



ФЕДИНЕЦЬ В.О., докт. техн. наук, доцент
Національний університет „Львівська політехніка”

МІНІМІЗАЦІЯ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ ВІД НЕПОВНОТИ ГАЛЬМУВАННЯ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВИХЛОПНИХ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

В статті подано теоретичні основи оцінки неповноти гальмування газового потоку, яка визначається коефіцієнтом відновлення і характеризується швидкісною складовою похибки вимірювання температури потоку. Запропоновано для мінімізації цієї складової похибки для конкретних умов вимірювання.

Theoretical bases of estimation of incompleteness of braking of gas stream, which is determined by the coefficient of renewal and characterized by the speed constituent of error of measuring of temperature of stream are given in the article. It is offered for minimization of this component error for the concrete terms of measuring.

Вступ. Для підвищення одиничної потужності, підвищення коефіцієнта корисної дії двигунів внутрішнього згоряння необхідно підвищувати температуру і тиск газів в їх камерах спалювання. А з підвищенням температури для досягнення потрібної надійності двигунів необхідно проводити дослідження, пов'язані з вимірюванням розподілу температур газів в камерах спалювання. Умови цих вимірювань характеризуються тим, що термоперетворювачі (ТП) піддається інтенсивному впливу високих швидкостей, температур, тисків і швидкостей більше 50 м/с. Для таких випадків необхідно враховувати як впливаючий фактор часткове гальмування газового потоку в зоні розміщення ТП, що викликає додаткове нагрівання його робочої частини. Нагрівання ТП і його температура залежать не тільки від фізичних властивостей і стану руху газового потоку, але також і від його власних властивостей.

Теоретичні основи. При відсутності зовнішньої енергії, що підводиться до газового потоку, зі зміною швидкості змінюється і його температура. І однією із відмінностей газу від нестискуваної рідини є те, що енергія газу пропорційна до його абсолютної температури T , яка дістала назву *статичної, істинної* або *термодинамічної*. В практичних умовах застосовують поняття температури гальмування T_0 - температури, яка встановлюється в газовому потоці при повному адіабатному гальмуванні (швидкість потоку $V=0$), тобто при відсутності відведення тепла ТП і теплообміну між окремими струминами газового потоку, що його омивають. При витіканні газу в значенні повної енергії проходить перерозподілення кінетичної і потенціальної складових. При витіканні без теплової взаємодії із зовнішнім середовищем зменшення швидкості і кінетичної енергії призводить до збільшення температури газу. Збільшення швидкості призводить до зниження температури. Тому під час

досліджень газових потоків вплив швидкості на зміну температури необхідно обов'язково враховувати.

Температура гальмування T_0 є більш доступною для вимірювання, ніж статична T . Вона є одним з основних параметрів, що характеризують повну енергію нерухомого чи рухомого газового потоку. Різниця $T_0 - T$ представляє собою зміну статичної температури або динамічну складову температури гальмування і визначає кінетичну енергію газу.

При обтіканні твердого тіла, введеного в газовий потік, повне гальмування відбувається при умові, що газ набігає на тіло в напрямку, перпендикулярному до його поверхні. При таких умовах гальмування представляє собою процес адиабатного стискування і реально може мати місце в критичній точці - точці розгалуження газу. В окремих точках біля поверхні тіла гальмування газу є неповним і відбувається під дією сил тертя [1,2]. Тоді температура T_n ТП буде меншою від температури гальмування T_0 . Температуру T_n називають *рівноважною* температурою. Фізично це пояснюється тим, що в області, яка безпосередньо примикає до чутливого елемента ТП, в тепло перетворюється не вся кінетична енергія, а тільки деяка її частина. Для оцінки цього процесу вводиться *поняття коефіцієнта гальмування* або *коефіцієнта відновлення* r_n ТП, який характеризує ступінь відновлення ентальпії при гальмуванні потоку на поверхні ТП (ступінь відновлення температурного еквівалента кінетичної енергії газу):

$$r_n = \frac{T_n - T}{T_0 - T} = \frac{T_n - T}{V^2 / 2C_p}, \quad (1)$$

де C_p – теплоємність газового потоку при постійному тиску.

Необхідно враховувати, що коефіцієнт відновлення ТП r_n і його температура T_n в різних точках поверхні твердого тіла будуть різними, оскільки швидкість потоку в пристінному шарі є різною.

