

граничної похибки $\delta_{\mathcal{Q}}^{\mathcal{P}}$ визначення витрати Q для капіляра з тими ж розмірами прохідного каналу і за тих умов роботи як і для вищенаведених прикладів.

Табл. 3. Коефіцієнти і значення складових граничної похибки визначення витрати Q

	μ	T	l	d	ξ	P_n	P_w
$\delta, \%$	1	0,03	0,02	1,0	9	0,16	0,2
K	-0,77	0,11	-0,77	3,54	-0,11	1,16	-0,39
$ K \delta, \%$	0,77	0,003	0,015	3,54	1,03	0,19	0,08

Визначена таким способом гранична похибка витрати газу, дозованого капіляром, становить $\delta_{\mathcal{Q}}^{\mathcal{P}}=5,6 \%$, а середньоквадратична похибка (величини, які входять в залежність (1) є не корельованими) не перевищує 4 %.

З аналізу табл. 3 випливає, що найбільшу частку в похибку визначення витрати вносять похибки визначення діаметра, в'язкості і коефіцієнта кінцевих ефектів. Аналіз також показує, що похибки цих параметрів можна зменшити, наприклад, якщо використовувати точніші дані [5] в'язкості газів. Це забезпечує одночасно зменшення похибки визначення діаметра [3], а також похибки визначення коефіцієнта ξ і в кінцевому результаті – похибку визначення витрати.

Висновки. Отримано залежності для визначення коефіцієнта кінцевих ефектів витратної характеристики на основі експериментального дослідження параметрів потоку газу в прохідному каналі капіляра. Показано, що вищу точність визначення коефіцієнта забезпечує залежність, з якої виключений діаметр прохідного каналу капіляра. Виконано оцінювання граничної похибки визначення коефіцієнта. Оцінено вплив похибки визначення коефіцієнта на похибку визначення дозованої капіляром витрати газу.

Література

1. Теплюх З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей / З.М. Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Автоматика, вимірювання та керування. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2006. – № 551. – С. 87-94.
2. Голубев И.Ф. Вязкость газовых смесей / И.Ф. Голубев, И.Е. Гнездилов. – М. : Изд-во Госкомстандартов, 1971. – 327 с.
3. Ділай І.В. Газодинамічний метод визначення діаметра капіляра / І.В. Ділай, З.М. Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2010. – № 677. – С. 128-134.
4. Обозовський С.С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки. (Загальні питання і теорія похибок) / С.С. Обозовський. – К. : НМК ВО, 1991. – 222 с.
5. Schley P. Viscosity Measurements and Predictions for Natural Gas International journal of Thermophysics / P. Schley, M. Jaeschke, C. Küchenmeister and E. Vogel. – 2008. – Vol. 25, No. 6, November 2004. – Pp. 1623-1652.

Ділай І.В. Исследование коэффициента концевых эффектов расходной характеристики капилляра

Получены зависимости для определения коэффициента конечных эффектов расходной характеристики на основании экспериментального исследования параметров потока газа в проходном канале капилляра. Проанализированы погрешности составляющих зависимостей для определения коэффициента конечных эффектов и получены коэффициенты влияния этих составляющих. Оценена граничная погрешность опреде-

ления коэффициента конечных эффектов. Установлено, что высшую точность обеспечивает зависимость, в которую не входит диаметр проходного канала капилляра. Оценено влияние погрешности определения коэффициента на погрешность определения дозированного капилляром расхода газа.

Ключевые слова: капилляр, коэффициент концевых эффектов, расход газа.

Dilay I.V. The coefficient of end effects of capillary flow characteristics investigation

The dependences for coefficient of end effects of capillary flow characteristics determination based on parameters gas flow experimental research in throttle pass channel are obtained. The constituent dependences errors for coefficient of end effects determination are analyzed and coefficients of constituents influence are obtained. The valuation of limiting error for coefficient of end effects determination is fulfilled. Determined, that higher accuracy ensures dependence, which not include throttle pass channel diameter. The coefficient error influence on error of gas flow dosed by capillary determination is evaluated.

Keywords: the capillary, coefficient of end effects, gas flow.

УДК 658.1+536.5

Доц. В.О. Фединець, д-р техн. наук;
студ. О.В. Фединець – НУ "Львівська політехніка"

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ

Проведено аналіз традиційних та нових методів вимірювання температури газових потоків. Наведено їх переваги і недоліки та можливість застосування залежно від технологічних особливостей об'єкта дослідження. Техніко-економічне порівняння методів вимірювання дало змогу вибрати оптимальний метод як за технічними, так і за економічними показниками.

