

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

ФЕДИНЕЦЬ ВАСИЛЬ ОЛЕКСІЙОВИЧ



УДК 536.532

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

ГАЗОВИХ ПОТОКІВ КОНТАКТНИМИ МЕТОДАМИ

05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Львів – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор
Пістун Євген Павлович,
завідувач кафедри «Автоматизація теплових та
хімічних процесів» Національного університету
«Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Назаренко Леонід Андрійович,
завідувач кафедри «Світлотехніка та джерела світла»
Харківської національної академії міського
господарства

доктор технічних наук, професор
Жуков Леонід Федорович,
завідувач відділу Фізико-технологічного інституту
металів і сплавів НАН України (м. Київ)

- доктор технічних наук, професор
Скоропад Пилип Ізидорович,
професор кафедри «Інформаційно-вимірювальні
технології» Національного університету «Львівська
політехніка»

Захист відбудеться 30 листопада 2012 р. о 14 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті «Львівська
політехніка» (79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету
«Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1)

Автореферат розісланий ”__” _____ 2012 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д. т. н., проф.*



Я.Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Температура газових потоків є важливим параметром технологічного процесу, визначає кількісні і якісні показники вихідного продукту, наявність браку, стан технологічного обладнання, а також безпеку функціонування процесу. Тому вимірювання її необхідно проводити неперервно, з високою точністю, невеликою інерційністю і високою надійністю, оскільки інформативний сигнал про значення температури використовується в інформаційно-вимірювальних системах та автоматичних системах контролю і регулювання.

Специфіка умов вимірювання температури газових потоків визначається різноманітністю технологічних об'єктів, що використовуються в промисловому виробництві, фізико-хімічними властивостями та швидкістю потоку, діапазоном вимірюваних температур, вимогами до точності та надійності результатів вимірювання, характером перебігу та імовірними збуреннями технологічного процесу.

Надзвичайно важлива роль температур, як параметра газового потоку під час досліджень газових машин і їх елементів – компресорів і турбін. Знання температури необхідне для розрахунку елементів конструкцій газових машин. В цьому випадку зростають вимоги і до геометричних розмірів термоперетворювачів, оскільки встановлені в потік термоперетворювачі великих розмірів спотворюють процес витікання і змінюють обтікання досліджуваних елементів газових машин.

У таких термоперетворювачах зацікавлені газотранспортні підприємства, оскільки під час транспортування трубопроводами газоподібні енергоносії піддаються багатофакторним впливам температури, що призводить до зміни їх густини. Додаткові похибки вимірювання витрати, що виникають при цьому, можуть досягнути великих значень. І одним із шляхів зменшення цих похибок є оснащення витратомірів і вимірювачів кількості термоперетворювачами, що коректують їх покази на зміну температури.

Під час проведення досліджень процесів тепломасообміну, в області газової динаміки, а також пов'язаних із створенням літальних апаратів для дослідження навколоземного і космічного простору необхідно вимірювати температуру газового потоку, що рухається зі швидкістю 50 м/с і більше. Для таких випадків необхідно враховувати як впливаючий фактор часткове гальмування потоку в зоні розміщення термоперетворювача, що викликає додаткове нагрівання його робочої частини. Нагрівання термоперетворювача і його температура залежать не тільки від фізичних властивостей стану руху газового потоку, але також і від його власних властивостей. Проведення таких наукових досліджень потребує постановки достатньо складних і дорогих експериментів.

Тому необхідність та важливість температурних вимірювань газових потоків у справі подальшого прогресу наукових досліджень і розвитку провідних сучасних

галузей народного господарства України зокрема, таких як аерокосмічна техніка, металургійна і хімічна промисловість - цілком очевидні і сумніву не підлягають.

Оскільки похибки вимірювання вторинної апаратури, яка застосовується на сьогоднішній день в електротермометрії, є суттєво нижчими за похибки вимірювання самих термоперетворювачів, то особливої актуальності набуває необхідність створення саме первинних термоперетворювачів з покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Як показують результати проведеного автором аналізу, до теперішнього часу відсутній достатній науковий доробок теоретичних, технологічних та метрологічних основ проектування таких термоперетворювачів. Незважаючи на певні успіхи в розробленні теоретичних основ умов теплообміну в газових потоках, загальна теорія для створення оптимальних конструкцій, які забезпечували б мінімальну похибку при дії на них змінних в часі вхідних факторів і збурень, які, як правило, є випадковими функціями часу, відсутня. Деякі питання конструювання термоперетворювачів для різних умов застосування є проробленими, але такі проблеми як розроблення їх математичної моделі, аналіз, прогнозування і розрахунок складових похибок вимірювання, критерії вибору конструкційних матеріалів для високотемпературних термоперетворювачів та деякі інші розроблені недостатньо.

Велике розмаїття об'єктів досліджень виключає можливість створення єдиного універсального термоперетворювача, а засоби вимірювання, що серійно випускаються, не завжди можуть повністю задовольнити вимоги, які висувуються до таких вимірювань. Тому завдання створення термоперетворювачів, що забезпечували б високу точність вимірювання і в результаті підвищували ефективність експерименту є достатньо актуальним.

Пріоритетним напрямком у вирішенні цієї проблеми є створення оптимальних конструкцій високоточних і надійних термоперетворювачів з використанням термометричних та конструкційних матеріалів із спеціальними властивостями, високою стабільністю їх електрохімічних, хімічних та механічних властивостей в широкому діапазоні зміни температур.

На цій основі сформульовано важливу науково-прикладну проблему в галузі електротермометрії – розроблення концептуальних засад і науково-обґрунтованих методів створення комплексу первинних термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків з підвищеною точністю та надійністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основою дисертаційної роботи є теоретичні і експериментальні дослідження виконані автором на кафедрі “Автоматизація теплових та хімічних процесів” у рамках наукового напрямку “Вдосконалення і розробка елементів і підсистем збору та первинної обробки інформації в АСУ ТП”.

Дослідження за темою дисертації виконувались згідно з планом науково-дослідних робіт Національного університету «Львівська політехніка» в рамках

держбюджетної науково-дослідної роботи „Моделювання та мінімізація дисбалансів і втрат природного газу в газотранспортних системах, зумовлених похибками обліку” (держбюджетний реєстраційний номер 0110U001106), де автор брав участь як виконавець.

Крім цього автор брав участь у виконанні госпдоговірних тем у НВО “Термоприлад”, зокрема: “Дослідження по створенню високотемпературних термоперетворювачів з економним вмістом дорогоцінних металів і підвищеною стабільністю показів” (договір № 170/202); “Перетворювач термоелектричний системи вимірювання температури продуктів згоряння вуглеводневих палив” (договір №1640), в яких автором досліджено взаємозв’язки властивостей термоелектродних і конструктивних матеріалів з метрологічними характеристиками термоперетворювачів, а також розроблено конструкції термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є розвиток теорії та практики створення оптимальних конструкцій термоперетворювачів, призначених для вимірювання температури газових потоків в широкому діапазоні зміни температур і умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- 1) проаналізувати науково-технічні, технологічні, методологічні і практичні проблеми, пов’язані з вимірюванням температур газових потоків;
- 2) на основі аналізу проблем створити загальну концепцію побудови математичних моделей термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків;
- 3) розробити математичну модель термоперетворювача з урахуванням параметрів газового потоку, умов теплообміну і його конструктивних особливостей;
- 4) розробити методологію та алгоритм конструкторсько-технологічної оптимізації термоперетворювача, що забезпечує досягнення його метрологічних характеристик з урахуванням особливостей умов експлуатації вже на стадії проектування;
- 5) виконати теоретичний аналіз та експериментальну перевірку методик дослідження метрологічних характеристик, розробити і створити комплекс технічних засобів для перевірки метрологічних характеристик та градуювання термоперетворювачів;
- 6) провести експериментальне дослідження конструкційних матеріалів з метою їх застосування в термоперетворювачах;
- 7) дослідити ефективність застосування розробленої методології та алгоритму конструкторсько-технологічної оптимізації шляхом проведення експериментальних досліджень синтезованих базових конструкцій термоперетворювачів і на практиці підтвердити досягнення поставленої мети.

Об'єкт дослідження – термоперетворювачі для вимірювання температури газових потоків.

Предмет дослідження – математичні моделі, методологія і алгоритми конструкторсько-технологічної оптимізації, розроблення яких необхідне для створення термоперетворювачів з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками, які функціонують в різних умовах експлуатації.

Методи дослідження. Методологічну основу наукових досліджень становить комплексне поєднання теоретичних та експериментальних методів дослідження. Теоретичний аналіз, проведений в дисертаційній роботі, ґрунтується на окремих положеннях газової динаміки, математичної фізики, термодинаміки, теорії теплопередачі, матеріалознавства, методах підвищення точності вимірювальних засобів, теорії похибок та опрацювання результатів вимірювань, теорії статистичних досліджень. Експериментальні дослідження параметрів та стабільності метрологічних характеристик в залежності від впливу технологічних та експлуатаційних факторів виконані на базових конструкціях термоперетворювачів за стандартними та спеціально розробленими методиками на стандартному та спеціально створеному з цією метою обладнанні. Результати теоретичних досліджень також перевірені експериментально на випробувальних стендах для досліджень об'єктів нової техніки із застосуванням рентгеноструктурного методу аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну проблему - розроблення концептуальних засад і науково-обґрунтованих методів створення комплексу первинних термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків з підвищеною точністю та надійністю. При цьому отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше сформульовано і обґрунтовано концепцію побудови математичних моделей термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків з урахуванням параметрів потоку, умов теплообміну і конструктивних особливостей термоперетворювачів, що дало змогу провести дослідження впливу цих факторів на точність вимірювання температури газового потоку.

2. Для побудови математичних моделей термоперетворювачі представлено у вигляді окремих елементарних ланок (газодинамічної, теплової, електричної) зі своїми операторами перетворення (математичними моделями) і зі своїми складовими похибки, що дало змогу проводити поетапну оптимізацію за ланками еквівалентної схеми.

3. Розроблено узагальнену математичну модель термоперетворювача, яка містить у своєму складі математичні моделі елементарних ланок, що дало змогу дослідити вплив газодинамічних характеристик потоку і конструктивних особливостей термоперетворювача на їх складові похибки в сумарній похибці вимірювання температури газового потоку.

4. Вперше розроблено основні засади конструкторсько-технологічної оптимізації термоперетворювачів та їх окремих вузлів на стадії проектування, які полягають у виборі показників якості, критеріїв оптимальності та обмежень для конкретних умов вимірювання, що дало змогу сформулювати основні вимоги до конструкції термоперетворювачів, виконання яких забезпечить заданий показник якості.

5. Вперше розроблено методологію і алгоритм синтезу оптимальних конструкцій термоперетворювачів, який враховує конкретні умови вимірювання, параметри газового потоку та поєднання способів зменшення всіх складових похибки, що дало змогу досягнути заданий показник якості і здійснювати автоматизоване машинне проектування із зменшенням вартості і термінами розроблення конструкції.