Виклад основного матеріалу. Значення коефіцієнта відновлення в загальному

випадку є функцією форми обтікання твердого тіла, характеру витікання (ламінарне чи турбулентне), показника адиабати і критерія Прандтля Pr газового потоку:

$$r_n = f(M, Re, Pr, k) \quad (2)$$

Похибка Δt вимірювання температури потоку, яка виникає із-за неповноти його гальмування, визначається рівнянням через коефіцієнт відновлення і швидкість потоку поблизу його чутливого елемента [3]:

$$\Delta t = T_n - T_0 = -(1 - r_n) \frac{V^2}{2C_p}. \quad (3)$$

Її також називають швидкісною складовою похибки вимірювання температури газового потоку. Розрахунки, виконані за залежністю (3) показують, що, наприклад, для повітря значення Δt складає 1; 2; 5; 20; 500 К відповідно при швидкостях 50; 100; 200 і 1000 м/с, а для перегрітої водяної пари $\Delta t = 0,4$ К при швидкості 50 м/с. Для швидкостей потоку до 50 м/с значення Δt відносно невелике, тому цю швидкість при практичних вимірюваннях температури, як правило, вважають верхньою межею діапазону "помірних" швидкостей.

Аналіз (3) показує, що швидкісна складова похибки залежить від швидкості газового потоку в зоні чутливого елемента і коефіцієнта відновлення ТП, який в свою чергу також залежить від швидкості потоку і конструктивних та геометричних параметрів ТП.

Отже, мінімізація швидкісної складової похибки повинна включати в себе визначення способів і засобів, що забезпечують постійність коефіцієнта відновлення і штучного зменшення швидкості обтікання чутливого елемента в порівнянні зі швидкістю набігаючого потоку.

В експериментальній практиці для штучного зменшення швидкості обтікання чутливого елемента найбільше розповсюдження отримали ТП з камерами гальмування [3]. Повне гальмування потоку в камері гальмування недопустиме.

В ній необхідно зберегти деяку швидкість для забезпечення конвективної тепловіддачі від потоку до чутливого елемента.

Тому під час конструювання ТП необхідно вибрати такі конструктивні розміри камери гальмування і швидкість потоку в ній, щоб забезпечити мінімальну зміну коефіцієнта відновлення r ТП в усьому діапазоні зміни швидкості потоку, тобто $\Delta r \rightarrow 0$. При забезпеченні таких умов швидкісна складова похибки Δt буде мати мінімальне значення для даних умов вимірювання.

Якщо задано допустиме значення Δt швидкісної складової похибки, то із рівняння (3) визначимо допустиму швидкість потоку в камері гальмування:

$$V_{don} = \left(\frac{2C_p \Delta t}{1-r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(4)

Виразивши швидкість в безрозмірному вигляді через критерій Маха M , який визначається як відношення швидкості в будь-якій точці газового потоку до швидкості звуку в тій самій точці, знаходимо:

$$M_{max} = \left(\frac{2 \Delta t}{k-1(1-r)T_0} \right), \quad (5)$$

де k – коефіцієнт адиабати газового потоку. Розрахувавши таким чином допустиму швидкість потоку поблизу чутливого елемента, необхідно порівняти її зі швидкістю набігаючого потоку. Якщо швидкість набігаючого потоку є вищою, то необхідно вибрати ТП з камерою гальмування з вентиляційними отворами відповідних розмірів. Якщо ж швидкість набігаючого потоку є нижчою, то можливі два шляхи:

а) або обмежитися тим значенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі, що

забезпечується існуючою швидкістю набігаючого потоку;

б) або підвищити швидкість потоку поблизу чутливого елемента шляхом відсмоктування його в зовнішню систему.

При використанні камери гальмування з вентиляційними отворами необхідно враховувати відомості, які наведені в [3]. Крім того, необхідно детальніше зупинитися на деяких конструктивних елементах, які можуть вплинути на точність відтворення розрахункових умов вимірювання температури газового потоку в камері гальмування. Наприклад, на рис. 1 зображена схема ТП, коефіцієнт відновлення якого досягає значення, що перевищує одиницю [4].

