

# АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 536.532

**В.О. Фединець**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

## ОПТИМІЗАЦІЯ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ ПІДСИСТЕМИ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

© Фединець В.О., 2009

**Подано засади оптимізації газодинамічної підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків за наявності завод і прийнятих обмежень.**

**Principles of optimization of gasdynamical subsystem of receivers are considered for measuring of temperature of gas streams at presence of hindrances and the accepted limitations.**

**Вступ.** Точність вимірювання температури газових потоків залежить не тільки від похибок засобів вимірювання, а і від умов вимірювання, способу установлення термоперетворювача (ТП) тощо. Це зумовлено тим, що під час використання контактних методів вимірювання температури ТП перебуває в безпосередньому контакті із середовищем, температура якого вимірюється. В цих умовах ТП для середовища є стороннім тілом і тою чи іншою мірою порушує початкове температурне поле середовища в місці його встановлення. Будь-який ТП показує тільки свою власну температуру, або точніше температуру чутливого елемента, яка в загальному випадку відрізняється від температури гальмування. Різниця між показами ТП і температурою гальмування становить похибку вимірювання температури газових потоків. Ця похибка визначається умовами теплового балансу у разі взаємодії чутливого елемента ТП з газовим потоком через конвекцію, випромінювання та теплопровідність (кондуктивний теплообмін). Оцінка похибки ускладнюється і тим, що теплофізичні властивості як термоелектричних, так і конструктивних матеріалів також залежать від температури.

У разі великих швидкостей газового потоку спостерігається так звана “швидкісна” похибка, обумовлена неповним перетворенням кінетичної енергії рухомого газу в теплову в пристінному шарі, що оточує чутливий елемент ТП.

Під час вимірювання температури газового потоку великої швидкості незалежно від того, якою є дійсна температура, чутливий елемент ТП має вищу температуру, ніж середовище і стінки, що його оточують. Із зростанням температури потоку різниця між температурою ТП і стінок зростатиме. Чутливий елемент ТП втрачатиме деяку частину одержаного від потоку тепла.

Нарешті, якщо температура газового потоку не є стаціонарною, то теплоємність чутливого елемента є причиною того, що ТП не встигає ресструвати змінну в часі температуру потоку. В цих умовах виникає динамічна похибка вимірювання.

Отже, випромінювання, кондуктивний теплообмін, процес перетворення кінетичної енергії в теплову залежно від швидкості потоку, а також обмежені можливості ТП без запізнення слідкувати за зміною температури потоку визначають основні види похибок, які спостерігаються під час вимірювання температур газових потоків. Ці похибки в загальному випадку залежать від геометричних розмірів і фізичних властивостей чутливого елемента ТП, а також від фізичних властивостей і параметрів потоку, що омиває чутливий елемент.

**Аналіз публікацій.** Повне аналітичне дослідження сумісного впливу всіх основних факторів на загальну похибку вимірювання температури газового потоку конкретним ТП складної конструкції практично неможливе, оскільки деякі залежності, що описують характер впливу того чи іншого фактора, можуть бути визначені тільки експериментально. Внаслідок того, що оцінка впливу різних факторів завжди має наближений характер. Як правило, на практиці аналізують кожний вид похибки окремо з припущенням, що решта її видів відсутні, а загальну похибку вимірювання можна розглядати як суперпозицію окремих видів похибок [1, 2, 3].

Тому для зручності проведення аналізу в [4] ТП пропонується подати у вигляді окремих елементарних ланок зі своїми операторами перетворення і зі своїми складовими похибки. Причому за елементарну ланку необхідно приймати сукупність способів і засобів перетворення, що об'єднуються за характерними ознаками.

У разі такого представлення ТП зручно проводити поетапну оптимізацію за ланками його еквівалентної схеми. Критерій оптимальності, функції обмежень та фактори, які впливають для кожної ланки можуть бути різними.

Для ТП газових потоків еквівалентна схема перетворення в [5] наведена у вигляді трьох послідовно з'єднаних ланок (підсистем): газодинамічної, теплової та електричної. Газодинамічна підсистема перетворює термодинамічну температуру  $T(\tau)$  газового потоку на вході ТП в температуру гальмування  $T_{ПТ}(\tau)$  на вході в термочутливий елемент і характеризується "швидкісною" складовою похибки. Теплова підсистема перетворює цю температуру в рівноважну температуру  $T_{РПТ}(\tau)$  термочутливого елемента, що виражає його ентальпію і характеризується складовими похибки від кондуктивного, конвективного і теплообміну випромінюванням та похибки від наявності джерел енергії в ТП. Електрична підсистема перетворює температуру  $T_{РПТ}(\tau)$  в вихідний електричний сигнал  $y_{ПТ}(\tau)$ .