6. Розвинуто застосування методу реперних точок - фазових переходів речовин для градування та перевірки метрологічних характеристик високотемпературних термоперетворювачів та розроблено методику обчислення тривалості фазового переходу корунду, що дало змогу забезпечити граничну похибку результатів метрологічної перевірки не більше ± 3 К.

7. Сформульовано рекомендації та розроблено критерій з вибору конструкційних матеріалів, які включають вимоги як до теплофізичних, механічних та електроізоляційних характеристик матеріалів, їх технологічності та сумісності між собою і досліджуваним газовим потоком, так і до однорідності і стабільності метрологічних характеристик, що дає змогу досягнути заданий показник якості.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- за результатами теоретичних і експериментальних досліджень створено ряд базових конструкцій термоперетворювачів з покращеними метрологічними характеристиками для різних умов експлуатації - ТПП-761-01, ТОП-5680, ТІР-0182, які серійно випускаються в АТЗТ “Науково-виробниче об’єднання “Термоприлад” ім. В. Лаха (м. Львів) та ППС.2-Т і ППС.3-Т, які серійно випускаються в НПВП “Техприлад” (м. Львів);

- впровадження базових конструкцій, що відрізняються конструктивною простотою і високою експлуатаційною надійністю, дозволило вирішити проблему вимірювання температури газових потоків в різних галузях народного господарства країни;

- створено методичне забезпечення та комплекс технічних засобів для градування термометричних матеріалів та перевірки метрологічних характеристик термоперетворювачів в діапазоні температур до 2100°C , яке застосовується в АТЗТ “Науково-виробниче об’єднання “Термоприлад” ім. В.Лаха (м. Львів);

- застосування розробленого критерію вибору конструкційних матеріалів в проектних організаціях дозволяє здійснювати оптимальний вибір

матеріалів під час синтезу термоперетворювачів для надійного вимірювання в високотемпературних газових потоках із забезпеченням необхідних метрологічних характеристик;

- наукові положення та висновки дисертації лягли в основу лекційних курсів „Технологічні вимірювання та прилади”, „Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація”, „Проектування елементів та систем автоматизації”, „Основи наукових досліджень”, які читаються на кафедрі «Автоматизація теплових та хімічних процесів» в Національному університеті «Львівська політехніка» та знайшли відображення під час виконання лабораторних робіт, у дипломному проектуванні студентів, кваліфікаційних роботах магістрів

Особистий внесок здобувача. Усі положення, що становлять суть дисертаційної роботи, сформульовані та вирішені автором самостійно. В працях, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належить участь у визначенні задач, дослідженнях, розробленні способів та методів, моделюванні, а також в експериментальній перевірці та реалізації результатів досліджень. Вклад дисертанта в цих роботах був визначальним.

У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [6,33] – розроблення методів мінімізації складової похибки від теплообміну через випромінення; [21] – розроблення заходів для узгодження національних стандартів з термометрії до вимог міжнародних; [22] – розроблення видів діяльності, в т.ч. і виконання температурних вимірювань; [23-26] – розроблення методів і пристроїв для вимірювання температури в пристінному шарі газового потоку.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та наукові результати доповідались на 14 науково-технічних конференціях, симпозіумах та семінарах, з яких 8 міжнародних, 6 всеукраїнських, а саме:

а) *міжнародних*: “Електричні методи та засоби вимірювання температури (Температура-92)”, 1992, Львів; “Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань (Термометрія-94)”, 1994, Харків; “Управління енерговикористанням”, 1997, Львів; “Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв, 1998, Львів”; VIII –ма Міжнародна конференція “Температура-2003”, 2003, Львів; IV–та Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми економії енергії”, 2003, Львів; XV-й Міжнародний семінар метрологів “Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях”, Львів – Ряшів, 2007; V–та Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми економії енергії”, 2008, Львів;

б) *всеукраїнських*: VII–ма Українська конференція “Моделювання і дослідження стійкості систем”, 1996, Київ; III–я Українська конференція з автоматичного керування “Автоматика-96”, 1996, Севастополь; VIII–ма Українська конференція “Моделювання і дослідження стійкості систем”, 1997,

Київ; Всеукраїнська науково-технічна конференція “Вимірювання витрати та кількості газу”, 2005, Івано-Франківськ; 6-та Всеукраїнська науково-технічна конференція “Вимірювання витрати та кількості газу”, 2009, Івано-Франківськ, 7-ма Всеукраїнська науково-технічна конференція “Вимірювання витрати та кількості газу”, 2011, Івано-Франківськ.

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 46 наукових робіт, з яких: 22 статті у фахових наукових виданнях України, 16 у збірниках матеріалів і тез науково-технічних конференцій, 3 роботи у збірниках наукових праць, 4 авторські свідоцтва і 1 європейський патент.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів з підсумками, загальних висновків, списку використаних джерел із 170 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 301 сторінку, з них 244 сторінки основного тексту, 76 рисунків, 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі сформульовано основні положення і проблеми, що розглядаються в дисертаційній роботі. Обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна та її практична значимість, положення, що виносяться на захист, викладена загальна характеристика дисертації.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи вимірювання температури газових потоків та проведено їх систематизацію. Проаналізовано методи та особливості вимірювання температури в залежності від параметрів газового потоку і специфіки його витікання.

Аналіз законів газової динаміки показує, що при відсутності притоку енергії до газового потоку ззовні виконується співвідношення

$$\frac{V^2}{2} + \frac{a^2}{k-1} = \frac{V^2}{2} + C_p T = \text{const}, \quad (1)$$

яке визначає тепловміст газового потоку. Позначення в (1): V - швидкість газового потоку; a - швидкість поширення звуку в газовому потоці; T - абсолютна температура; C_p - теплоємність при постійному тиску; k - показник адіабати газового потоку.

З рівняння (1) видно, що зі зміною швидкості газового потоку 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*. Сталу в правій частині рівняння (1) можна виразити через різні фізичні величини, наприклад, через *температуру гальмування* T_0 - температуру, яка встановлюється в газовому потоці при повному адіабатному гальмуванні ($V=0$). Тоді

$$\frac{V^2}{2} + C_p T = C_p T_0. \quad (2)$$

З врахуванням числа Маха M залежність, що пов'язує термодинамічну температуру і температуру гальмування потоку має такий вигляд:

$$T_0 - T = \frac{k-1}{2} T M^2 = \frac{V^2}{2C_p}. \quad (3)$$

Різниця $T_0 - T$ представляє собою зміну статичної температури або динамічну складову температури гальмування і визначає кінетичну енергію газу.

Під час обтікання твердого тіла, введенного в 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 адіабатного 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. Тоді *рівноважна* температура T_n потоку буде меншою від температури гальмування T_0 . Для оцінки цього процесу вводиться поняття *коефіцієнта відновлення* r_n , який характеризує ступінь відновлення ентальпії під час гальмування потоку на поверхні тіла (ступінь відновлення температурного еквівалента кінетичної енергії газу):

$$r_n = \frac{T_n - T}{T_0 - T} = \frac{T_n - T}{V^2 / 2C_p}. \quad (4)$$

Реальний термоперетворювач (ТП), поміщений в газовий потік, не буде повністю сприймати динамічну складову температури гальмування, а даватиме інформацію про деяку температуру T_{pn} , яка знаходиться між статичною температурою T і температурою гальмування T_0 . 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. Значення перетвореної частини енергії залежить від форми ТП і числа Прандтля Pr , яке пов'язує кількість тепла, що виділяється в пристінному шарі в результаті дії сил тертя, з кількістю тепла, що виноситься потоком в результаті дії теплопровідності. Температура T_{pn} залежить також від умов взаємодії ТП і потоку, на неї впливає передавання тепла шляхом теплопровідності між окремими елементами ТП, теплообміну випроміненням з навколишнім середовищем та предметами, що оточують ТП.

Для оцінки якості реального ТП, що встановлений в газовий потік для вимірювання температури, за аналогією з (4) вводиться поняття коефіцієнта відновлення r_{pn} реального ТП:

$$r_{pn} = \frac{T_{pn} - T}{T_0 - T} = \frac{T_{pn} - T}{V^2 / 2C_p}. \quad (5)$$

З врахуванням (5) для коефіцієнта відновлення r_{pn} отримані залежності для температури T_{pn} реального ТП через число M і через швидкість газового потоку V :

$$T_{pn} = T \left(1 + r_{pn} \frac{k-1}{2} M^2 \right) = T_0 \frac{1 + \frac{k-1}{2} r_{pn} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} ; \quad (6)$$

$$T_{pn} = T + r_{pn} \frac{V^2}{2C_p} . \quad (7)$$

Точність вимірювання температури газових потоків залежить від вибраного методу вимірювання, від метрологічних характеристик засобів вимірювання, від умов і місця вимірювання, способу установалення ТП та багатьох інших факторів. Тому вибір методу і засобів вимірювання температури газових потоків необхідно здійснювати головним чином в залежності від потрібної точності і умов вимірювання.

В даний час відомо багато методів вимірювання температури газових потоків і ТП, що базуються на різних принципах дії та призначених для використання в різних умовах. Вибір оптимального методу вимірювання температури газових потоків є досить складним завданням, оскільки необхідно враховувати багато факторів, які часто є суперечливими.

Термоперетворювачі є засобами отримання первинної інформації про тепловий стан газового потоку або досліджуваного об'єкта. Тому до них повинні пред'являтися вимоги високої експлуатаційної надійності. Вони повинні забезпечувати потрібну точність вимірювання, мати певне значення показника теплової інерції. Важливою вимогою є висока технологічність під час їх серійного виробництва, зручність при монтажі на технологічному обладнанні, простота в експлуатації і профілактиці, а також висока метрологічна надійність. Термоперетворювачі повинні витримувати також і термоциклічні режими роботи при збереженні необхідної стабільності номінальної статичної характеристики (НСХ) і механічної міцності за задану кількість циклів нагрівання і охолодження, що є дуже важливим для змінних і особливо для короткотривалих теплових процесів.

Як показали дослідження автора, найбільш повно вказаним вимогам відповідають електричні контактні методи вимірювання температури газових потоків за допомогою термоперетворювачів опору (ТО) і термоелектричних перетворювачів (ТП), які і розглянуто в даній роботі.

Другий розділ присвячений синтезу узагальненої математичної моделі ТП для вимірювання температури газових потоків.

Точність вимірювання температури газових потоків залежить не тільки від похибок засобів вимірювання, а і від умов вимірювання, способу установалення ТП, тощо. Це зумовлено тим, що при використанні контактних методів вимірювання ТП знаходиться в безпосередньому контакті із потоком, температура якого вимірюється. В цих умовах ТП для потоку є стороннім тілом і в тій чи іншій мірі порушує початкове температурне поле в місці його встановлення. Будь-який ТП дає

інформацію тільки про свою власну температуру, 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 в процесі теплообміну чутливого елемента (ЧЕ) ТП з газовим потоком через конвекцію, випромінення та теплопровідність.

Аналітичний розрахунок втрат тепла через випромінення та теплопровідність досить складний. Використовуються різні способи оцінок теплових втрат для спрощення моделей ТП. Але велика різноманітність конструкцій ТП і складність процесів теплообміну навіть наближену оцінку похибки роблять трудомісткою і не завжди ефективною. Крім цього оцінка ускладнюється і тим, що теплофізичні властивості як термоелектричних, так і конструкційних матеріалів також залежать від температури.

