

УДК 006.91(075.8)

Бабіченко А.К., к.техн.наук, професор, Лисаченко І.Г., к.техн.наук, доцент,  
Деменкова С.Д., асистент

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"*

### **З ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ КОНТАКТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ**

**Ключові слова:** вимірювання температури, контактні перетворювачі, методична похибка, умови теплообміну

**Вступ.** Ефективність функціонування сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ) здебільшого визначається достовірністю вимірювальної інформації. Отримання достовірної інформації о значеннях параметрів технологічних процесів, зокрема температури, в багатьох виробництвах сприяє підвищенню їх економічності.

Вимірювання температури контактним методом за допомогою термоелектричних термометрів та термоопорів отримало найбільш широке розповсюдження у технологічних системах завдяки надійності конструкції датчика, можливості роботи в широкому діапазоні температур та відносно невеликої вартості. Чутливі елементи термометрів опору та термоелектричних термометрів (термопар) розміщують у захисну круглу металеву трубку (зонд). Це обумовлює, внаслідок відведення теплоти від контрольованого середовища по стінкам зонду, виникнення методичних похибок. В технічній літературі з вимірювань [1–4] наведені відомості та формули для розрахунку методичних похибок, що враховують теплообмін через металеву стінку зонду за допомогою коефіцієнта тепловіддачі. Однак, при цьому, майже відсутня інформація щодо можливості визначення цих коефіцієнтів тепловіддачі, величина яких, як відомо [5], суттєво залежить від умов теплообміну. Велике різноманіття можливих умов застосування зондових датчиків температури вимагає проведення систематичних досліджень з метою визначення рівнянь для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та встановлення методичних похибок за тих чи інших умов теплообміну в процесі вимірювання температури.

**Результати аналітичних досліджень.** Дослідження проводились шляхом встановлення рівнянь для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, що наведені в існуючих періодичних виданнях. Аналіз літературних даних свідчить, що майже всі існуючі формули для визначення коефіцієнтів тепловіддачі ( $\alpha$ ) ідентичні. При цьому, відрізняються вони лише чисельними значеннями степені у критеріях гідродинамічної особливості (число Рейнольдса) та фізичної властивості теплоносія або стінки трубки зонду (число Прантля), а також коефіцієнтів перед цими критеріями [5–7]. За результатами узагальнення рівняння для розрахунку величини  $\alpha$  (Вт/м<sup>2</sup>К) при поперечному обтіканні рідиною круглої металеві труби зонду датчика температури, що найбільш притаманно при їх встановленні у трубопроводі, можуть бути представлені у наступному вигляді:

при  $Re < 10^3$

$$\alpha = 0.56 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \cdot (\lambda/d_n); \quad (1)$$

при  $Re > 10^3$

$$\alpha = 0.28 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.36} (\text{Pr}/\text{Pr}_s)^{0.25} \cdot (\lambda/d_n), \quad (2)$$

де  $\text{Re} = \frac{\omega d_n \rho}{\mu}$  – критерій Рейнольдса для потоку рідини;  $\text{Pr} = c\mu/\lambda$  – критерій Прантля для потоку рідини,  $\omega$  – швидкість рідини, м/с;  $\rho$  – густина рідини кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини, Па\*с;  $c$  – питома теплоємність рідини, Дж/кгК;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/мК;  $d_n$  – зовнішній діаметр металевої трубки зонду, м;  $\text{Pr}_s$  – критерій Прантля для стінки зонду.

Як засвідчує практичний досвід розрахунків відношення  $(\text{Pr}/\text{Pr}_s)^{0.25}$  не перевищує величини 1,1. Це дозволяє забезпечити спрощення обчислень за рівняннями (1) і (2) шляхом збільшення коефіцієнта  $\alpha$  на 10%.

Для повітря і газів залежності (1) і (2) спрощуються та приймають наступний вигляд [6]:

$$\begin{aligned} \text{при } \text{Re} < 10^3 & \\ \alpha &= 0.49 \cdot \text{Re}^{0.5} (\lambda/d_n); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{при } \text{Re} > 10^3 & \\ \alpha &= 0.245 \cdot \text{Re}^{0.6} (\lambda/d_n), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\text{Re}$  – критерій Рейнольдса для повітряного чи газового потоку;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/мК.

Співвідношення (1)–(4) справедливі для кута атаки  $\varphi = 90^\circ$ , що утворений напрямком руху потоку і віссю металевої трубки зонду. При цьому, визначення величини  $\alpha_\varphi$  в залежності від кута атаки, встановлюється за формулою:

$$\alpha_\varphi = \alpha \cdot \varepsilon_\varphi, \quad (5)$$

де значення коефіцієнта  $\varepsilon_\varphi$  визначається згідно табл. 1 [5].