Ключові слова: температура, газовий потік, дослідження, термометрворювач, техніко-економічне порівняння.

Вступ. Точність вимірювання температури газових потоків залежить від вибраного методу вимірювання, від метрологічних характеристик засобів вимірювання, від умов і місця вимірювання, способу встановлення первинного термометрворювача (ТП) та багатьох інших факторів. Вибір методу вимірювання для цього конкретного об'єкта й умов його експлуатації становить складну проблему, оскільки необхідно знайти оптимальний розв'язок, враховуючи велику кількість чинників, які часто можуть бути суперечливими.

Ми провели аналіз методів вимірювання температури газових потоків та їх техніко-економічне порівняння з метою використання для неперервного вимірювання температури газових потоків.

Аналіз методів вимірювання. Сьогодні найбільше поширення отримали електричні контактні методи вимірювання температури газових потоків за допомогою термометрворювачів опору і термоелектричних перетворювачів [1]. У вітчизняній і зарубіжній літературі в останні роки з'явилися роботи, в яких досліджено і розроблено нові методи вимірювання температури газових потоків.

Розроблено акустичні ТП, принцип дії яких побудовано на вимірюванні швидкості поширення акустичних хвиль у газі. Швидкість звуку в газовому потоці залежить від його стискуваності і при відомому хімічному складі є пропор-

ційною кореню квадратному з абсолютної температури. Ультразвукові ТП є перспективними в високотемпературній термометрії і успішно починають розроблятися як в Україні, так і за кордоном [2, 3].

Метод дає усереднене значення температури, що може бути неприйнятним за наявності істотних перепадів температури в досліджуваному об'єкті. Спроби використання методу для вимірювання температури полум'я показали, що внаслідок досить великих перепадів густини досліджуваного потоку значно втрачається потужність акустичного сигналу. В [4] описана різновидність акустичного методу, згідно з яким розподіл температури в площині вимірювання видається двомірним рядом Фур'є. Час, за який акустичний імпульс пересікає цю площину вимірювання, може бути представлений лінійною функцією коефіцієнтів Фур'є і координат точок розміщення передавача і приймача акустичного імпульсу. При цьому можна скласти систему лінійних рівнянь і розрахувати відповідні коефіцієнти Фур'є, що відображають проведені вимірювання і відповідні їм траєкторії акустичного сигналу. Показано, що цим способом можна досить точно визначити усереднену в просторі температуру, а температури в різних точках площини вимірювання (розподіл температур) можуть бути визначені як середні значення на невеликих зонах у межах площини вимірювання. Точність і просторова роздільна здатність залежить від числа проведених вимірювань і від дисперсії розподілу температури.

Під час практичної реалізації акустичного методу виникають похибки, пов'язані із зміною хімічного складу потоку, густини, питомої теплоємності тощо. Крім цього, виникають і специфічні джерела похибок – згин траєкторії сигналу, похибка вимірювань інтервалів часу, наявність імпульсів, що рухаються з різною швидкістю. Похибка за рахунок згину траєкторії сигналу є систематичною і може бути врахована розрахунковим шляхом. Крім цього, під час використання методу необхідно, щоб був доступ до точок, що лежать на периметрі зони вимірювання.

Але такі переваги методу як ширший вибір матеріалів для чутливих елементів, включаючи керамічні композиції, можливість безпосереднього контакту з вимірюваним потоком, інваріантність до градієнта температур вздовж підвідних ліній, роблять обґрунтованими дослідження акустичних термоперетворювачів з метою використання для вимірювання температури газових потоків газотурбінних двигунів у широкому діапазоні зміни швидкостей і тисків.

Для вимірювання температури плазми запропоновано магніто-гідродинамічний метод (МГД – метод) [5]. Суть методу полягає в тому, що під час пропускання іонізованого газу через зовнішнє магнітне поле виникає електрорушійна сила (ЕРС) \vec{E} , значення і напрямок якої визначаються векторним добутком швидкості газового потоку V і магнітної індукції B :

$$\vec{E} = [\vec{V} \cdot \vec{B}]. \quad (1)$$

Залежність (1) показує, що під час руху газового потоку перпендикулярно до напрямку індукції зовнішнього магнітного поля ($\vec{V} \perp \vec{B}$) ЕРС, що виникає, напрямлена перпендикулярно як до \vec{V} , так і до \vec{B} . Отже, можна утворити елек-