Цей ефект стався наслідком незвичного взаємного розміщення вхідного отвору, вентиляційних отворів і зливу термопари в камері гальмування. Замість звичної схеми розміщення вентиляційних отворів позаду зливу, в конструкції на рис. 1 вони висунуті вперед відносно місця розміщення зливу. Отриманий в результаті парадоксальний ефект ($r > 1$) можна пояснити таким чином. Повітря, що входить в камеру через передній отвір, утворює невелику струмину 1 (рис.1) з відносно високою початковою швидкістю, яка загальмовується в області 2 розміщення зливу термопари. Потім повітря рухається в зворотньому напрямку через область 3 між межами струмини 1 і стінками камери. В цій області статична температура газового потоку дещо вища, ніж в струмині 1 внаслідок різниці в швидкостях витікання. Внаслідок цього існує деякий потік тепла із області 3 в область 1. При зміні числа M від 1 до 2 в дослідах [4] були отримані значення $r=1,037$.

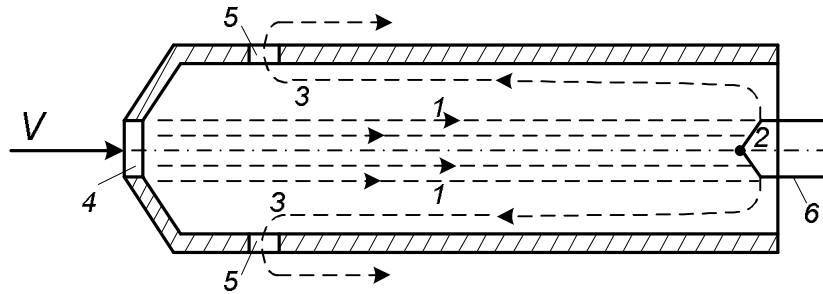


Рис. 1. Схема ТП з коефіцієнтом відновлення $r > 1$: 1 – газова струмина з великою швидкістю і низькою температурою; 2 – область гальмування струмини; 3 – струмина з малою швидкістю і високою температурою; 4 – вхідний отвір; 5 – вентиляційні отвори; 6 – чутливий елемент.

При використанні камери гальмування дифузрного типу [5] (рис.2) можливі спотворення вимірюваної температури за рахунок розміщення ТП під деяким кутом до напрямку потоку. В цьому випадку на одній із сторін внутрішньої стінки дифузрної камери може утворюватися

місцеве відривання потоку і в цій області температура буде відрізнятися від температури набігаючого потоку. Тому при розміщенні в цьому місці чутливого елемента покази ТП будуть спотворюватися.

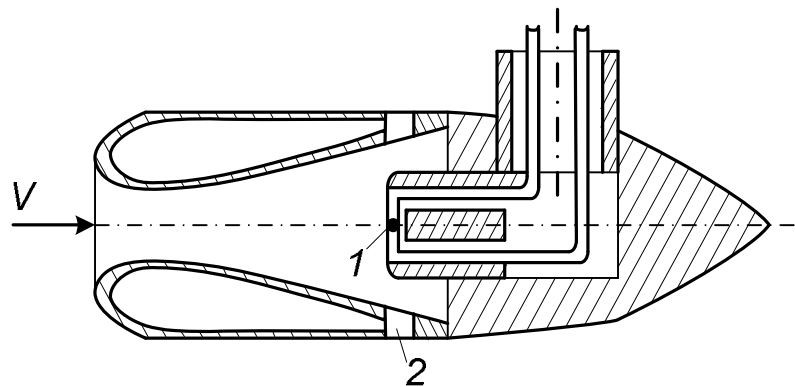


Рис. 2. Схема ТП з камерою гальмування дифузрного типу: 1 – злут термопарі; 2 – вентиляційні отвори.

Відсмоктувачі ТП використовуються відносно рідко із-за складності конструкції, оскільки замість відсмоктування можна застосувати більш прості способи збільшення (при необхідності) коефіцієнта конвективної тепловіддачі. Але в деяких випадках застосування відсмоктувачих пірометрів є неминуче. Прикладом такої конструкції може служити ТП, запропонований в [6]. Особливість конструкції визначається тим, що злут термопарі служать тонкі стінки звукового сопла (рис.3), через яке відсмоктується газовий потік. Це дозволяє відмовитися від застосування термоелектродів термопарі, які, з однієї сторони, повинні бути по можливості

більш тонкими (для зменшення впливу теплопровідності) і, з другої сторони, повинні бути достатньо міцними, щоб витримувати швидкісний напір рухомого газового потоку. Така конструкція в цьому відношенні є досить надійною. Дещо незвичним є і сам принцип вимірювання: в області злуту швидкість потоку завжди дорівнює швидкості звуку, тобто число $M=1$, що забезпечує максимально можливий теплообмін між газовим потоком і злутом. Якщо коефіцієнт відновлення відомий із експериментальних даних, то за виміряним значенням температури можна легко визначити температуру гальмування потоку.