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта  $\varepsilon_\varphi$  від кута атаки  $\varphi$

$\varphi$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$\varepsilon_\varphi$	1	1	0,98	0,94	0,87	0,76	0,65	0,59	0,55

Наведені залежності (1)–(5) дозволяють встановлювати величину коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , що входить у формулу для розрахунку статичної методичної похибки вимірювання температури  $\Delta t$ , яка, як відомо [4], має наступний вигляд:

$$\Delta t = t_m - t_c = - \frac{t_c - t_{cm}}{chL \sqrt{\frac{4d_n \cdot \alpha}{\lambda_m (d_n^2 - d_{en}^2)}}}, \quad (6)$$

де  $t_m$ ,  $t_c$ ,  $t_{cm}$  – відповідно температура, що вимірюється термоперетворювачем, потоку відповідно середовища і стінки трубопроводу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр металевої трубки зонду, м;  $L$  – глибина занурення зонду у середовище, де вимірюється температура, м;  $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності металевої трубки зонду, Вт/мК.

В табл. 2 представлені результати досліджень щодо впливу умов теплообміну, зокрема швидкості потоку повітря, на статичну методичну похибку.

Таблиця 2 – Результати впливу умов теплообміну на величину статичної методичної похибки термоперетворювача зондового типу

Швидкість потоку, м/с	Зовнішній діаметр зонду, мм	Внутрішній діаметр зонду, мм	Температура, $^{\circ}\text{C}$			Глибина занурювання зонду у середовище, мм	Коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{K}$	Методична похибка вимірювання температури, $^{\circ}\text{C}$
			Стінки трубопроводу	Термоперетворювача	Потоку повітря			
5	24	16	10	20,00	21,98	100	57,61	1,98
10	24	16	10	19,09	21,98	100	87,32	2,89

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що внаслідок збільшення швидкості у два рази статична похибка вимірювання температури за рахунок відведення теплоти по трубці термоперетворювача збільшується майже у 1,5 рази.

**Висновки.** За результатами аналітичних досліджень встановлені рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі, що враховують умови теплообміну через металеві захисні трубки найбільш розповсюджених термоперетворювачів опору. Розрахунками доведено, що недооцінка умов теплообміну призводить до суттєвих прорахунків у визначенні методичної похибки. Представлені формули і дані обчислень дозволяють проводити аналіз щодо можливості зниження методичних похибок розглянутих датчиків температури під час виконання монтажних робіт.

#### Література

1. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб: Кн.1. Москва: Изд-во стандартов, 1990. 428 с.
2. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація: навч. посіб. Київ: Знання, 2006. 242 с.
3. Наладка средств измерений и систем технологического контроля: справочное пособие / А.С. Клюев и др.; под ред. А.С. Клюева. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 400 с.
4. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования: часть 1, В.А. Дубровский и др. Киев: Наукова думка, 1981 . 463 с.
5. Исаенко В.П., Осипова В.А. , Суколом А.С. Теплопередача: учебник. Москва: Энергия, 1975. 488 с.
6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: Москва: Энергия, 1977. 344 с.

7. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологий: учеб. пособие / Л.Л. Товажнянский и др. Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. 432 с.

Bibliography (transliterated)

1. Artem'yev B.G., Golubev S.M. Spravochnoye posobiye dlya rabotnikov metrologicheskikh sluzhb: Kn.1. Moskva: Izd-vo standartov, 1990. 428 p.

2. Tsyutsyura S.V., Tsyutsyura V.D. Metrolohiya, osnovy vymiryuvan', standartyzatsiya ta sertyfikatsiya: navch. posib. Kyiv: Znannya, 2006. 242 p.

3. Naladka sredstv izmereniy i sistem tekhnologicheskogo kontrolya: spravochnoye posobiye / A.S. Klyuyev i dr.; pod red. A.S. Klyuyeva. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 400 p.

4. Spravochnik po naladke avtomaticheskikh ustroystv kontrolya i regulirovaniya: chast' 1, V.A. Dubrovskiy i dr. Kiyev: Naukova dumka, 1981 . 463 p.

5. Isayenko V.P., Osipova V.A. , Sukolol A.S. Teploperedacha: uchebnik. Moskva: Energiya, 1975. 488 p.

6. Mikheyev M.A., Mikheyeva I.M. Osnovy teploperedachi: Moskva: Energiya, 1977. 344 p.

7. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: ucheb. posobiye / L.L. Tovazhnyanskyi i dr. Khar'kov: NTU "KHPI", 2006. 432 p.

УДК 006.91(075.8)

Бабиченко А.К., Лысаченко И.Г., Деменкова С.Д.

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ  
КОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

В статье приведены результаты аналитических исследований по установлению уравнений для расчета коэффициентов теплоотдачи, учитывающих условия теплообмена между измеряемой средой и металлическим защитным зондом термопар и термометром сопротивления. Представленные формулы и методики вычислений позволяют осуществлять анализ условий теплообмена при контактном методе измерения температуры с целью разработки мероприятий для уменьшения методической погрешности.

Babichenko A.K., Lisachenko I.G., Demenkova S.D.

**TO THE QUESTION OF DETERMINING THE METHODOLOGICAL ERROR OF  
CONTACT TEMPERATURE TRANSFORMERS**

The article presents the results of analytical studies on the establishment of equations for the calculation of heat transfer coefficients, taking into account the conditions of heat transfer between the measured medium and the metal protective probe of the thermocouple and the resistance thermometer. The presented formulas and calculation methods allow the analysis of heat transfer conditions in the contact method of temperature measurement in order to develop measures to reduce the methodological error.