тричне коло з допомогою пари електродів, поверхні яких повинні бути паралельними до напрямку руху потоку і ліній магнітного поля. Наведена ЕРС визначається рівнянням:

$$E = V \cdot B \cdot d, \quad (2)$$

де d – відстань між електродами. Внаслідок взаємодії зовнішнього магнітного і наведеного електричного полів значно зростає опір плазми R між електродами, який визначається залежністю

$$R = \frac{d}{A \cdot \sigma}, \quad (3)$$

де: A – площа поверхні електродів, m^2 ($A > d^2$); σ – питома провідність плазми в схрещених електричному і магнітних полях, См/м. Опір плазми R є функцією температури плазми $R=f(T)$ і, вимірюючи його при певному постійному тиску, можна визначити температуру газового потоку. У періодичній літературі розглядаються питання щодо використання оптичних вимірювань для температурного контролю газових потоків. Будучи безконтактними, вони мають ту перевагу, що не втручаються в межі зони вимірювання.

Відома розроблення способу вимірювання температури газових потоків з допомогою лазерних променів, які забезпечують високу роздільну здатність як у часі, так і в просторі (голографічний спосіб, спосіб комбінаційного розсіювання) [6]. Інтенсивність комбінаційного розсіювання дуже мала і тому необхідна висока потужність джерела лазерного випромінювання. Більш потужні сигнали дає когерентне антистоксівське комбінаційне розсіювання. Цей метод потребує скерування в об'єм газового потоку променів двох лазерів. При цьому відбувається раманівське зміщення частот. Потік комбінаційного розсіювання виділяється ультравузькосмуговими фільтрами. Система потребує ретельного налагоджування, яке дуже легко може порушуватися внаслідок виникнення турбулентності в газовому потоці, а також за наявності в ньому градієнта густини. Описані методи використовуються переважно в лабораторних умовах. Спроби використати ці прилади в промислових умовах успіху не мали.

Відомі методи пов'язані з вимірюванням густини газового потоку. Оскільки густина одноатомних газів обернено пропорційна абсолютній температурі, а для багатоатомних газів таку залежність спостерігаємо до точки дисоціації, то за змінами густини можна опосередковано визначити температуру потоку. Для вимірювання густини газів запропоновано методи поглинання рентгєнівського випромінювання, електронних потоків і α -частинок. Описана лазерна система [7], в якій промінь лазера розщеплений і "розтягнутий" з утворенням системи смуг, відстанню до кількох метрів. Зміна густини в цій зоні призводить до рефракції і спотворення смуг, за якими можна визначити температуру. Метод використовували тільки в лабораторних умовах. Для створення фокусованих смугових систем можна використати оптоволоконну техніку, але при цьому необхідно вводити оптику безпосередньо в досліджуваний газовий потік, що може негативно позначитися на його витіканні.

Необхідно звернути увагу на ємнісні та індуктивні методи вимірювання [8]. Принцип дії ємнісних термоперетворювачів побудовано на залежності влас-

тивостей діелектрика, що розділює обкладки конденсатора (газового потоку), від температури. Вимірювання температури з допомогою індуктивних термоперетворювачів засновано на залежності магнітних властивостей від температури.

Відомі також методи вимірювання, засновані на поглинанні газовим потоком пучка δ -частинок, використанні електронно-променевих флуоресцентних зондів, термошумовий метод та інші [9].

Техніко-економічне порівняння методів вимірювання. Під час техніко-економічного порівняння зіставлялися тільки допустимі за технічними вимогами варіанти, тобто такі, в яких споживач отримує продукт заданої якості при заданих основних технічних характеристиках і показниках надійності [10]. Основними чинниками, які враховували під час техніко-економічного порівняння методів вимірювання температури газових потоків, є: неперервність вимірювання, допустима похибка вимірювання температури вибраним способом; термічна інерція ТП; хімічний склад і швидкість газового потоку, температуру якого необхідно вимірювати; ступінь взаємодії газового потоку і матеріалів конструкції, зануреного в нього ТП; взаємодія матеріалів самого ТП; його надійність.

Важливою вимогою, яку треба враховувати, є наявність необхідних конструкційних матеріалів, технологічного обладнання та висока технологічність під час їх серійного виробництва на приладобудівному підприємстві, зручність при монтажі на технологічному обладнанні, простота в експлуатації і профілактиці, а також висока метрологічна надійність.