**Мета роботи.** Визначальною характеристикою газодинамічної підсистеми є коефіцієнт відновлення ТП і метою роботи є оптимізація газодинамічної системи, яка повинна містити визначення способів і засобів, що забезпечують постійність коефіцієнта відновлення за наявності завод і прийнятих обмеженнях.

**Теоретичні та експериментальні дослідження.** Швидкісна похибка  $\Delta t_{шв}$  вимірювання температури газового потоку, яка є основною для газодинамічної підсистеми ТП, визначається рівнянням через коефіцієнт відновлення і швидкість газового середовища поблизу чутливого елемента

$$\Delta t_{шв} = T_{РПТ} - T_0 = -(1-r) \frac{V^2}{2C_p}, \quad (1)$$

де  $T_0$  – температура гальмування потоку;  $V$  – швидкість набігаючого потоку;  $C_p$  – теплоємність потоку при постійному об'ємі.

Розрахунки, виконані за (1), показують, що, наприклад, для повітря значення  $\Delta t_{шв}$  становить 1; 2; 5; 20; 500 К відповідно при швидкостях 50; 100; 200 і 1000 м/с, а для перегрітої водяної пари  $\Delta t_{шв} = 0,4$  К при швидкості 50 м/с. Для швидкостей потоку до 50 м/с значення  $\Delta t_{шв}$  порівняно невелике, тому цю швидкість у разі практичних вимірювань температури, як правило, вважають верхньою межею діапазону "помірних" швидкостей.

Аналіз (1) показує, що швидкісна похибка залежить від швидкості газового потоку в зоні чутливого елемента і коефіцієнта відновлення ТП, який своєю чергою також залежить від швидкості потоку і конструктивних та геометричних параметрів ТП.

Отже, оптимізація газодинамічної підсистеми (оптимізація швидкісної складової похибки) повинна передбачати визначення способів і засобів, що забезпечують постійність коефіцієнта відновлення і штучного зменшення швидкості обтікання чутливого елемента порівняно зі швидкістю набігаючого потоку за наявності завод і прийнятих обмежень.

До обмежень можуть входити вимоги забезпечення таких факторів:

- оптимальних умов конвективного теплообміну ТП з вимірюваним середовищем;
- мінімального спотворення температурного поля досліджуваного процесу;
- фізичної і технічної реалізації ТП тощо.

Критерієм оптимальності слугуватиме критерій мінімуму швидкісної похибки  $\Delta t_{ше}$ .

Для оптимізації газодинамічної підсистеми необхідно знайти умови, які забезпечували б мінімальну зміну коефіцієнта відновлення  $r$  ТП, тобто

$$\Delta r \rightarrow 0 \quad (2)$$

за наявності втрат і прийнятих обмежень.

Для вироблення вимог до конструкції ТП, що задовольняє умову оптимізації, в [5] коефіцієнт відновлення було наведено у вигляді залежності від коефіцієнтів відновлення камери гальмування  $r_{к.з}$  і чутливого елемента  $r_{че}$  рівнянням

$$r = r_{к.з} - r_{к.з} r_{че} + r_{че} = r_{к.з} \left( 1 - r_{че} + \frac{r_{че}}{r_{к.з}} \right). \quad (3)$$

Із рівняння (3) очевидно, що чим стабільнішими і ближчими до одиниці будуть коефіцієнти відновлення камери гальмування і чутливого елемента, тим стабільнішим буде коефіцієнт відновлення ТП.

Для оптимізації газодинамічної підсистеми необхідно проаналізувати газодинамічні характеристики ТП. Дослідженню таких характеристик присвячено велику кількість робіт і їх виконували за двома напрямками:

- аналітичне визначення рівноважної температури ТП, що омивається газовим потоком;
- експериментальне визначення коефіцієнта відновлення.

Як вказувалося в [5], існують аналітичні вирішення визначення рівноважної температури і коефіцієнта відновлення тільки для плоскої пластини. Для ТП, які мають циліндричну форму, що характеризується інакшим (відривним) обтіканням, задача не має точного аналітичного розв'язання [6]. Тому проводилися експериментальні дослідження з визначення рівноважної температури і коефіцієнтів відновлення ТП різних форм.

Експериментальні дослідження виконували в умовах стаціонарного обтікання ТП, оскільки в умовах нестационарного обтікання коефіцієнт відновлення є змінною величиною, але визначити характер і величину його зміни неможливо через наявність теплової інерції ТП.