При великих швидкостях газового потоку має місце так звана "швидкісна похибка", обумовлена неповним перетворенням кінетичної енергії рухомого газу в теплову в пристінному шарі, що оточує чутливий елемент ТП.

Якщо температура газового потоку нестационарна, то теплоємність чутливого елемента є причиною того, що ТП не в змозі миттєво реєструвати змінну в часі його температуру. В цих умовах виникає динамічна похибка вимірювання.

Отже випромінення, теплообмін через теплопровідність, процес перетворення кінетичної енергії в теплову в залежності від швидкості потоку, а також обмежені можливості ТП без запізнення слідкувати за зміною температури визначають основні види похибок, які мають місце під час вимірювання температури 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 ТП.

Повне аналітичне дослідження сумісного впливу всіх основних чинників на загальну похибку вимірювання температури газового потоку конкретним ТП складної конструкції практично неможливе, оскільки деякі залежності, що описують характер впливу того чи іншого чинника, можуть бути визначені тільки експериментально. Внаслідок того, що оцінка впливу різних чинників завжди носить наближений характер, запропоновано на практиці аналізувати кожний вид похибки окремо з припущенням, що решта її видів відсутні, а сумарну похибку вимірювання розглядати як суперпозицію окремих видів похибок.

Тому для зручності проведення аналізу ТП запропоновано представити у вигляді окремих елементарних ланок зі своїми операторами перетворення (математичними моделями) і зі своїми складовими похибки. Причому за елементарну ланку прийнято сукупність способів і засобів перетворення, що об'єднуються за характерними ознаками.

Для ТП, призначених для вимірювання температури газових потоків еквівалентна схема перетворення представлена у вигляді трьох послідовно

з'єднаних ланок (підсистем): газодинамічної, теплової та електричної (рис.1). Газодинамічна підсистема перетворює термодинамічну температуру $T(\tau)$ газового потоку на вході ТП в температуру гальмування $T_{TP}(\tau)$ на вході в термочутливий елемент і характеризується “швидкісною” складовою похибки. Теплова підсистема перетворює цю температуру в рівноважну температуру $T_{PTP}(\tau)$ термочутливого елемента, що виражає його ентальпію і характеризується складовими похибки від теплопровідності, і теплообміну випроміненням та похибки від наявності джерел енергії в ТП. Електрична підсистема перетворює температуру $T_{PTP}(\tau)$ в вихідний електричний сигнал $y_{TP}(\tau)$.

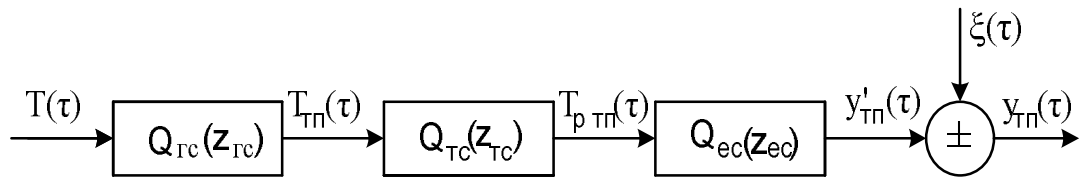


Рис. 1. Еквівалентна схема перетворення ТП для вимірювання температури газового потоку.

Позначення на рис.1: $Q_{ГC}(z_{ГC})$, $Q_{TC}(z_{TC})$, $Q_{EC}(z_{EC})$ - відповідно оператори перетворення газодинамічної, теплової та електричної підсистем; $(z_{ГC})$, (z_{TC}) , (z_{EC}) - множина впливаючих факторів відповідної підсистеми; $\xi(\tau)$ - узагальнена завада, приведена до входу ТП.

Під час досліджень температурного режиму газових потоків завдання експериментатора зводиться до точного вимірювання статичної температури T або температури гальмування T_0 . При цьому знання однієї з них достатнє для визначення іншої при умові, що відома швидкість потоку. В технічному відношенні завдання експериментального визначення температури гальмування є значно простішим, ніж визначення статичної температури.

Вирішення завдання точного вимірювання температури газового потоку, що рухається з великою швидкістю, визначається створенням раціональної конструкції ТП гальмування. Його можна представити у вигляді насадки, у внутрішньому каналі якої розміщено термометричний чутливий елемент (рис.2). На рис.2 $F_{вх}$, $F_{к.2}$, $F_{вих}$ - відповідно площа входу в камеру гальмування, площа камери гальмування в місці розміщення чутливого елемента ТП і площа виходу з камери гальмування; M і $M_{к.2}$, T_1 , T_2 - відповідно числа Маха і температури в цих січеннях; n - число вихідних отворів; f - площа одного вихідного отвору.

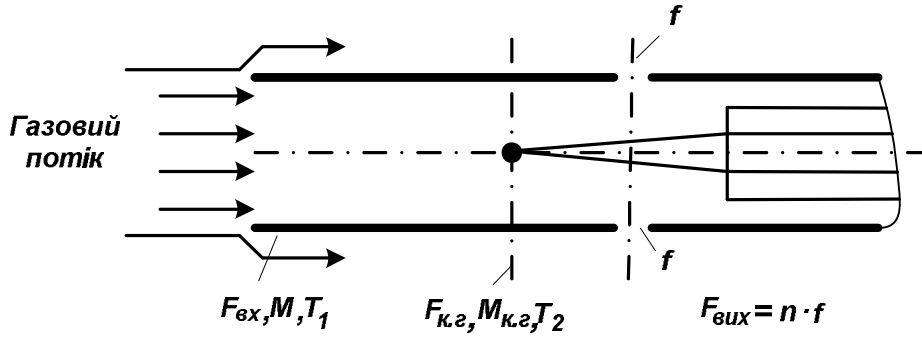


Рис. 2. Схема обтікання ТП газовим потоком.

Дослідження роботи таких ТП дають можливість аналітично визначити основні газодинамічні процеси, що в них протікають, і тим самим знайти залежність математичної моделі від параметрів потоку, особливостей конструкції і основних конструктивних параметрів.

Дослідження газодинамічних характеристик ТП гальмування проводилися для схеми усталеного адіабатного витікання газового потоку каналом довільного січення при відсутності втрат. Диференційне рівняння руху потоку каналом довільного січення для таких умов представлено у вигляді

$$\frac{dM^2}{2 + (k-1)M^2} - \left[\frac{dM^2}{2 + (k-1)M^2} \right] M^2 = \frac{dF}{F}, \quad (8)$$

Рішення диференційного рівняння (8) має вигляд:

$$\frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M_{к.з}} = \frac{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{к.з}^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{M} \cdot \frac{F_{вх}}{F_{к.з}}, \quad (9)$$

Очевидно, що від значення відношення $F_{вх} / F_{к.з}$ газовий потік в камері гальмування буде змінювати свою швидкість в порівнянні з набігаючим потоком на вході.

Для визначення температури гальмування газовий потік, проходячи через камеру гальмування, повинен штучно загальмовуватися завдяки тому, що площа внутрішнього січення камери гальмування $F_{к.з}$ має бути більшою від сумарної площі вихідних отворів $F_{вих} = n \cdot f$ (рис.2).

Визначальною характеристикою газодинамічної підсистеми є коефіцієнт відновлення r ТП. Оскільки ТП складається з камери гальмування і чутливого елемента, то для нього доцільно представляти коефіцієнт відновлення r у вигляді залежності від коефіцієнта гальмування камери гальмування $r_{к.з}$ і коефіцієнта відновлення чутливого елемента $r_{че}$:

$$r_{pn} = r_{к.з} - r_{к.з} r_{че} + r_{че} = r_{к.з} \left(1 - r_{че} + \frac{r_{че}}{r_{к.з}} \right) \quad (10)$$

або

$$r_{pn} = 1 - (1 - r_{че}) \left(\frac{V_{к.з}}{V} \right). \quad (11)$$

Використовуючи вказані залежності та відомі співвідношення газової динаміки була встановлена теоретична залежність коефіцієнта відновлення ТП з камерою гальмування від числа M набігаючого потоку і конструктивних параметрів камери гальмування.

При обтіканні ТП дозвуковим потоком залежність має вигляд:

$$\left(\frac{nf}{F_{ex}}\right)^{k-1} \left(\frac{1-r_{ce}}{1-r_{pn}}\right)^{\frac{k-1}{2}} - 1 = \frac{k-1}{2} M^2 \frac{r_{pn} - r_{ce}}{1-r_{ce}}. \quad (12)$$

При надзвуковому обтіканні ТП і дозвуковому витіканні біля вихідних отворів за аналогією з (12) запишемо :

$$\left(\frac{nf}{F_{ex}}\right)^{k-1} \left(\frac{1-r_{ce}}{1-r_{pn}}\right)^{\frac{k-1}{2}} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{0,5 M^2} \right]^k \frac{k M^{2-\frac{k-1}{2}}}{0,5(k+1)^{\frac{k+1}{2}}} - 1 = \frac{k-1}{2} M^2 \frac{r_{pn} - r_{ce}}{1-r_{ce}}. \quad (13)$$

Якщо при надзвуковому обтіканні ТП з камерою гальмування витікання біля вихідних отворів надзвукове, то

$$\left(\frac{nf}{F_{ex}}\right)^{k-1} \left(\frac{1-r_{ce}}{1-r_{pn}}\right)^{\frac{k-1}{2}} \left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{0,5 M^2} \right]^{\frac{k+1}{2}} M^{-(k-1)} - 1 = \frac{k-1}{2} M^2 \frac{r_{pn} - r_{ce}}{1-r_{ce}}. \quad (14)$$

Вирази (12-14) представляють собою математичну модель газодинамічної підсистеми і визначають взаємозв'язок між коефіцієнтом відновлення ТП, параметрами потоку та конструктивними особливостями ТП в залежності від швидкості V (числа M) набігаючого потоку.

Для оптимізації теплової підсистеми була складена повна схема теплообміну чутливого елемента, проведений аналіз кожної складової і визначені вимоги до конструкторсько-технологічних рішень ТП, які забезпечували б оптимізацію математичної моделі теплової підсистеми, тобто мінімізацію складових похибки цієї підсистеми.

При розробленні математичної моделі теплової підсистеми ТП можна розглядати як однорідне ізотропне тіло. Для таких умов математична модель теплообміну була представлена у вигляді рівняння нестационарної теплопровідності Фур'є:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad } T] + \omega, \quad (15)$$

де C_V , λ - відповідно об'ємна теплоємність і теплопровідність матеріалів чутливого елемента; div і grad – операції дивіргенції і градієнта; ω - функція розподілу джерел енергії по об'єму ТП.

Для певних визначених інтервалів температури ΔT можна прийняти, що для конкретного матеріалу коефіцієнти $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ є незалежними від температури. Тоді рівняння (13) стане лінійним і прийме вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) + \frac{1}{C_V} \omega, \quad (16)$$

де $a = \frac{\lambda}{C_V}$ - коефіцієнт теплопроводності матеріалу чутливого елемента.

Рівняння (16) є узагальненою математичною моделлю теплової підсистеми ТП.