На приладобудівних підприємствах уже є відпрацьована технологія виготовлення ТП на основі термоперетворювачів опору і термоелектричних перетворювачів, є в наявності необхідні конструкційні матеріали та кадровий потенціал. Ці чинники дають змогу забезпечити певний рівень рентабельності підприємства. Застосування ж нових методів вимірювання для розроблення ТП пов'язане із необхідністю проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, що пов'язано із необхідністю залучення додаткового фінансування. Крім цього, необхідно розробляти нові технології їх виготовлення, на початкових етапах такі ТП будуть виготовлятися в одиничних екземплярах, що значно підвищить їх собівартість, для них також необхідно розробляти метрологічне забезпечення.

Термоперетворювачі повинні витримувати також і термоциклічні режими роботи за умови збереження необхідної стабільності метрологічних характеристик і механічної міцності за задану кількість циклів нагрівання і охолодження, що є дуже важливим для змінних і особливо для короткотривалих теплових процесів. Аналіз нових методів вимірювання показує, що тільки деякі з них можуть забезпечити такі вимірювання з необхідною точністю.

Висновки. Результати техніко-економічного порівняння показують, що сьогодні для вимірювання температури газових потоків доцільно застосовувати ТП на основі термоперетворювачів опору і термоелектричних перетворювачів, які мають такі переваги: конструктивну простоту; дешевизну (порівняно з іншими методами); високу надійність; можливість значного підвищення локальної роздільної здатності при зменшенні діаметра ТП; можливість локального

вимірювання температури. Крім цього, вони в принципі дають змогу проводити неперервні вимірювання, що важливо під час використання ТП у системах автоматичного вимірювання, контролю та регулювання. Нові методи вимірювання ще не отримали достатньо широкого розповсюдження через високу вартість обладнання і складність вимірювань під час практичної реалізації. Більшість із цих методів перебувають тільки на стадії науково-дослідних розробок і тільки після більш глибоких досліджень можуть бути використані для вимірювання температури газових потоків.

Література

1. Луцки Я.Т. Вимірювання температури: теорія та практика / Я.Т. Луцки, О.П. Гук, О.І. Лях, Б.І. Стадник. – Львів : Вид-во "Бескид Біт", 2006. – 560 с.
2. Луцки Я.Т. Ультразвук в контрольно-измерительной технике и приборах / Я.Т. Луцки // Датчики и методы повышения их точности. – К. : Вид-во "Вища шк.", 1989. – С. 165-215.
3. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения / Алексей Евгеньевич Колесников. – М. : Изд-во "Стандартов", 1982. – 248 с.
4. Green, S.F. Acoustic temperature and velocity measurement in combustion gases / S.F. Green // 8th International Heat Transfer Conference. – San Francisco, 1986. – Pp. 17-22.
5. Луцки Я.Т. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцки, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2003. – 428 с.
6. Dils R. High temperature optical fibre pyrometry / R. Dils // Journal of Applied Physics. – 1983. – Vol. 54. – Pp. 1198.
7. Green S.F. Temperatures in flames and gases / S.F. Green // Meas. & Contr. – 1997. – Vol. 20, № 6. – Pp. 19-22.
8. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин : пер. с нем. / Р. Тиль, И.П. Кузнецина. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
9. Venkatramani N. Simplified of high-stream temperature using dynamic thermocouples / N. Venkatramani, P. Satyamurthy, N.S. Dixit // Inter. J. of Heat and Mass Transfer. – 1983. – Vol. 26, № 5. – Pp. 663-669.
10. Гейк П. Вчись аналізувати ринок : пер. з англ. / П. Гейк, П. Джексон. – Львів : Вид-во "Сейбр-Світло", 1995. – 270 с.

Фединец В.А., Фединец А.В. Техніко-економічне порівняння методів вимірювання температури газових потоків

Проведен аналіз традиційних і нових методів вимірювання температури газових потоків. Приведені їх переваги і недоліки і можливість використання в залежності від технологічних особливостей об'єкта дослідження. Техніко-економічне порівняння методів вимірювання дозволило вибрати оптимальний метод як по технічній, так і по економічній показателям.

Ключові слова: температура, газовий потік, дослідження, термоперетворювач, техніко-економічне порівняння.

Fedynets V.O., Fedynets O.V. The technical and economic comparison of methods of measuring of temperature of gas streams

The analysis of traditional and new methods of measuring of temperature of gas streams is conducted. Their advantages, disadvantages and possibility of application are brought depending on the technological features of research object. The technical and economic comparison of measuring methods enabled to choose an optimal method both on technical and economic indexes. The analysis of methods of measuring of temperature of gas streams is conducted and their technical and economic comparison with the purpose of the use for the continuous measuring.

Keywords: temperature, gas stream, materials, researches, receivers of temperature, technical and economic comparison.