За результатами багатьох досліджень [7, 8] і за дослідженнями автора можна зробити такі висновки.

1. Найбільш стабільний і високий коефіцієнт відновлення мають пластинчасті і чутливі елементи еліптичної та круглої форми перерізу при поздовжньому обтіканні потоком. При поперечному обтіканні потоком чутливі елементи круглої форми перерізу мають найменш високий і стабільний коефіцієнт відновлення.

2. За характером зміни коефіцієнта відновлення пластинчастих, еліптичної та круглої форми перерізу чутливих елементів при поздовжньому обтіканні газовим потоком залежно від чисел Рейнольда  $Re$  і Маха  $M$  розрізняють три основні області:

- а) область ламінарного руху, в якій  $r_{че}$  є постійною величиною, що дорівнює 0,84. Її називають першою областю автотельності;
- б) перехідна область, в якій  $r_{че}$  зростає зі зростанням чисел  $Re$  і  $M$ ;
- в) область турбулентного руху (друга область автотельності), в якій  $r_{че}$  залишається постійним і дорівнює 0,9.

3. За характером зміни коефіцієнта відновлення ТП круглої форми перерізу при поперечному обтіканні залежно від чисел  $Re$  і  $M$  розрізняють чотири області:

а) область при малих значеннях чисел  $Re$  і  $M$  ( $Re < 3000$  і  $0,01 \leq M \leq 0,2$ ), в якій  $r_{че}$  є постійною величиною (перша область автотемпературності);

б) область в діапазоні чисел  $Re$  від 3000 до 120000 і  $M$  від 0,7 до 1,0, в якій  $r_{че}$  зростає зі зростанням чисел  $Re$  і  $M$ ;

в) область в діапазоні чисел  $Re$  від 20000 до 20000 і  $M$  від 0,2 до 0,7, в якій  $r_{че}$  є постійною величиною (друга область автотемпературності);

г) область в діапазоні чисел  $Re > 120000$  і  $M > 1$ , в якій  $r_{че}$  зростає зі зростанням чисел  $Re$  і  $M$ .

4. Наявність кондуктивного тепловідведення від чутливого елемента до арматури і вплив випромінювання між чутливим елементом і захисною арматурою може призводити до істотного спотворення коефіцієнта відновлення. Тому при температурах до  $300^\circ \text{C}$ , коли втрати тепла теплопровідністю і випромінюванням є незначними, похибка ТП визначається в основному швидкісною складовою похибки. У цьому випадку знання коефіцієнта відновлення дозволить внести необхідні поправки, пов'язані із систематичною похибкою неповного відновлення температури гальмування.

При температурах, вищих за  $300^\circ \text{C}$ , частка складових похибок від теплопровідності і випромінювання стає співмірною, а іноді і перевершує швидкісну складову похибки. Тому коефіцієнт відновлення перестає бути мірою кінетичної енергії, що переходить в тепловміст. Для цього випадку необхідно проводити динамічне градування ТП температури шляхом порівняння його показів з показами контрольного ТП під час температур і чисел Маха, що є близькими або збігаються з їх значеннями під час використання ТП. Якщо ж ТП сконструйований так, що похибки від кондуктивного тепловідведення і випромінювання між чутливим елементом і захисною арматурою є незначними, то повний коефіцієнт відновлення можна обчислити за формулою (3). Наприклад, при  $r_{че} = 0,86$  і відношенні швидкостей в камері гальмування  $V_{к.г}$  до швидкості набігаючого потоку  $V$  ( $V_{к.г}/V = 1/8$ ), коефіцієнт відновлення  $r$  ТП становить приблизно 0,998.

На основі наведених висновків сформульовано такі основні вимоги до конструкції ТП, виконання яких забезпечить достатню стабільність коефіцієнта відновлення в широкому діапазоні зміни чисел  $Re$  і  $M$ :

а) для пластинчастих чутливих елементів і елементів з еліптичною формою перерізу необхідно забезпечувати поздовжнє обтікання ТП набігаючим потоком;

б) для чутливих елементів з круглою формою перерізу допускається поперечне обтікання потоком;

