) його температура завжди буде меншою від температури газового середовища (ГС), якщо вона змінилася. При вимірюванні змінної в часі температури ГС ТП також не встигає стежити за зміною температури, оскільки для цього потрібен деякий час. Спотворення показів ТП через нестационарності як в самому ТП, так і між ТП та довкіллям зумовлені тепловою інерцією. Внаслідок теплової інерції виникає додаткова різниця між температурами ЧЕ і ГС, яка визначає динамічну похибку вимірювання температури ГС.

Визначити динамічну похибку можна, оцінивши умови теплообміну ТП з ГС і стінками, що його оточують, а також теплоємності ЧЕ. На теплообмін ТП одночасно можуть впливати багато чинників. Деякі з них можуть бути корисними і тоді ТП буде отримувати тепло від ГС. Під час дії шкідливих впливів ТП може одержувати або віддавати тепло, взаємодіючи з довкіллям або іншими джерелами тепла. Тому розв'язання рівняння теплового балансу ТП при сумісній дії на нього всіх впливів значно ускладнюється.

**Публікації.** Аналітичні залежності для визначення динамічних похибок вимірювання температури газо-

вих середовищ виводять на підставі теорії регулярного теплового режиму [1].

**Теоретичні дослідження.** Спростивши описання умов теплообміну, вважаємо, що на ТП діє один корисний вплив і один шкідливий. Крім цього допускаємо, що ТП являють собою тіла найпростіших геометричних форм, а теплофізичні властивості ЧЕ вважаємо постійними і незалежними від температури. Впливом теплопровідності і випромінювання можна знехтувати і прийняти, що характеристики теплової взаємодії ЧЕ з довкіллям та іншими тілами є постійними і не залежать від температури.

На практиці найчастіше відзначаються такі корисні впливи:

- просте нагрівання або охолодження в ГС з постійною температурою;
- нагрівання або охолодження в умовах зміни температури ГС за лінійним законом;
- теплообмін при гармонічних змінах температури ГС.

При ступінчастій зміні температури ГС  $t_0$  ЧЕ за проміжок часу  $d\tau$  отримує деяку кількість тепла  $dQ$

$$dQ = \alpha F(t_0 - t_n)d\tau, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від ГС до ТП;  $F$  – площа поверхні ЧЕ;  $t_n$  – температура чутливого елемента.

Ця кількість тепла спричинить збільшення  $t_n$

$$dQ = CMdt_n, \quad (2)$$

де  $C$  і  $M$  – відповідно теплоємність матеріалу і маса ЧЕ.

На основі (1) і (2) одержимо

$$\frac{dt_n}{d\tau} + m(t_n - t_0) = 0, \quad (3)$$

де  $m = \frac{\alpha F}{CM} = \frac{\alpha F}{C\rho V}$ ;  $\rho$  – густина матеріалу ЧЕ;  $V$  – об'єм ЧЕ.

Якщо допустити, що:

- ЧЕ являє собою тіло, в якому за зміною температури ГС одночасно змінюється температура по всьому об'єму і не порушується рівномірний розподіл температури в усіх точках ЧЕ;
- коефіцієнт тепловіддачі від ГС до ЧЕ під час зміни температури залишається постійним;
- теплоємність ЧЕ не змінюється в часі і не залежить від температури;
- тепловий вплив відбувається тільки від ГС до ЧЕ, то параметр  $m$  буде сталим.

Величина, обернена до  $m$ , визначає показник теплової інерції  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{m} = \frac{CM}{\alpha F} = \frac{C\rho V}{\alpha F}. \quad (4)$$

Із (4) для циліндричного ЧЕ  $\varepsilon = \frac{C\rho d}{4\alpha}$ , а для сферичного –  $\varepsilon = \frac{C\rho d}{6\alpha}$  ( $d$  – діаметр ЧЕ).

Вирази (3) і (4) показують, що показник теплової інерції  $\varepsilon$  залежить від геометричної форми і розмірів ЧЕ, теплоємності і густини матеріалу, з якого виготовлено ЧЕ, а також коефіцієнта тепловіддачі між ГС і ЧЕ.

Подамо температуру ГС  $t_0$  деякою функцією часу  $f(\tau)$ . За початкових умов  $t_0|_{\tau=\tau_0} = f(\tau_0) = t_0'$ ;  $t_n|_{\tau=\tau_0} = t_{n0}$  розв'язання лінійного диференціального рівняння (3) буде мати вигляд:

$$t_n = t_0 + (t_{n0} - t_0')e^{-m(\tau-\tau_0)} - e^{-m\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} e^{m\tau} f'(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Динамічну або інерційну похибку виражають залежністю

$$\Delta t_a = t_n - t_0 =$$

$$= (t_{n0} - t_0')e^{-m(\tau-\tau_0)} - e^{-m\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} e^{m\tau} f'(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для простого нагрівання або охолодження в ГС з  $f(\tau) = const$  і  $f'(\tau) = 0$  (ступінчаста зміна температури від  $t_{n0}$  до  $t_0$ ) вираз (6) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta t_a = t_n - t_0 &= -(t_0 - t_{n0})e^{-m(\tau-\tau_0)} = \\ &= -(t_0 - t_{n0})e^{-\frac{\tau-\tau_0}{\varepsilon}}, \end{aligned} \quad (7)$$

а рівняння залежності показів  $t_n$  ЧЕ від часу нагрівання має вигляд:

$$\begin{aligned} t_n - t_{n0} &= (t_0 - t_{n0}) \left[ 1 - e^{-m(\tau-\tau_0)} \right] = \\ &= (t_0 - t_{n0}) \left( 1 - e^{-\frac{\tau-\tau_0}{\varepsilon}} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (7) і (8) називають перехідними функціями приймачів температури.

