

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

© Василь Фединець 2013

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

*В статті проведено експериментальні дослідження коефіцієнта відновлення в залежності від конструктивних особливостей термоперетворювача і параметрів газового потоку.*

*В статье проведено экспериментальные исследования коэффициента восстановления в зависимости от конструктивных особенностей термопреобразователя и параметров газового потока.*

*In the article experimental researches of coefficient of renewal are conducted depending on the structural features of receivers of temperature and parameters of gas stream.*

**Вступ.** Під час проведення досліджень процесів тепло-масообміну і в області газової динаміки необхідно вимірювати температуру газового потоку, що рухається зі швидкістю 50 м/с і більше. Для таких випадків необхідно враховувати як впливаючий чинник часткове гальмування потоку в зоні розміщення термоперетворювача (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.

При обтіканні твердого тіла, введеного в швидкісний газовий потік, повне гальмування може відбуватися 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. Для оцінки цього процесу вводиться поняття *коефіцієнта гальмування* або *коефіцієнта відновлення*  $r$  ТП. Коефіцієнт відновлення характеризує ступінь відновлення ентальпії при гальмуванні потоку на поверхні ТП (ступінь відновлення температурного еквівалента кінетичної енергії газу). Складову похибки, що обумовлена перетворенням частини кінетичної енергії рухомого газу в теплову в пристінному шарі, що оточує чутливий елемент, називають швидкісною складовою похибки вимірювання температури газового потоку..

Швидкісна складова похибка  $\Delta t_{\phi a}$  вимірювання температури газового потоку, визначається рівнянням через коефіцієнт відновлення і швидкість потоку поблизу його чутливого елемента [3]. :

$$\Delta t_{\phi a} = (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_0) = (1 - r) \frac{V^2}{2C_p} . \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість газового потоку;  $C_p$  – коефіцієнт теплоємності газового потоку при постійному тиску.

Аналіз (1) показує, що швидкісна складова похибка 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, оптимізація 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].

Значення коефіцієнта відновлення в загальному випадку є функцією критеріїв Маха  $M$ , Рейнольдса  $Re$  і Прандтля  $Pr$  та показника адиабати  $k$  газового потоку [4]:

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

Тому під час конструювання ТП необхідно вибрати такі конструктивні розміри камери гальмування, які забезпечували б мінімальну зміну коефіцієнта відновлення  $r$  ТП в усьому діапазоні зміни чисел  $M$  і  $Re$ , тобто  $\Delta r \rightarrow 0$ . При забезпеченні таких умов швидкісна складова похибки  $\Delta t_{\phi a}$  буде мати мінімальне значення для даних умов вимірювання.

**Мета роботи.** Експериментальне дослідження зміни коефіцієнта відновлення в залежності від конструктивних особливостей ТП і параметрів газового потоку.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідженням на визначення коефіцієнта відновлення і його стабільність піддавалися дві конструкції перетворювачів термоелектричних типу ТІР-0182 і ТІР-0182-01 з поздовжнім обтіканням потоком, які призначені для вимірювання температури продуктів згорання вуглеводневих палив під час випробування виробів на стендах. Для вимірювання розроблено два виконання конструкції з поздовжнім обтіканням потоком [5]. Конструкції відрізняються між собою за виходом газового потоку із камери гальмування. В конструкції ТІР-0182 газ виходить через два бокових отвори в стінках екрана в кінці камери гальмування. В іншій конструкції – через зазори між ізоляційною трубкою і стінкою екрана. На рис. 1 зображено загальний вигляд термоперетворювача типу ТІР-0182.