Теплообмін ТП для вимірювання температури газових потоків обумовлений теплообміном через теплопровідність чутливого елемента з елементами конструкції ТП, теплообміном випроміненням з внутрішньою поверхнею камери гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком.

На основі проведених у роботі досліджень визначено параметри, зміною яких можна мінімізувати складові похибки теплової підсистеми ТП.

В загальному випадку вихідний сигнал електричної підсистеми є функцією сигналу, що поступає на її вхід з теплової підсистеми і множини власних завад, обумовлених змінами фізичних властивостей матеріалів ТП внаслідок структурних перетворень під дією досліджуваного газового потоку, термодинамічних шумів, тощо. При невеликому рівні завад (в порівнянні з рівнем вхідного сигналу) оператор $Q_{ec}(z_{ec})$ перетворення електричної підсистеми можна вважати постійною величиною і його чисельне значення буде визначатися законом перетворення та не залежати від конструкції ТП.

Спотворення показів ТП через нестационарності теплових процесів як в самому ТП, так і між ТП та навколишнім середовищем обумовлені тепловою інерцією ТП. За рахунок теплової інерції виникає додаткова різниця між температурами чутливого елемента і газового потоку, яка визначає динамічну похибку вимірювання температури газового потоку. Визначення динамічної похибки здійснено шляхом оцінки умов теплообміну ТП з газовим потоком і стінками, що його оточують, а також теплоємності чутливого елемента.

В **третьому розділі** розроблено загальні засади конструкторсько-технологічної оптимізації ТП для вимірювання температури газових потоків, визначено основні критерії оптимальності та обмежуючі фактори в залежності від умов експлуатації ТП. Розроблено заходи з оптимізації газодинамічної і теплової підсистем ТП, узагальнену методологію та алгоритм їх синтезу.

Під час вимірювання температури газових потоків ставляться високі вимоги до достовірності вимірювальної інформації, тому визначальним показником якості є точність (динамічна точність під час вимірювання нестационарних температур). В цьому випадку основна задача синтезу зводиться до забезпечення оптимальної точності і виконання умов фізичної реалізації конструкції, достатньої надійності та допустимих габаритних розмірів і маси. Виконання цієї умови залежить від конструкції ТП, умов його взаємодії з навколишнім середовищем, наявністю простору для його установа на об'єкті і способу здійснення гальмування газу в

ньому. Перевищення значення оптимальної точності може призвести до різкого зниження інших якісних показників і непридатності конструкції до застосування. Границя області оптимізації точності визначається вимогами до проведення досліджень.

В загальному випадку конструкція ТП складається із певних елементів, призначення яких зводиться до послаблення впливу того чи іншого джерела похибки вимірювання (швидкісної похибки, похибки від теплообміну через теплопровідність і випромінення, динамічної похибки).

Швидкісна похибка $\Delta t_{ув}$ вимірювання температури газового потоку, яка є основною для газодинамічної підсистеми ТП, визначається рівнянням через коефіцієнт відновлення r і швидкість потоку V поблизу його чутливого елемента:

$$\Delta t_{ув} = T_{pTP} - T_0 = (1 - r_{pn}) \frac{V^2}{2C_p}. \quad (17)$$

Аналіз (17) показує, що швидкісна похибка залежить від швидкості газового потоку в зоні чутливого елемента і коефіцієнта відновлення ТП, який в свою чергу також залежить від швидкості потоку і його конструктивних та геометричних параметрів.

Отже, оптимізація газодинамічної підсистеми (мінімізація швидкісної складової похибки) повинна включати в себе визначення способів і засобів, що забезпечують постійність коефіцієнта відновлення і зменшення швидкості обтікання чутливого елемента в порівнянні із швидкістю набігаючого потоку при наявності завод і прийнятих обмеженнях в необхідних діапазонах зміни чисел Маха M і Рейнольдса Re .

В число обмежень входять вимоги забезпечення таких факторів:

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

Критерієм оптимальності при цьому служить критерій мінімуму швидкісної похибки $\Delta t_{оа}$.

Для оптимізації газодинамічної підсистеми необхідно знайти умови, які забезпечували б мінімальну зміну коефіцієнта відновлення r_{pn} ТП, тобто

$$\Delta r_{pn} \rightarrow 0 \quad (18)$$

Дослідження газодинамічних характеристик ТП для оптимізації газодинамічної підсистеми проводилося за двома напрямками:

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

Аналітичні вирішення визначення рівноважної температури і коефіцієнта відновлення існують тільки для плоскої пластини. Для ТП, які мають циліндричну

форму, що характеризується інакшим (відривним) обтіканням, задача не має аналітичного вирішення. Тому проводилися експериментальні дослідження з визначення рівноважної температури і коефіцієнтів відновлення ТП різних форм.

Експериментальні дослідження проводились в умовах стаціонарного обтікання ТП, оскільки в умовах нестаціонарного обтікання коефіцієнт відновлення є змінною величиною, але визначити характер і його зміни неможливо із-за наявності теплової інерції ТП.

За результатами досліджень встановлено:

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

2. За характером зміни коефіцієнта відновлення пластинчастих, еліптичної та круглої форми січення чутливих елементів при поздовжньому обтіканні газовим потоком в залежності від чисел Re і M розрізняють три основні області:

а) область ламінарного руху, в якій r_{ce} має постійне значення, що дорівнює 0,84 (для плоскої пластини). Її називають першою областю автомодельності;

б) перехідна область, в якій r_{ce} зростає із зростанням чисел Re і M ;

в) область турбулентного руху (друга область автомодельності), в якій r_{ce} залишається постійним і дорівнює 0,9.

3. За характером зміни коефіцієнта відновлення ТП круглої форми січення при поперечному обтіканні в залежності 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_{ce} має постійне значення (перша область автомодельності);

б) область в діапазоні чисел Re від 3000 до 20000 і M від 0,2 до 0,7, в якій r_{ce} зростає із зростанням чисел Re і M ;

в) область в діапазоні чисел Re від 20000 до 120000 і M від 0,7 до 1,0, в якій r_{ce} має постійне значення (друга область автомодельності);

г) область в діапазоні чисел $Re > 120000$ і $M > 1$, в якій r_{ce} спадає із зростанням чисел Re і M

На основі проведених досліджень 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 січення необхідно забезпечувати поздовжнє обтікання ТП набігаючим потоком;

б) для чутливих елементів з круглою формою січення 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 автомодельності (область ламінарного руху, в якій r_{ce} має постійне значення), або камери критичної швидкості з умовами, що відповідають другій області автомодельності (область турбулентного руху, в якій r_{ce} залишається постійним) або в проточні циліндричні камери з умовами, що відповідають умовам на вході в камеру.

В практиці вимірювання температур газових потоків в більшості випадків необхідно забезпечити постійне значення коефіцієнта відновлення в першій області автомодельності, тобто для гальмування швидкості обтікання чутливого елемента необхідно застосовувати ТП з камерами гальмування. Результати досліджень показали, що коефіцієнт відновлення ТП із камерами гальмування має практично постійне і стабільне значення в широких межах зміни чисел M і Re . Коефіцієнт відновлення ТП з повздовжнім обтіканням газовим потоком в широкому діапазоні зміни швидкості потоку становить 0,97...0,98. Значення коефіцієнта відновлення ТП з камерами гальмування (з круглою формою січення чутливого елемента) при поперечному обтіканні газовим потоком становить 0,94...0,95.

Завдання, які необхідно вирішувати в процесі оптимізації теплової підсистеми ТП зводяться до створення таких умов в ньому, при яких дією всіх видів теплових впливів на чутливий елемент, крім основного, можна знехтувати, а швидкість зміни температури чутливого елемента внаслідок конвективного теплообміну з потоком повинна бути максимальною і практично постійною при зміні впливаючих факторів.

Для вирішення такого завдання аналізувалася кожна складова математичної моделі теплової підсистеми і визначалися умови, при яких складові похибки від певного виду теплообміну були б мінімальними.

Теплообмін ТП обумовлений теплообміном через теплопровідність чутливого елемента з елементами його конструкції, теплообміном випроміненням з внутрішньою поверхнею камери гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком.

Для оцінки складової похибки вимірювання температури газового потоку від теплообміну через теплопровідність Δt_m в реальних конструкціях ТП вихідним є рівняння теплопровідності в стержні постійного поперечного січення

$$\Delta t_m = t_n - t_0 = - \frac{t_0 - t_{cm}}{chL \sqrt{\frac{4\alpha}{d\lambda}}}, \quad (19)$$

де t_n , t_0 , t_{cm} – відповідно температури чутливого елемента ТП, газового потоку, ТП в точці кріплення його до арматури; L , d – відповідно довжина і діаметр робочої ділянки ТП; α - коефіцієнт конвективної тепловіддачі від газового потоку до чутливого елемента; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу чутливого елемента.

З рівняння (19) видно, що значення даної складової похибки можна зменшити такими шляхами:

- зменшенням різниці температур $(t_o - t_{cm})$;
- збільшенням глибини занурення L ТП в газовий потік;
- зменшенням діаметра ТП, термоелектродних і з'єднувальних провідників, а також зменшенням їх теплопровідності;
- збільшенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі від газового потоку до чутливого елемента ТП.

Зменшення різниці температур $(t_o - t_{cm})$ практично здійснити важко. В основному це можна досягнути тільки за рахунок електричного підігрівання стінки, на якій закріплюється ТП. Такий захід дозволяє практично повністю виключити складову похибки Δt_o від теплообміну через теплопровідність, але це пов'язано з великими експлуатаційними труднощами.

Найбільш вільно можна змінювати глибину занурення L ТП в газовий потік. Ця глибина занурення повинна бути по можливості найбільшою. Але навіть при великій глибині занурення ТП температура захисного корпусу буде дещо відрізнятися від температури газового потоку за рахунок впливу випромінення і перетворення частини кінетичної енергії в теплову. Тобто, зміною глибини занурення ТП можна тільки послабити тепловідведення через корпус.

Для зменшення похибки Δt_m доцільно використовувати термоелектроди з малою теплопровідністю. Це дозволяє виготовити ТП будь-якої конструкції досить компактним. Особливо це відноситься до ТП з поздовжнім обтіканням чутливого елемента, оскільки для них складніше забезпечити достатню глибину занурення, яка гарантувала б мінімальні похибки від тепловідведення через теплопровідність.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі α від газового потоку до ТП залежить від його геометрії і умов витікання газу. Значення коефіцієнта тепловіддачі α можна регулювати зміною діаметра ТП і термоелектродів, а також швидкістю потоку всередині камери гальмування. Але така можливість дещо обмежена, оскільки зменшення діаметра термоелектродів погіршує міцнісні характеристики ТП і зменшує його довговічність, а збільшення швидкості потоку всередині камери гальмування призводить до збільшення швидкісної похибки. Отже, існує деякий оптимум для результуючої дії вказаних факторів і йому відповідає максимальне значення коефіцієнта відновлення ТП

Значення складової похибки Δt_e за рахунок випромінення залежить в основному від трьох параметрів: повного коефіцієнта чорноти ε_n поверхні ТП, коефіцієнта конвективної тепловіддачі α від газового потоку до ТП і температури стінок t_{cm} :

$$\Delta t_e = t_n - t_0 = \frac{\sigma \varepsilon_n}{\alpha} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (20)$$

Для зменшення похибки від випромінення доцільно використовувати термоелектродні і конструктивні матеріали з низьким і стабільним при різних зовнішніх умовах коефіцієнтом чорноти. Але до термоелектродних і конструкційних матеріалів пред'являються і інші не менш вагомні вимоги (чутливість, тугоплавкість, еластичність, тощо), які не завжди узгоджуються з вимогою низького і стабільно значення коефіцієнта чорноти. В цих випадках складова похибки від випромінення може бути зменшена шляхом нанесення на основний матеріал покриття із таких металів з малим значенням коефіцієнта чорноти, як срібло (0,05), золото (0,08) або платина (0,18).