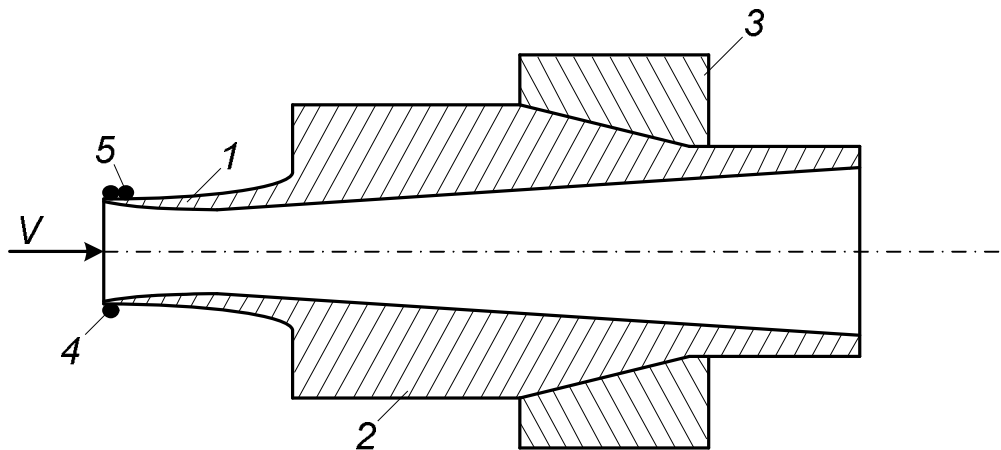


Рис. 3. Схема ТП, в якому з'єднанні термопар служать стінки звукового сопла: 1 – платинова стінка; 2 – стінка зі сплаву платини і 13 % родію; 3 – опора; 4 – платинова дріт діаметром 0,1 мм; 5 – місце зварювання.

Вибравши значення внутрішньої швидкості, необхідно вибрати діаметр термоелектродів враховуючи при цьому, що інші складові похибки вимірювання температури потоку, обумовлені як випроміненням, так і теплообміном через теплопровідність, будуть тим меншими, чим меншим буде діаметр термоелектродів. Але при цьому необхідно забезпечити достатню міцність і довговічність термопар. При заданих значеннях тиску і температури внутрішня швидкість потоку і діаметр термоелектродів визначають значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі α від газового потоку до ТП за яким розраховують складові похибки, обумовлені випроміненням і теплообміном через теплопровідність [7].

Висновки. В статті на основі теоретичного аналізу розроблено заходи для мінімізації складової похибки вимірювання температури від неповноти гальмування газового потоку, які забезпечують постійність коефіцієнта відновлення ТП і необхідну швидкість обтікання чутливого елемента в камері гальмування.

Література

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Герман Шлихтинг; пер. с нем. Г.А.

Вольперта под ред. Л.Г. Лойцянского. - М.: Наука, 1974. - 711 с.

2. Мак-Адамс В. Х. Теплопередача / Вильям Х. Мак-Адамс; пер. с англ. Б.Л. Маркова. - М.: Металлургиздат, 1961. - 686 с.

3. Фединець В.О. Оптимізація газодіагностичної підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація. - 2009. - №659. - С. 68-73.

4. Rietdijk J.A. On a Thermometer with Recovery Factor $r > 1$ / J.A. Rietdijk, A. Valster // Applied Scient. Research. - 1988. - V. 7. - №4. - P. 251 - 255.

5. Werner F.D. Total Temperature Measurements / F.D. Werner // ASME Paper. - 58. - 1988. - V.17. - 12 pp.

6. Donne M.D. Nozzle Thermocouple for Measurement in High-temperature Gases / M.D. Donne, F.R.-A. Bowditch // Internat. J. Heat and Mass Transfer. - 1967. - V.10. - P. 477 - 488.

7. Фединець В.О. Принципи синтезу типових конструкцій термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Методи та прилади контролю якості. - 2010. - №25. - С. 85 - 89.