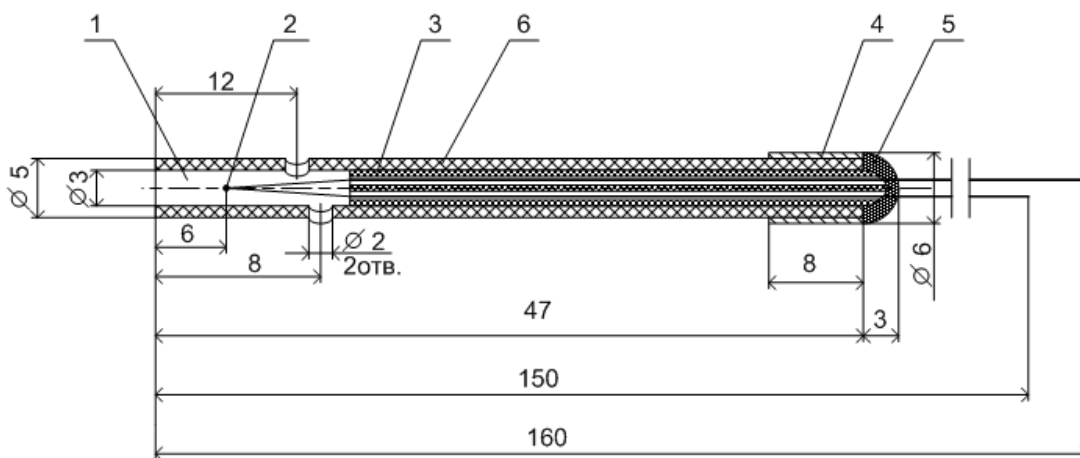


Рис. 1. Загальний вигляд термоперетворювача типу ТІР-0182: 1 – камера гальмування; 2 – з'юст термопар; 3 – електроізоляційна трубка; 4 – металева втулка; 5 – термоцемент Ф50; 6 – захисний корпус.

Експериментальні дослідження проводились в аеродинамічній трубці з відкритою робочою частиною з дозвуковим соплом, що забезпечувало значення числа  $M$  в діапазоні від 0,1 до 0,6 в потоці повітря з температурою навколишнього середовища від 15 до 25 °С. Проведення досліджень при такій температурі дозволяє отримувати результати практично вільні від похибок, обумовлених тепловідведенням через теплопровідність і випромінювання. Необхідно також враховувати, що під час досліджень в надзвуковому потоці газу обов'язково треба здійснювати попереднє нагрівання газу для виключення його конденсації на виході із сопла. Для цього випадку треба також передбачати всі заходи для зменшення теплових втрат.

Схема вимірювальної установки для визначення коефіцієнта відновлення зображена на рис. 2.

Коефіцієнт відновлення визначався за відомою залежністю [3]:

$$r = \frac{T_i - \dot{\Theta}}{\dot{\Theta}_0 - \dot{\Theta}} = \frac{\dot{\Theta}_i - \dot{\Theta}}{V^2 / 2C_p} \quad (3)$$

Точність визначення коефіцієнта відновлення залежить від правильності вимірювання температури гальмування  $T_0$  і статичної температури  $T$ .