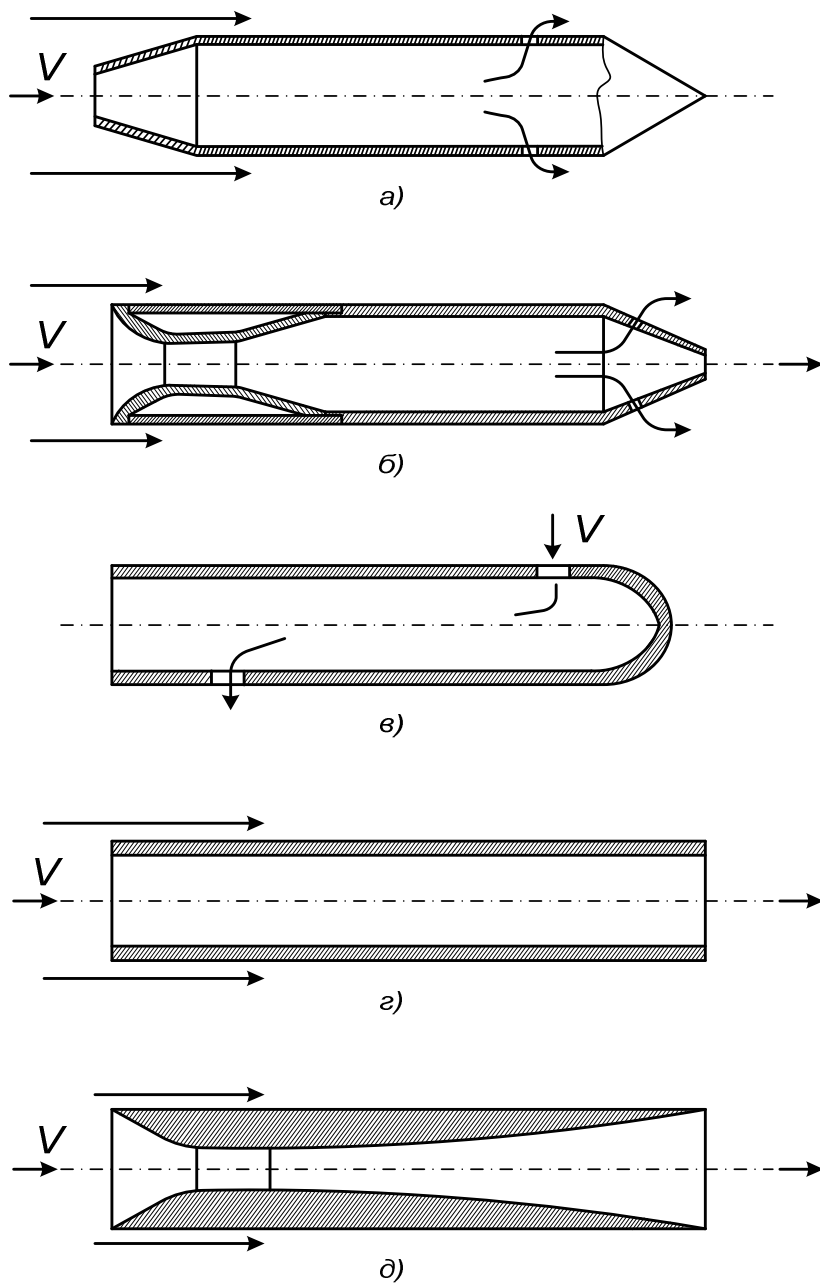
в) необхідно забезпечити незалежність коефіцієнта відновлення від чисел  $Re$  і  $M$ ;

г) необхідно забезпечити захист чутливого елемента від теплової взаємодії з оточуючими елементами.

Для виконання вимог в) і г) чутливі елементи ТП треба встановлювати в аеродинамічні камери: камери гальмування з умовами, що відповідають першій області автотемпературності або камери критичної швидкості з умовами, що відповідають другій області автотемпературності або в проточні циліндричні камери з умовами, що відповідають умовам на вході в камеру. Схеми конструкцій аеродинамічних камер наведені на рисунку.

У практиці вимірювання температур газових потоків прийнято, щоб число  $M$  потоку в камері не перевищувало 0,2, тобто необхідно забезпечити постійне значення коефіцієнта відновлення в першій області автотемпературності.

В експериментальній практиці для штучного гальмування швидкості обтікання чутливого елемента найбільше розповсюдження отримали ТП з камерами гальмування. Такі ТП характеризуються високим і стабільним коефіцієнтом відновлення в широкому діапазоні зміни швидкостей газового потоку. Вже вказувалося, що чим вищим і стабільнішим є коефіцієнт відновлення  $r$ , тим кращою буде якість ТП. ТП є практично придатним для вимірювання температури газових потоків, що рухаються з великою швидкістю, тільки в тому випадку, якщо його коефіцієнт відновлення має постійне значення в широких межах зміни чисел Маха і Рейнольдса.