Основним засобом впливу на складову похибки, обумовлену випроміненням, є підвищення температури стінки t_{cm} . Для зменшення різниці між температурою стінок і температурою газового потоку інколи застосовують теплову ізоляцію стінок, але найчастіше зменшення впливу холодних стінок досягається ефективним екрануванням чутливого елемента одним або декількома екранами. Захисні екрани необхідно встановлювати між чутливим елементом ТП і стінками. В дисертаційній роботі розглянута оцінка ефективності екранування і визначення кількості екранів, необхідних для забезпечення потрібної точності вимірювання.

Під час конструювання ТП необхідно забезпечити якомога менше значення показника теплової інерції, оскільки він визначає динамічну похибку під час вимірювання швидкозмінних температур. Показник теплової інерції залежить як від параметрів газового потоку, так і від конструктивних особливостей ТП. В роботі показано, що зменшення показника теплової інерції досягається такими заходами:

- зменшенням маси термоелектродних і конструкційних матеріалів;
- вибором матеріалів з малою питомою теплоємністю і низькою теплопровідністю;
- збільшенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі від газового потоку до ТП;
- збільшенням площі поверхні ТП, що омивається газовим потоком;
- збільшенням віддалі між злutom і місцем закріплення ТП;
- збільшенням рівня вимірюваної температури.

Вище аналізувалися окремі види похибок, обумовлених швидкістю газового потоку, тепловідведенням через теплопровідність, випроміненням і інерційністю. При практичному конструюванні ТП необхідно приймати заходи для одночасного усунення всіх складових похибок. Найбільш ефективним з них є такі:

- зменшення швидкості потоку в області злutom для зменшення швидкісної похибки;
- збільшення глибини занурення ТП для зменшення похибки, обумовленої тепловідведенням через теплопровідність;
- підвищення температури стінок, що оточують ТП, з метою зменшення похибки, обумовленої випроміненням;
- збільшення площі поверхні ТП, що омивається газовим потоком, для зменшення динамічної складової похибки.

На основі розглянутих способів оптимізації складових похибки вимірювання розроблена методологія синтезу елементів оптимальної конструкції ТП для вимірювання температури газових потоків, яка представлена у вигляді певної послідовності операцій. Розроблена методологія реалізована у вигляді узагальненого алгоритму синтезу базових конструкцій ТП, який зображено на рис. 3

Застосування даної методології проектування дає можливість шляхом оптимального поєднання різних елементів конструкції розробити ТП, що характеризуються простотою і технологічністю у виготовленні і в той же час забезпечують необхідні метрологічні характеристики. Основною перевагою даного методу конструювання є те, що маніпулюючи віртуальним поєднання різних елементів конструкції, а не експериментуючи з реальними макетами ТП, можна розробити конструкцію, яка буде відносно простою у виготовленні та експлуатації і буде задовільняти всім поставленим до неї вимогам.

Перевагою розробленої методології є також те, що вона дає змогу здійснювати автоматизоване машинне проектування ТП. А це в свою чергу призведе до зменшення вартості і термінів розробки.

У **четвертому розділі** розглянуто питання перевірки метрологічних характеристик ТП.

Метрологічну перевірку і градування можна здійснювати шляхом порівняння із зразковими термоперетворювачами або по фіксованих (реперних) точках.

Для метрологічної перевірки ТП з температурним діапазоном до 1000°C на практиці більш поширеним є метод порівняння із зразковим ТП, який дає можливість визначити значення похибки в широкому діапазоні температур. У роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень виконано розрахунок оптимальних режимів метрологічної перевірки ТП, проведено аналіз похибок, що виникають під час перевірки, які в загальному випадку ідентифіковані як сума складових:

- допустима інструментальна похибка вимірювального тракту Δ_{ϵ} ;
- допустима динамічна похибка вимірювань $\Delta_{1\partial}$ і зразкового засобу вимірювань $\Delta_{2\partial}$;
- допустима методична похибка вимірювань ТП $\Delta_{1м}$ і зразкового засобу вимірювань $\Delta_{2м}$;
- допустима похибка передачі температурної шкали зразковим засобом вимірювань σ .

При стаціонарному температурному процесі, яким є процес метрологічної перевірки і тривалості операції вимірювання динамічними похибками $\Delta_{1\partial}$ і $\Delta_{2\partial}$ можна нехтувати. Шляхом відповідного вибору засобів вимірювання, по можливості знизити інструментальну похибку вимірювального тракту Δ_{ϵ} .

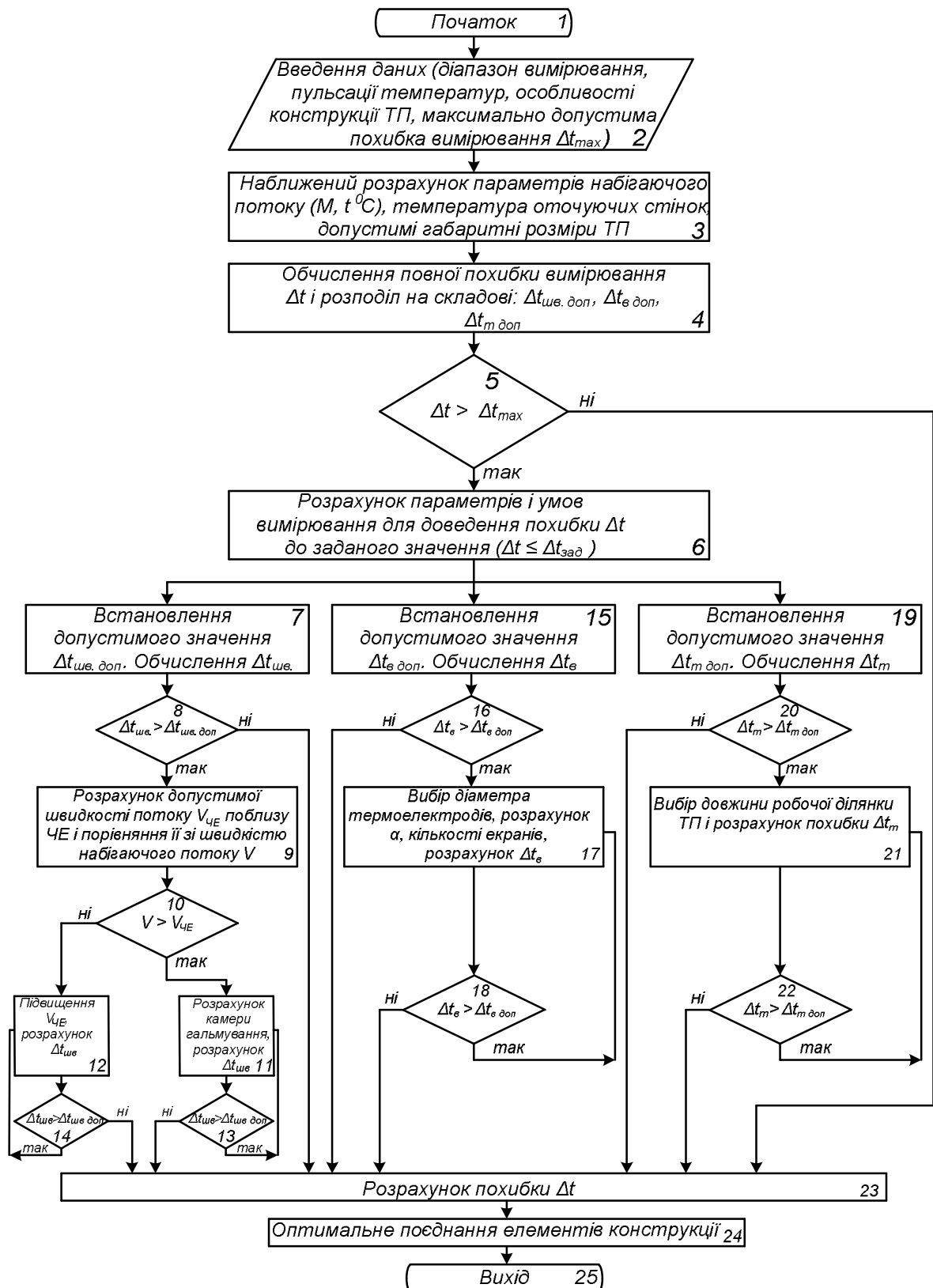


Рис. 3. Узагальнений алгоритм синтезу базових конструкцій ТП для вимірювання температури газових потоків.

Таким чином, сумарна допустима похибка під час метрологічної перевірки будь-якої конструкції ТП розподіляється між методичною похибкою Δ_m і похибкою передачі температурної шкали σ .

Методична похибка в кожному конкретному випадку зводиться до визначення значення похибки від тепловідведення через теплопровідність для даного типу ТП за виразом (19).

Похибка передачі температурної шкали σ в основному визначається випадковою похибкою під час порівняння показів ТП, що перевіряється, і зразкового засобу вимірювання. Одним із шляхів зменшення значення σ при вибраному певному зразковому засобі є збільшення числа вимірювань, оскільки відомо, що $\sigma_n = \frac{\sigma}{n}$, де σ - похибка одного вимірювання; n – кількість вимірювань.

Кількість вимірювань при перевірці на нижньому і верхньому діапазоні температур може бути різною через різні значення інформаційного сигналу на цих діапазонах. З підвищенням температури кількість вимірювань рекомендовано зменшити через збільшення рівня інформаційного сигналу, що, понижує випадкову похибку окремого вимірювання. Таким чином на кожному діапазоні температур кількість вимірювань можна оптимізувати при заданому значенні похибки σ .

Враховуючи все більш зростаючі вимоги до точності, до відтворення і збіжності показів ТП при температурах газових потоків вище 1800 °С вибір методики перевірки зводиться лише до застосування методу постійних (реперних) точок. Єдиним матеріалом для визначення температури фазового переходу в діапазоні температур вище 1800 °С є корунд. Даний матеріал служить державним стандартним зразком складу і властивостей матеріалів та речовин, температура фазового переходу якого встановлюється при атестації. В залежності від хімічного складу температура фазового переходу становить $(2054 \pm 4)^\circ\text{C}$.