При лінійній зміні в часі температури ГС за законом

$$t_0 = t_0' + A\tau \quad (9)$$

температура ЧЕ приймача температури буде змінюватися за законом

$$t_n = t'_0 + A(\tau - \varepsilon) + (t_{n'} - t'_0 + A\varepsilon)e^{-\frac{\tau}{\varepsilon}}. \quad (10)$$

Якщо  $\tau \rightarrow \infty$

$$t_n \approx t'_0 + A(\tau - \varepsilon), \quad (11)$$

тобто температура ЧЕ змінюється за тим самим законом, що і температура газового середовища, але із запізненням на час  $\varepsilon$ .

При синусоїдній зміні температури ГС за законом

$$t_0 = t'_0 + t_A \sin \omega \tau \quad (12)$$

температура ЧЕ при  $\tau \gg \varepsilon$  змінюється за законом

$$t_n = t'_0 + \frac{t_A}{\sqrt{1 + \omega^2 \varepsilon^2}} [\sin(\omega \tau - \arctg \omega \varepsilon)], \quad (13)$$

тобто змінюється з тією самою частотою, але зі зменшеною амплітудою і зсувом за фазою відносно зміни температури ГС.

Для визначення динамічної похибки приймачів температури, що являють собою складні тіла або систему тіл у виразі (6) необхідно використати теорему про середнє значення. Тоді за умови, що  $f'(\tau) = dt_0/d\tau$  не набуває нескінченні значення, що не мають фізичного змісту, в міру зменшення різниці  $(t - t_0)$  вираз для динамічної похибки буде мати вигляд

$$\Delta t_a = -\varepsilon \frac{dt_0}{d\tau}. \quad (14)$$

Вираз (14) показує, що для приймача температури із заданим значенням показника теплової інерції  $\varepsilon$  динамічна похибка буде залежати від швидкості зміни температури ГС. Якщо ж швидкість зміни температури ГС є невідомою, для обчислення динамічної похибки приймача можна використати зміну температури, одержану за допомогою приймача, динамічну похибку якого визначають.

Запишемо рівняння теплового балансу для циліндричного ЧЕ з довжиною  $L$  за час  $\Delta \tau$  між теплом, що надходить від ГС до ЧЕ і теплом, що поглинається ним, за умови рівномірного розподілу температур за перерізом і незначними (якими можна знехтувати) втратами через тепловідведення по вивідних провідниках:

$$\alpha(t_0 - t_n)\pi d L \Delta \tau = \frac{\pi d^2}{4} L \rho C \frac{dt_n}{d\tau} \Delta \tau. \quad (15)$$

Враховуючи, що для циліндричного ЧЕ  $\varepsilon = \frac{C \rho d}{4\alpha}$ , отримаємо:

$$\Delta t_a = t_n - t_0 = -\varepsilon \frac{dt_n}{d\tau}. \quad (16)$$

Ця залежність може використовуватися для оцінки динамічних похибок вимірювання температури ГС і для визначення показника теплової інерції приймачів температури.

Із (7) вираз для відносної динамічної похибки можна подати у вигляді:

$$\delta t_a = \frac{t_0 - t_n}{t_0 - t_{n'}} = e^{-\frac{\tau}{\varepsilon}}. \quad (17)$$

Реальні значення динамічної похибки визначає показник теплової інерції приймача температури.

Аналіз (17) дає змогу знайти деякі характерні точки для простого нагрівання або охолодження:

– якщо  $\tau = \varepsilon$   $\delta t_a = 1/e = 0,368$ ;

– якщо  $\tau = 0,693\varepsilon$   $\delta t_a = 0,5$  і при  $\tau = 3\varepsilon$   $\delta t_a = 0,05$ .

Фізичне значення показника теплової інерції полягає в тому, що в момент часу  $\tau = \varepsilon$  ЧЕ сприймає 0,632 початкового перепаду температури між ГС і приймачем температури, а різниця між температурами ГС і приймача дорівнює 0,368 цього перепаду. Це значення нормують у національних стандартах [2]. За рубежом здебільшого прийнято, щоб приймач температури нагрівався до  $0,5 t_0$  [3] або  $0,95 t_0$ . На погляд автора, в стандартах не потрібно жорстко нормувати динамічні характеристики приймачів температури. Це дасть змогу, крім показника теплової інерції, подати їх в іншій формі (перехідна характеристика, функція передачі тощо).

1. Кондратьев Г.М. *Тепловые измерения*. – М., Л., 1957.
2. ДСТУ 2858–94 (ГОСТ 6651–94) *Термоперетворювачі опору. Загальні технічні вимоги і методи випробувань*.
3. *International Electrotechnical Commission. IEC Standart. Publication 751. Industrial platinum thermometer sensors*. – 1984.