*Схеми конструкцій аеродинамічних камер: а – камера гальмування з поздовжнім обтіканням і дифузорним входом; б – камера гальмування з поздовжнім обтіканням і конфузорним входом; в – камера з поперечним обтіканням; г – циліндрична камера постійного перерізу; д – камера критичної швидкості*

Найбільше розповсюдження в дослідницькій і експериментальній практиці отримали ТП з циліндричними і кулеподібними камерами гальмування. Такі камери дозволяють здійснювати гальмування потоку в місці, де розміщений чутливий елемент ТП.

### **Висновки**

Результати експериментальних досліджень різних авторів [3, 7, 8] і автора цієї роботи показали, що коефіцієнт відновлення ТП із камерами гальмування має практично постійне і стабільне значення в широких межах зміни чисел Маха і Рейнольдса. Коефіцієнт відновлення ТП з поздовжнім обтіканням газовим потоком в широкому діапазоні швидкості потоку становить 0,97...0,98. Значення коефіцієнта відновлення ТП з камерами гальмування (з круглою формою перерізу чутливого елемента) при поперечному обтіканні газовим потоком завжди є меншим, ніж при поздовжньому обтіканні і становить 0,94...0,95.

Важливою перевагою циліндричної камери гальмування є та обставина, що повний коефіцієнт відновлення ТП в цьому випадку є нечутливим до кута атаки набігаючого потоку до  $\pm 20^\circ$ .

Камери критичної швидкості доцільно застосовувати тоді, коли вхідний процес характеризується високою нестационарністю, оскільки такі камери забезпечують зниження інерційності ТП в 1,5...2 рази порівняно з камерами гальмування.

При великих надзвукових швидкостях набігаючого потоку можна застосовувати як камери критичної швидкості, так і камери гальмування. Камери гальмування повинні мати поздовжнє обтікання потоком і для забезпечення мінімального спотворення потоку вихідні отвори повинні розміщатися як на бокових поверхнях вихідної конфузорної частини камери, так і вздовж осі камери.

1. Vickers P.T. *Proper Probes Keep Thermocouples Reading True* // SAE J. – 1964, Vol.2, – №12. – P. 54–57. 2. Vas I. E. *Flow Field Measurements Using Total Temperature Probe at Hypersonic Speeds* // AIAA. – 1971. – P. 1–12. 3. Гухман А.А., Илюхин Н.В. *Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью*. – М.: Машигиз, 1951. – 226 с. 4. Фединець В.О. *Засади конструкторсько-технологічної оптимізації перетворювачів температури високошвидкісних газових потоків* / Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2007. – №574. – С. 111–115. 5. Фединець В.О. *Математична модель газодинамічної підсистеми перетворювачів температури газових потоків* // Тези доп. XV Міжнар. семін. метрол. “Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях”. – Львів – Ряшів, 2007. – С.21. 6. Moffat R.J. *Gas Temperature Measurement*. – В зб. “Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry”, Vol.III, Part 2. – N.Y.: Reinhold Publ. corp, 1962. 7. Преображенский В.П. *Теплотехнические измерения и приборы*. – М.: Энергия, 1978. – 704 с. 8. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. – М.: Наука, 1973. – 904 с.

УДК 681.121.84

Р.М. Федоришин, Я.В. Грень, Ф.Д. Матіко  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧНИХ ЛІНІЙ ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Федоришин Р.М., Грень Я.В., Матіко Ф.Д., 2009

**Наведена математична модель імпульсних трубок та вимірювальної камери, а також результати моделювання динамічних характеристик імпульсних трубок для витратомірів змінного перепаду тиску.**

**The paper deals with dynamic characteristics of pulse tubes and measuring chamber for pressure differential flow meters. Mathematical model of pulse tubes and measuring chamber as well as results of modeling are given.**

**Постановка проблеми.** Завдяки широкому розповсюдженню витратомірів з пристроями звуження потоку, можливість вимірювання за їх допомогою пульсуючих витрат становить великий практичний інтерес. Але далеко не завжди їхнє застосування для цієї мети дає задовільні результати. Причина полягає у великій кількості джерел похибок, яка в деяких випадках може досягти неприпустимо великих значень [1]. Ознайомлення з цими джерелами допоможе встановити межі і умови застосування звужувальних пристроїв для вимірювання пульсуючих витрат. Основними джерелами додаткових похибок вимірювання витрати газу за допомогою пристроїв звуження потоку за наявності пульсацій параметрів потоку є вплив квадратичної залежності між витратою і перепадом тиску, вплив місцевого прискорення, вплив акустичних явищ, вплив сполучних трубок.