Для визначення оптимального теплового режиму точки фазового переходу корунду в роботі були розраховані конструктивні розміри тиглю, в якому встановлюється для метрологічної перевірки ТП, із встановленим у ньому молібденовим чохлом та тепловий баланс тигля з наважкою реперного матеріалу для досягнення необхідної тривалості площадки (плато) фазового переходу. Обчислення тривалості плато затвердіння – складний і трудомісткий процес. Тому автором запропоновано методику розрахунку проміжку часу $\Delta\tau = \tau - \tau_1$ (τ_1 - час початку процесу затвердіння), протягом якого робочий кінець ТП досягне температуру, яка відрізняється від температури затвердіння на певну величину „недоходу” $\Delta t = t - t_n$ (t – температура чутливого елемента ТП в момент часу τ_1), згідно якої

$$\Delta\tau = \tau - \tau_1 = \varepsilon \ln \frac{\varepsilon v}{\Delta t}, \quad (21)$$

де ε - постійна термічної інерції ТП, що перевіряється; ν – швидкість зміни температури в пічці.

Розрахунки за (21) показують, що для вольфрамрений/вольфрамрениєвого чутливого елемента з постійною термічної інерції $\varepsilon = 20$ с при швидкості зміни температури в пічці не більше $5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ і допустимій величині „недоходу” $\Delta t = 0,5$ К необхідний час тривалості плато затвердіння становить $\Delta \tau = 24,08$ с. Для $\varepsilon = 10$ с, $\nu = 3^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ і $\Delta t = 1$ К $\Delta \tau = 6,9$ с. На основі експериментальних досліджень проаналізовано хід температурного процесу затвердіння реперної точки і здійснено оцінку температури фазового переходу з метою застосування її під час метрологічної перевірки ТП, що дало змогу забезпечити граничну похибку результатів перевірки не більше ± 3 К.

У п'ятому розділі розглянуто принципи оптимізації вибору та застосування матеріалів під час створення ТП для вимірювання температури газових потоків. Одним із напрямків створення високоточних і надійних ТП є використання термометричних та конструктивних матеріалів із спеціальними властивостями, високою стабільністю їх електрохімічних, хімічних та механічних властивостей в широкому діапазоні зміни температур.

В роботі наведено взаємозв'язок основних технічних параметрів ТП з їх конструктивними особливостями і властивостями матеріалів, що в них застосовуються. Метрологічні характеристики ТП визначаються властивостями чутливого елемента, тобто властивостями термоелектричних матеріалів (термоелектродів), із яких вони виготовлені. Важливе значення мають технологічність, однорідність і відтворюваність термоелектричних властивостей в умовах промислового виробництва термоелектродних матеріалів і технологія виготовлення.

Найбільші труднощі виникають при виборі конструкційних тепло- та електроізоляційних матеріалів для ТП під час вимірювання температури газових потоків, де за самою природою можливі швидкі зміни температури, а також погіршені умови теплообміну між потоком і ТП. Важливим елементом ТП є вогнетривка теплова та електрична ізоляція, яка суттєво впливає на надійність, динамічні характеристики та точність вимірювання температури. При виборі конструкційних теплоізоляційних матеріалів необхідно враховувати їх жаростійкість у вимірюваному середовищі, термостійкість, газощільність, теплоємність, теплопровідність, температурний коефіцієнт лінійного розширення, технологічність, хімічну сумісність з термометричними матеріалами і матеріалами захисної арматури, наявність домішок, що впливають на основні властивості. Жаростійкість, термостійкість, технологічність та хімічна сумісність матеріалів між собою визначаються границями міцності на розтягування, модулем пружності, температурами топлення, переходу в хрупкий стан, початку взаємодії з іншими конструкційними матеріалами або вимірюваним середовищем.

Для забезпечення необхідних динамічних властивостей та похибки ТП конструкційні теплоізоляційні матеріали повинні мати певні значення питомої теплоємності C_p , коефіцієнта теплопровідності λ та густини ρ . Основною функцією електроізоляційних матеріалів є забезпечення необхідного значення електричної ізоляції термоелектричних матеріалів між собою, а також із захисною арматурою. При високих температурах різко зменшується електричний опір електроізоляційних матеріалів. В результаті цього відбуваються різноманітні шунтування електричного кола чутливого елемента ТП і виникає додаткова похибка, яка при вимірюваннях температури в діапазоні до 2500...3000 °С може досягати до 200 К. Крім цього, як елемент конструкції ТП електроізоляційні матеріали повинні також витримувати механічні навантаження і захищати чутливий елемент від впливу досліджуваного середовища, тобто мати певні значення границі міцності на розтягування σ і модуль пружності E .

Таким чином, основними параметрами, що визначають придатність конструктивних тепло- та електроізоляційних матеріалів для використання їх як електроізоляторів високотемпературних ТП є: питомий електричний опір (впливає на величину основної похибки вимірювання температури), хімічна сумісність з термометричними матеріалами та захисною арматурою, наявність домішок, що впливають на стабільність властивостей термометричних матеріалів, а також технологічність, термостійкість, газощільність.

Враховуючи вищенаведене, розроблено критерій вибору тепло- та електроізоляційних матеріалів K_m при синтезі конструкцій високотемпературних ТП:

$$K_m = \frac{a \cdot T_{\text{вз}} \cdot \sigma \cdot 10^6}{\alpha \cdot \Delta_{\text{дон}} \cdot T_{\text{хп}} \cdot E}, \quad (22)$$

де α - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; a - коефіцієнт температуропровідності; $T_{\text{вз}}$ - температура початку взаємодії з конструкційними матеріалами або вимірюваним середовищем (характеризує сумісність), К; $T_{\text{хп}}$ - температура переходу в хрупкий стан (характеризує технологічність), К; $\Delta_{\text{дон}}$ - допустиме значення основної похибки ТП згідно чинної нормативно-технічної документації.

В роботі представлено результати досліджень великої кількості конструкційних матеріалів на спеціальних випробувальних стендах в широкому діапазоні зміни швидкостей і температур газового потоку, що дало можливість правильно вибрати матеріали ТП для досягнення необхідної точності вимірювання в заданих технологічних умовах та напрацювання на ресурс.

У шостому розділі наведено результати експериментальних досліджень створених базових конструкцій ТП для вимірювання температури газових потоків.

На підставі розробленої автором методології, принципів та алгоритмів синтезу створено ряд базових конструкцій ТП для вимірювання температури газових потоків великого розмаїття об'єктів досліджень.

Для вимірювання температури газових потоків невеликих швидкостей (до 50 м/с) розроблено перетворювач термоелектричний типу ТПП-761-01, який призначений для тривалого вимірювання температури продуктів згоряння рідкого або газоподібного палива на вході в газотурбінну установку. Чутливим елементом служить платинородій/платинова термopара типу ПП(S). Діапазон вимірювання становить від 0 до 1300 °С, показник теплової інерції не перевищує 50 с. Допустиме значення основної похибки не перевищує ± 6 К. Захисний корпус ТП виконано із стопу ХН45Ю (ЕП 747), застосування якого забезпечує стабільність метрологічних характеристик протягом 4000 годин при температурі 1000...1350 °С. Для швидкостей потоку до 50 м/с значення швидкісної складової похибки $\Delta t_{\partial a}$ відносно невелике, тому захисний корпус виконано без камери гальмування.

Результати проведених автором експлуатаційних досліджень на Кам'янко-Бузькій газоперекачувальній станції УМГ «Львівтрансгаз» показали, що в порівнянні з серійними приладами, які використовувалися до впровадження ТП типу ТПП-761-01, похибка вимірювання зменшилася з ± 9 К при температурі 900 °С до $\pm 5,5$ К.

Промислове впровадження термоперетворювачів дозволило підвищити коефіцієнт завантаження технологічного обладнання на 10 % і провести дослідження з впливу градієнта температури на вході і виході установки на техніко-економічні показники процесу перекачування природного газу.

Термоперетворювач опору типу ТОП-5680 призначений для вимірювання температури гальмування повітря в аеродинамічних трубах. Швидкість повітряних потоків може змінюватися від 20 до 520 м/с при тиску від 30 до 600 кПа. Чутливим елементом служить платиновий термоопір з номінальною статичною характеристикою 10П, який поміщається в захисний корпус із сталі марки 12Х18Н10Т. Камера гальмування виконана у вигляді двох отворів діаметром 3 мм, розміщених за чутливим елементом і вибрана із розрахунку гальмування газового потоку.. Діапазон вимірювання – від мінус 50 до 650 °С. Допустиме значення основної похибки не перевищує ± 1 К в діапазоні від мінус 50 до 100 °С, ± 2 К в діапазоні від 100 до 350 °С і ± 3 К в діапазоні від 350 до 650 °С. Показник теплової інерції не більше 10 с і коефіцієнт відновлення при числах M в камері гальмування від 0,2 до 0,6 становить 0,96...0,97. Кріплення ТП до корпусу вимірювального зонда забезпечується зварюванням. Результати проведених автором експлуатаційних досліджень ТОП-5680 в аеродинамічній трубі Центрального інституту авіаційного двигунобудування (ЦІАД, м. Москва) показали, що похибка вимірювання температури гальмування повітря зменшилася в 1,4 рази в порівнянні із застосуванням ТП типу ТОП-0879, який раніше використовувався для таких вимірювань.

Малоінерційні перетворювачі термоелектричні типу ТІР-0182 призначені для вимірювання температури продуктів згоряння вуглеводневих палив при випробуваннях виробів на стендах. Для вимірювання розроблено два виконання конструкції з поздовжнім обтіканням потоком. Діапазон вимірюваних температур становить від 650 до 2100 °С; допустиме значення основної похибки становить не більше ± 40 К при температурі 2100 °С, при інших значеннях температури – не більше $\pm 1,5$ % від значення вимірюваної температури; показник теплової інерції – не більше 2 с; коефіцієнт відновлення – 0,96...0,98 при числах M в камері гальмування від 0,2 до 0,6.

Вимогам необхідної точності і температурного діапазону в окислювальному середовищі задовольняє тільки термopара з термоелектродами: додатній – іридій + 60 % родія (ІР60), від'ємний – іридій Ір. Статична характеристика перетворення – індивідуальна (ІР60/0). Оскільки статична характеристика є індивідуальною, то автором проводились градуювальні роботи для визначення її в температурному діапазоні від 600 до 2100 °С. Градування здійснювалося методом порівняння із зразковим ТП і реперній точці плавлення корунду. Методика індивідуального градування наведена в додатку роботи.

В виконанні 1 камера гальмування виконана шляхом пресування в пресформі з наступним обпалюванням порошку карбїду кремнію. Два вихідні отвори камери гальмування розміщені за гарячим зльотом на віддалі 3 мм. Діаметр отворів розраховано з необхідності гальмування газового потоку і забезпечення умов для досягнення постійного значення коефіцієнта відновлення. Розмір циліндричної захисної арматури – 5x1 мм. Термоелектроди ізолювані двоканальними трубками із оксиду берилію. Ізолювані термоелектроди і ізолятор в захисній арматурі встановлені на термоцементі Ф50. Кріплення ТП до корпусу вимірювального зонда забезпечується зварюванням.