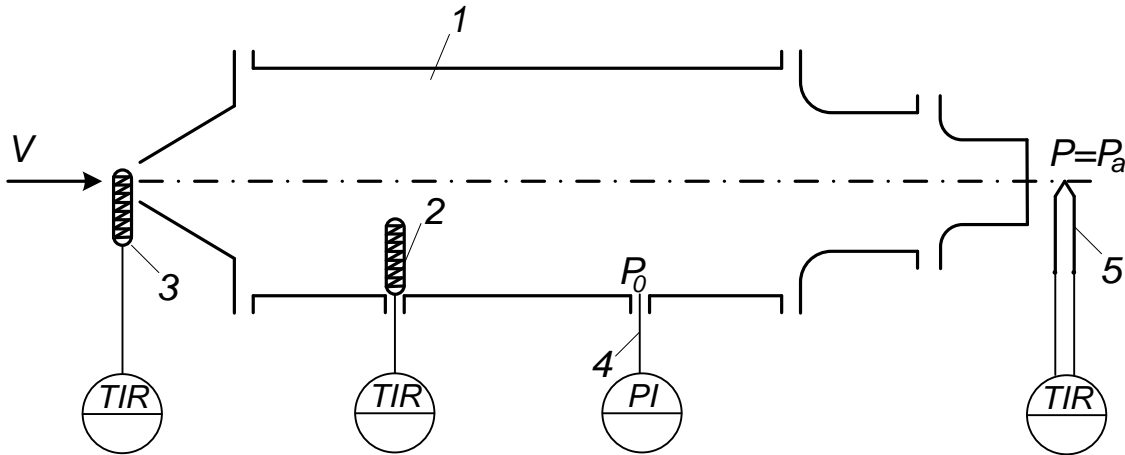


Рис. 2. Схема вимірювальної установки для визначення коефіцієнта відновлення ТП: 1 – аеродинамічна труба з відкритою робочою частиною; 2,3 – платинові термометроробочі опори; 4 – манометр для вимірювання повного тиску; 5 – досліджуваний ТП.

Попередньо проградуєований досліджуваний ТП встановлювався по осі сопла на віддалі 40...50 мм від його зрізу. Для таких умов статичний тиск практично відповідає атмосферному, що полегшує визначення швидкості потоку в місці розміщення ТП. Температура гальмування вимірювалася в форкамері, де потік практично повністю загальмовується. Вимірювання здійснювалися за допомогою попередньо проградуєованого платинового ТП опору 2. Похибка вимірювання температури гальмування не перевищувала  $\pm 0,1$  К. Вимірювання статичної температури здійснювалися також попередньо проградуєованим платиновим ТП опору і похибка вимірювання не перевищувала  $\pm 0,1$  К.

Швидкість газового потоку визначалася за статичним тиском в місці встановлення ТП і повним тиском в форкамері, який визначався манометром повного тиску 4, встановленим на стінці форкамери.

Число  $M$  визначалося за таблицями через відношення статичного і повного тиску  $\frac{P}{P_0}$ .

Дослідження коефіцієнта відновлення проводились в потоці повітря зі швидкістю від 0,1 до 0,6  $M$  і числами  $Re$ , віднесеними до діаметра ТП, від  $1,05 \cdot 10^5$  до  $6,3 \cdot 10^5$ .

Результатами експериментальних досліджень (рис. 3) встановлено, що в діапазоні чисел  $M$  від 0,1 до 0,6 (діапазон зміни для ТП типу ТІР-0182) коефіцієнт відновлення змінюється в невеликих межах і практично не залежить від відношення площ вхідних  $F_{вх}$  і вихідних  $nf$  отворів,

через які газовий потік поступає в камеру гальмування і витікає з неї. Для ТІР-0182  $\frac{nf}{F_{вх}} = 0,125$ , а

для ТІР-0182-01  $\frac{nf}{F_{вх}} = 0,135$ .

Встановлено також, що для поздовжнього обтікання газовим потоком коефіцієнт відновлення практично не залежить від чисел  $M$  і  $Re$  для оптимальних значень  $\frac{nf}{F_{ex}}$  від 0,25 до 0,125.

Як вказувалося вище, дослідження проводились при кімнатній температурі газового потоку і практично при відсутності теплових втрат. Тому проводилися також дослідження впливу температури потоку на зміну коефіцієнта відновлення ТП. Дослідження проводились в температурному діапазоні від 300 до 600 °С. Результати досліджень показано на рис. 4. Встановлено, що за рахунок різниці температур газового потоку і стінки камери зростають теплові втрати чутливого елемента ТП і коефіцієнт відновлення дещо зменшується. Так, при  $M=0,4$  в потоці газу з температурою навколишнього середовища коефіцієнт відновлення для ТП типу ТІР-0182 становить 0,975 згідно рис. 3, то при температурі потоку 600 °С він зменшується до 0,96.