В конструкції виконання 2 кожний термоелектрод ізолюється одноканальною трубкою із оксиду берилію і встановлюється в захисну арматуру. Отримана таким способом конструкція має поздовжній отвір на всю довжину корпусу, який і служить камерою гальмування ТП. Кріплення ТП здійснюється шляхом насаджування його на термозонд. Термоперетворювач утримується на термозонді силами тертя.

Термоперетворювачі ТІР-0182 були розроблені вперше для вимірювання температур до 2100 °С в окислювальному середовищі. Вони успішно застосовуються для дослідження об'єктів нової техніки на випробувальних стендах.

Крім вказаних ТП за участю автора розроблено інші варіанти конструкцій, захищених авторськими свідоцтвами на винаходи.

Основною конструктивною особливістю розроблених ТП є їх простота, технологічність у виготовленні. ТП успішно пройшли державні випробування і

технічна документація на них передана для серійного виготовлення на приладобудівних підприємствах.

Проведено термоциклічні і ресурсні випробування синтезованих ТП на випробувальних стендах, експериментально досліджено зміни коефіцієнта відновлення ТП в залежності від їх конструктивних особливостей і параметрів газового потоку. Встановлено, що коефіцієнт відновлення змінюється в невеликих межах і практично не залежить від відношення площ вхідних $F_{вх}$ і вихідних n_f отворів, через які газовий потік поступає в камеру гальмування і витікає з неї. Це означає, що запропонована методологія синтезу конструкцій ТП забезпечує постійність значень коефіцієнта відновлення в діапазоні заданих чисел M і відповідно постійність швидкісної складової похибки.

Визначено стабільність метрологічних характеристик конструкцій ТП в умовах впливу технологічних і експлуатаційних факторів. Експериментально встановлено температури і час старіння чутливих елементів, які усувають дефекти, що мали місце в чутливому елементі під час його виготовлення.

У **додатках** наведені методичні вказівки з індивідуального градування та визначення основної похибки іридійродій/іридієвих ТП, алгоритми розрахунку статичних характеристик перетворення ТП, програма розрахунку статичних характеристик перетворення іридійродій/іридієвих чутливих елементів, статична характеристика іридійродій/іридієвих чутливих елементів та акти впровадження результатів дисертації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладено теоретичне обґрунтування і вирішення науково-прикладної проблеми - розроблення концептуальних засад і науково-обґрунтованих методів створення комплексу первинних термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків з підвищеною точністю та надійністю, включаючи концепцію побудови математичних моделей та алгоритмів узагальненого синтезу оптимальних конструкцій термоперетворювачів із застосуванням нових термометричних та конструкційних матеріалів із спеціальними властивостями, високою стабільністю їх електрохімічних, хімічних та механічних властивостей в широкому діапазоні зміни температур. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. На підставі детального аналізу сучасного стану і теоретичних основ обґрунтовано основні чинники, які необхідно враховувати під час вибору методу вимірювання температури газових потоків в залежності від їх специфіки та параметрів. Показано, що найбільш повно вказаним чинникам відповідають електричні контактні методи вимірювання за допомогою термоперетворювачів опору і термоелектричних перетворювачів.

2. Сформовано основні завдання математичного моделювання термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків.

Термоперетворювачі представлено у вигляді трьох послідовно з'єднаних ланок (підсистем): газодинамічної, теплової та електричної із своїми операторами перетворення і своїми складовими похибки. Газодинамічна підсистема перетворює термодинамічну температуру газового потоку в температуру гальмування на вході в термочутливий елемент і характеризується “швидкісною” складовою похибки. Теплова підсистема перетворює цю температуру в рівноважну температуру термочутливого елемента і характеризується складовими похибки від різних видів теплообміну та похибки від наявності джерел енергії. Електрична підсистема перетворює рівноважну температуру у вихідний електричний сигнал. При такому представленні термоперетворювача зручно проводити поетапну оптимізацію за ланками його еквівалентної схеми.

3. Розроблено узагальнену математичну модель термоперетворювача, яка включає залежності, що пов'язують форми обтікання досліджуваного об'єкта, характер витікання і параметри газового потоку, умови його теплообміну через теплопровідність чутливого елемента з елементами конструкції, випроміненням з внутрішньою поверхнею камери гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком, що дозволило дослідити вплив параметрів газового потоку, умов теплообміну і конструктивних особливостей термоперетворювача на похибку вимірювання температури газового потоку.

4. Досліджено динамічні характеристики термоперетворювача в залежності від його геометричної форми і розмірів, властивостей матеріалу чутливого елемента та умов теплообміну, що дозволило розробити конструкторські і технологічні заходи для зменшення динамічної складової похибки під час вимірювання швидкозмінних температур газових потоків. Запропоновано в стандартах не нормувати жорстко динамічну характеристику у вигляді показника теплової інерції, а представляти її і в інших формах (перехідна характеристика, функція передачі, тощо).

5. Розроблено основні засади конструкторсько-технологічної оптимізації термоперетворювачів та їх окремих вузлів на стадії проектування, які полягають у виборі основних показників якості, критеріїв оптимальності та обмежуючих факторів в залежності від конкретних умов вимірювання, що дало можливість сформулювати основні вимоги до конструкції термоперетворювачів для досягнення заданого показника якості.

6. Розроблено заходи з оптимізації газодинамічної і теплової підсистем, які визначають умови для забезпечення постійності коефіцієнта відновлення термоперетворювача і застосування камер гальмування для зменшення швидкості обтікання чутливого елемента в порівнянні із швидкістю набігаючого потоку, а також врахування теплової взаємодії з елементами конструкції термоперетворювача, навколишніми тілами і середовищем, що дозволило мінімізувати швидкісну складову похибки і складові похибки від теплообміну через теплопровідність і випромінення.

7. Розроблено методологію та алгоритм узагальненого синтезу оптимальних конструкцій термоперетворювачів, який представляє собою певну послідовність операцій, і включає конкретні умови вимірювання, параметри газового потоку та поєднання способів зменшення всіх складових похибки, що дозволяє досягнути заданий показник якості і здійснювати автоматизоване машинне проектування із зменшенням вартості і термінами розроблення конструкції.

8. Обґрунтовано на підставі аналізу застосування методів порівняння зі зразковими засобами і постійних (реперних) точок - фазових переходів речовин для градування та перевірки метрологічних характеристик високотемпературних термоперетворювачів. Проведено аналіз складових похибки, що виникають під час перевірки, вказано шляхи їх зменшення та розроблено методику обчислення тривалості фазового переходу корунду, що дало змогу забезпечити граничну похибку результатів перевірки не більше ± 3 К.

9. Обґрунтовано на основі аналізу стану матеріалознавства взаємозв'язок основних параметрів термоперетворювачів з їх конструктивними особливостями і властивостями матеріалів, що в них застосовуються. Сформульовано рекомендації та розроблено критерій з вибору конструкційних матеріалів, які включають вимоги як до теплофізичних, механічних та електроізоляційних характеристик матеріалів, їх технологічності та сумісності між собою і досліджуваним газовим потоком, так і до однорідності і стабільності метрологічних характеристик, що дозволяє досягнути заданий показник якості.

10. Розроблено за запропонованою методологією базові конструкції термоперетворювачів типу ТПП-761-01, ТОП-5680, ТІР-0182, які серійно випускаються в Науково-виробничому об'єднанні "Термоприлад" ім. В.Лаха (м. Львів) та ППС.2-Т і ППС.Т-3, які серійно випускаються в НПВП "Техприлад" (м. Львів). В порівнянні до відомих серійних аналогів вони мають кращі метрологічні та експлуатаційні показники, що підтверджує правильність авторської концепції засад конструкторсько-технологічної оптимізації.

11. Експериментально досліджено зміни коефіцієнта відновлення термоперетворювача в залежності від його конструктивних особливостей і параметрів газового потоку. Встановлено, що коефіцієнт відновлення змінюється в невеликих межах і практично не залежить від відношення площ вхідних $F_{вх}$ і вихідних $n f$ отворів, через які газовий потік поступає в камеру гальмування і витікає з неї. Це означає, що запропонована методика синтезу конструкції забезпечує постійність значень коефіцієнта відновлення в діапазоні заданих чисел M і відповідно постійність швидкісної складової похибки.

12. Експериментально досліджено стабільність основних метрологічних характеристик чутливих елементів базових конструкцій термоперетворювачів в умовах впливу технологічних і експлуатаційних факторів. Це дозволило встановити температуру і час старіння чутливих елементів, які усувають дефекти, що мали місце в чутливому елементі під час його виготовлення.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фединець В.О. Засади конструкторсько-технологічної оптимізації перетворювачів температури високошвидкісних газових потоків / В. О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування". – 2007. - № 574. – С. 111-115.
2. Фединець В.О. Математична модель газодинамічної підсистеми перетворювачів температури газових потоків / В.О. Фединець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. - Вип. 68. – С. 108-111.
3. Фединець В.О. Оптимізація газодинамічної підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2009. - №659. - С. 68-73.
4. Фединець В.О. Дослідження математичної моделі теплової підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України . -2010. - Вип.20.2. – С. 266-271.
5. 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.
6. Фединець В.О. Мінімізація складової похибки від теплообміну через випромінення під час вимірювання температури газових потоків / Пістун Є.П., Фединець В.О. // "Метрологія та прилади". -2010. - №6, -С.34-37.
7. Фединець В.О. Мінімізація складової похибки від теплообміну через теплопровідність під час вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України . -2010. - Вип.20.3. – С. 275-280.
8. Фединець В.О. Дослідження динамічних характеристик термоперетворювачів для вимірювання температури газових середовищ / В.О. Фединець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. - Вип. 63. – С. 60-62.
9. Фединець В. О. Вплив захисних екранів термоперетворювача на похибку від випромінювання при вимірюванні температури газових потоків / В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2003. - №476. - С. 67-72.
10. Фединець В.О. Вплив конструктивних та експлуатаційних факторів на інерційність приймачів температури / В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – 2004. - №506. - С. 166-172.
11. Фединець В.О. Розрахунок оптимальних режимів повірки високотемпературних термоперетворювачів / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. - 2007. - Вип. 17.2. – С. 92 – 97.

12. Фединець В.О. Особливості метрологічної перевірки високотемпературних термоперетворювачів за допомогою реперних точок / В.О. Фединець // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2007. – Вип. 67. – С. 65 – 69.

13. Фединець В.О. Оцінка температури фазового переходу корунду під час повірки високотемпературних термоперетворювачів / В.О. Фединець // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні". – 2007. - № 583. – С. 134 – 137.

14. Фединець В.О. Вимірювання швидкозмінних температур газових потоків шляхом введення поправок у покази приймачів температури / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України . - 2007. - Вип.17.5. – С. 217-220.

15. Фединець В.О. Критерій вибору тепло- та електроізоляційних матеріалів для високотемпературних приймачів температури / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету. - 2008. - Вип.18.3. – С. 130 – 133.

16. Фединець В. Зменшення похибки від теплопровідності під час вимірювання температури газових потоків / Василь Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація". – 2005. - №537. - С. 158-161.

17. Фединець В.О. Дослідження тепло- та електроізоляційних матеріалів для засобів вимірювання температури газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету. - 2011. - Вип.21.1. – С. 126 – 130.