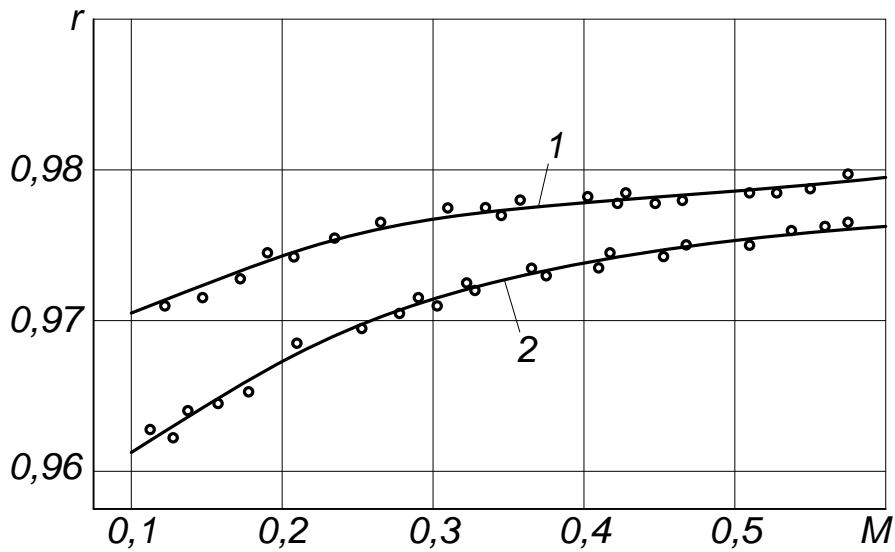


Рис. 3. Експериментальна залежність коефіцієнта відновлення від числа  $M$ : 1 – для ТІР-0182-01; 2 – для ТІР-0182.

Таким чином, результатами досліджень встановлено, що конструкція ТП забезпечує постійність значень коефіцієнта відновлення в діапазоні заданих чисел  $M$  і відповідно постійність швидкісної складової похибки.

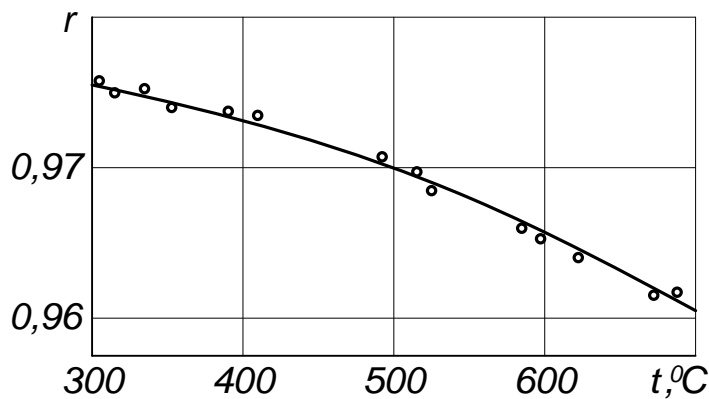


Рис. 4. Експериментальна залежність зміни коефіцієнта відновлення для ТІР-0182 від температури газового потоку.

**Висновки.** Експериментально досліджено зміни коефіцієнта відновлення в залежності від конструктивних особливостей ТП і параметрів газового потоку. Встановлено, що коефіцієнт відновлення змінюється в невеликих межах і практично не залежить від відношення площ вхідних  $F_{ex}$  і вихідних  $pf$  отворів, через які газовий потік поступає в камеру гальмування і витікає з неї. Це означає, що при правильній експлуатації ТП забезпечується постійність швидкісної складової похибки, тому немає необхідності перевіряти її в процесі експлуатації, а визначати тільки під час розроблення конструкції в умовах розробника і періодичних випробувань в умовах заводу-виготовлювача.

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 газодинамічної підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків / Василь Фединець // Вісник НУ "Львівська політехніка "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація" 2009. - №659. –С. 68-73.

4. Жукаускас А.А. Теплообмен в высокотемпературном потоке газа / Альгирдас Альфонсович Жукаускас. - Вильнюс: Минтис, 1972. - 231 с.

5. Фединець В.О. Розрахунок температури газового потоку за показами термопар / В.О. Фединець // Методи та прилади контролю якості. – 2006. - №16. – С. 61 – 64.