18. Фединець В.О. Експериментальні випробування термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків на ресурс / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету. - 2011. - Вип.21.2. – С. 128 – 131.

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

20. Фединець В.О. Аналіз методів вимірювання швидкозмінних температур газових потоків / В.О. Фединець // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України . -2007. - Вип.17.4. – С. 245-249.

21. Фединец В.А. Термопреобразователи сопротивления: международные требования и нормы / В.А. Фединец, И.П. Куритный, В.М. Самолетов // Контрольно-измерительная техника. – 1988. - №44. – С. 65-70.

22. Фединець В.О. Про організацію центру з обліку та раціонального використання енергоресурсів / Є.П. Пістун, В.О. Фединець // Вісн. НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація". – 1997. - №318. - С. 67-68.

23. А.с. 1610313 СССР, МКИ² G 01 K 13/08. Устройство для измерения температур вращающихся объектов /П.И. Ванкевич В.А. Фединец, И.В. Кузьо, Б.В. Панкевич (СССР) . № 4647886/24-10 ; заявл. 26.12.88 ; опубл. 30.11.90, Бюл. № 44.

24. А.с. 1742643 СССР, МКИ² G 01 K 13/08. Устройство для измерения температур вращающихся объектов /П.И. Ванкевич В.А. Фединец, И.В. Кузьо, В.А. Пашистый, И.П. Куритный (СССР) . - № 4788643/10 ; заявл. 07.02.90 ; опубл. 23.06.92, Бюл. № 23.

25. А.с. 1747951 СССР, МКИ² G 01 K 13/08. Устройство для измерения температур вращающихся объектов /П.И. Ванкевич В.А. Фединец, И.В. Кузьо, И.П. Куритный, В.А. Пашистый - № 4815205/10 ; заявл. 17.04.90 ; опубл. 15.07.92, Бюл. № 26.

26. А.с. 1779952 СССР, МКИ² G 01 K 13/08. Устройство для измерения температур вращающихся объектов /П.И. Ванкевич В.А. Фединец, И.В. Кузьо, В.А. Пашистый, И.П. Куритный (СССР) . - № 4852343/10 ; заявл. 17.04.90 ; опубл. 07.12.92, Бюл. № 45.

27. Фединець В. Вплив конструкції і способу монтажу первинних термоперетворювачів на похибку вимірювання температури енергоносіїв в трубопроводах / Василь Фединець // Системи транспортування, контролю якості та обліку енергоносіїв : 1-а Міжнар. наук.-практ. конф.: матеріали доп. – Львів: 1998. - С. 242-246.

28. Фединець В.О. Дослідження динамічних характеристик термоперетворювачів для вимірювання температури газових середовищ / В.О. Фединець // “Температура-2003”:VIII-ма міжнар. конф., 17-19 вересня 2003.: зб. матер. - Львів, 2003.- С. 104.

29. Фединець В.О. Конструкторсько-технологічна оптимізація термоперетворювачів для вимірювання температури газоподібних енергоносіїв / В.О. Фединець // „Вимірювання витрати та кількості газу”: всеукр. наук.-техн. конф., 17 - 20 травня 2005.: матеріали конф. - Івано-Франківськ, 2005. –С. 65.

30. Фединець В.О. Математична модель газодинамічної підсистеми перетворювачів температури газових потоків / В.О. Фединець // Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях МСМ 07 : XV-й міжнар. сем. метрол., 24 – 27 вер. 2007 р. : зб. матер. – Львів – Ряшів, 2007. – С. 20.

31. Фединець В.О. Оптимізація газодинамічної підсистеми приймачів для вимірювання температури газоподібних енергоносіїв /В.О. Фединець // ”Проблеми економії енергії”: 5-а міжнар. наук.-практ. конф., , 23 – 24 жовтня 2008.: - зб. праць. –Львів, 2008. - С. 361 – 363.

32. Фединець В.О. Математична модель теплової підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газоподібних енергоносіїв / В.О. Фединець // „Вимірювання витрати та кількості газу”: 6-а всеукр. наук.-техн. конф., 20 - 21 жовтня 2009.: зб. тез доп. - Івано-Франківськ, 2009. –С. 36 – 37.

33. Фединець В.О. Алгоритм розрахунку функції перетворення термоперетворювачів для вимірювання температури газоподібних енергоносіїв/ В.О. Фединець, М.П. Кулик // „Вимірювання витрати та кількості газу”: 7-а всеукр. наук.-техн. конф., 25 - 27 жовтня 2011.: зб. тез доп. - Івано-Франківськ, 2011. –С. 78.

АНОТАЦІЯ

Фединець В.О. Теорія і практика вимірювання температури газових потоків контактними методами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05. 11. 04. - „Прилади та методи вимірювання теплових величин” – Національний університет „Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Львів, 2012.

Дисертація присвячена теоретичним та практичним основам вимірювання температури газових потоків контактними методами. В дисертації вирішена наукова прикладна проблема створення комплексу первинних термоперетворювачів (ТП) для вимірювання температури газових потоків з підвищеною точністю та надійністю. Розроблено математичну модель ТП, на основі її аналізу запропоновано порядок і алгоритм синтезу елементів оптимальної конструкції ТП, який представляє собою певну послідовність операцій, що включає конкретні умови вимірювання, параметри газового потоку та поєднання способів зменшення всіх складових похибки.

Розглянуто умови перевірки метрологічних характеристик ТП, проаналізовано складові похибки, що можуть виникати під час перевірки та обґрунтовано шляхи їх зменшення. Розроблено критерій вибору конструкційних матеріалів, базові конструкції ТП та їх експериментальні дослідження, які в порівнянні до серійних аналогів мають кращі метрологічні та експлуатаційні характеристики.

Основні результати роботи знайшли практичне застосування в проектних організаціях під час синтезу конструкцій ТП для вимірювання температури газових потоків під задані технологічні умови та створення метрологічного забезпечення їх використання в умовах різних галузей промисловості, в наукових дослідженнях, навчальному процесі.

Ключові слова: вимірювання, температура, термоперетворювач, математична модель, газовий потік, оптимізація, теплообмін, перевірка метрологічних характеристик.

АННОТАЦИЯ

Фединец В.А. Теория и практика измерения температуры газовых потоков контактными методами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.04. - „Приборы и методы измерения тепловых величин” – Национальный университет „Львовская политехника” Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Львов, 2012.

Диссертация посвящена теоретическим и практическим основам измерения температуры газовых потоков контактными методами. В диссертации решена научная прикладная проблема создания комплекса первичных

термопреобразователей (ТП) для измерения температуры газовых потоков с повышенной точностью и надежностью. Разработана математическая модель ТП, на основе ее анализа предложен порядок и алгоритм синтеза элементов оптимальной конструкции ТП, который представляет собой определенную последовательность операций, включающих конкретные условия измерения, параметры газового потока и сочетания способов уменьшения всех составляющих погрешности.

Рассмотрены условия проверки метрологических характеристик ТП, проанализированы составляющие погрешности, которые могут возникать во время проверки и обоснованно пути их уменьшения. Разработан критерий выбора конструкционных материалов, базовые конструкции ТП и проведены их экспериментальные исследования, которые по сравнению с серийными аналогами имеют лучшие метрологические и эксплуатационные характеристики.

Основные результаты работы нашли практическое применение в проектных организациях во время синтеза конструкций ТП для измерения температуры газовых потоков под заданные технологические условия и создания метрологического обеспечения их использования в условиях разных отраслей промышленности, в научных исследованиях, учебном процессе.

Ключевые слова: измерение, температура, термопреобразователь, математическая модель, газовый поток, оптимизация, теплообмен, проверка метрологических характеристик.

SUMMARY

Fedynets V.O. Theory and practice of taking temperature of gas streams by contact methods. – As a manuscript.

The thesis for obtaining scientific degree of the doctor of technical sciences by speciality 05.11.04. - devices and methods of measurement of thermal values – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education, Science, Youth and Sports of Ukraine, L'viv, 2012.

The dissertation is dedicated theoretical and practical bases of measuring of temperature of gas streams contact methods. In dissertation the scientific applied problem of creation of complex of primary receivers of temperature (RT) is decided for measuring of temperature of gas streams with enhanceable exactness and reliability. The mathematical model of RT, which is presented as three consistently united lanocs, is developed (subsystems): gasdynamical, thermal and electric. A gasdynamical subsystem converts the thermodynamics temperature of gas stream into the temperature of braking on included in a pickoff and characterized the “speed” constituent of error. A thermal subsystem converts this temperature into the balanced temperature of a pickoff and characterized the constituents of error from the different types of heat exchange and error from the presence of energy sources in RT. An electric subsystem converts the balanced temperature into a weekend electric signal.

General principles of design-engineering optimization of RT and certainly basic indexes of quality (criteria of optimum) are developed and limiting factors depending on external environments. Measures are offered on optimization of gasdynamical subsystem of RT after the criterion of a minimum of speed component error. The constituents of mathematical model of thermal subsystem are analysed. Certainly terms for which component errors from a heat exchange through a heat-conducting and radiation are minimum.

On the basis of the conducted theoretical and experimental researches designer and technological measures are offered for diminishing of dynamic component error during measuring of quickly changing temperatures of gas streams.

An order and algorithm of development of elements of optimum construction of RT is offered, which is a certain sequence of operations of, which includes the concrete terms of measuring, parameters of gas stream and combination of methods of diminishing of all of constituents of error.

The terms of verification of RT are considered for measuring of temperature of gas streams by the method of comparing to exemplary RT. Component errors which can arise up during test and grounded ways of their diminishing are analysed. The analysis of features of verification of TP is conducted by the system of permanent points – phase transitions of matters. The simplified method of calculation of duration of 'plateau' of phase transition of corundum is developed.

Grounded intercommunication of basic parameters of RT with their structural features and properties of materials, that in them used. The criterion of choice of structural materials, which takes into account a number of requirements both to properties of materials, their technologicalness and compatibility between itself and by the probed gas stream and to stability of metrology descriptions in the process of their exploitation, is developed.

The base constructions of RT, which in comparison to the serial analogues have the best metrology and operating indexes, are developed.

Experimentally investigational changes of coefficient of proceeding in RT depending on their structural features and parameters of gas stream. It is set that the coefficient of renewal changes in small limits and practically does not depend on the relation of areas of the entrance and initial openings through which a gas stream enters chamber of braking and follows from it. It means that the method of constructing is offered provides constancy of values of coefficient of renewal in the range of the set numbers of Mach M and accordingly constancy of speed component error.

Certainly stability of metrology descriptions of pickoffs of base constructions of RT in the conditions of influence of technological and operating factors. A temperature and time of senescence of pickoffs, which remove defects which took a place in a pickoff during his making, is experimentally set.

On the basis of the got results a conclusion is done about perspective of the offered conception of creation of base constructions of RT for measuring of temperature of gas streams in different industries of industry.

Basic job performances found practical application in project organizations during development of constructions of RT for measuring of temperature of gas streams under the set technological terms and creations of the metrology providing of their use in the conditions of different industries of industry, in scientific researches, educational process.

Key words: measuring, temperature, receivers of temperature, mathematical model, gas stream, optimization, heat exchange, verification of metrology descriptions.