

5.4 Оптимізація теплової підсистеми термоперетворювачів для вимірювання температури газових потоків

Похибка вимірювання температури газових потоків контактними методами складається із двох основних складових: 1) похибки, що виникає в процесі вимірювання фізичної величини, в яку перетворена температура (похибка засобів вимірювання); 2) похибки, що виникає в процесі перетворення температури у вимірювану фізичну величину з допомогою термоперетворювача (ТП). Ця складова похибки має повністю тепловий характер і визначається умовами теплового балансу між досліджуваним газовим потоком і ТП та має найбільший вплив на загальну похибку вимірювання. Вона визначається сукупною дією таких чинників: тепловіддачею через випромінення до термоперетворювача або від нього; тепловідведенням від термоперетворювача за рахунок теплопровідності; перетворенням частини кінетичної енергії газового потоку в теплову в пристінному шарі, що оточує термоперетворювач; конвективним перенесенням тепла із пристінного шару до чутливого елемента термоперетворювача [220]. Відмітимо також, що якщо температура газового потоку є нестационарною, то за рахунок власної теплоємності термоперетворювача він не встигає реєструвати змінну в часі температуру потоку. За рахунок цього під час вимірювання нестационарних температур виникає динамічна складова похибки вимірювання [221].

Основним тепловим впливом, що діє на ТП під час вимірювання, є вплив газового потоку, температуру якого необхідно виміряти. Завдання, які необхідно вирішувати в процесі конструювання ТП зводяться до створення таких умов в ньому, при яких дією всіх видів теплових впливів на чутливий елемент ТП, крім основного, можна знехтувати. Для вирішення такого завдання необхідно проаналізувати кожен складову теплообміну і визначити умови, при яких складові похибки від цього виду теплообміну були б мінімальними. Після такого аналізу під час конструювання ТП необхідно повністю використати всі можливості зменшення кожної складової похибки.

Дослідження сукупного впливу всіх теплових чинників, що діють на ТП, практично неможливе, оскільки їх теоретична оцінка в більшості випадків має тільки наближений характер, а деякі можна визначити тільки експериментально. Тому для проведення аналізу всіх складових похибки, ТП для вимірювання температури газових потоків представлено у вигляді трьох послідовно з'єднаних підсистем: газодинамічної, теплової та електричної [222,223]. Таке представлення ТП дає змогу здійснювати оптимізацію складових похибки кожної підсистеми, а загальну похибку вимірювання визначати як суперпозицію цих складових. Газодинамічна підсистема перетворює температуру газового потоку, що поступає на вхід ТП, в температуру гальмування на вході в камеру гальмування ТП. Оптимізація газодинамічної підсистеми і складової похибки, що виникає в ній, детально досліджено в [223]. Теплова підсистема перетворює температуру гальмування у температуру чутливого елемента і характеризується складовими похибки від теплообміну через теплопровідність в елементах конструкції ТП, теплообміном випроміненням в камері гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком [224]. Електрична підсистема перетворює цю температуру у вихідний сигнал, що фіксується вимірювальним приладом. Необхідно відмітити, що вимірювання температури газових потоків відносять до спеціальних вимірювань і тому відсутня велика кількість публікацій з цих питань.

Метою дослідження є оптимізація теплової підсистеми для мінімізації складових похибки, що виникають від умов теплообміну між досліджуваним газовим потоком і ТП.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати теоретичні та експериментальні дослідження складових похибки вимірювання температури газового потоку від теплообміну через теплопровідність в елементах конструкції ТП, теплообміну випроміненням в камері гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком та проаналізувати алгоритм їх мінімізації під час розроблення конструкції ТП.

Теплообмін ТП, призначених для вимірювання температури газових потоків, зумовлений теплообміном через теплопровідність чутливого елемента з елементами конструкції ТП, теплообміном через випромінення з внутрішньою поверхнею камери гальмування ТП і конвективним теплообміном з досліджуваним газовим потоком. Необхідно відмітити, що окремі залежності, якими описують вплив чинників на умови теплообміну, мають наближений характер. Тому аналітичне дослідження сукупного впливу основних чинників на загальну похибку вимірювання з практичної точки зору неможливе. На основі вище наведеного будемо аналізувати кожен складову похибки окремо з допущенням, решта складових відсутні. В цьому випадку загальну похибку вимірювання можна трактувати як суперпозицію складових похибок.

Математична модель теплової підсистеми. Математична модель теплової підсистеми відповідає математичній моделі теплообміну чутливого елемента, яка повинна складатися з врахуванням його теплової взаємодії з елементами конструкції ТП, навколишніми тілами і газовим потоком, а також можливою наявністю внутрішніх джерел тепла.

При розробленні математичної моделі теплової підсистеми ТП можна розглядати як однорідне ізотропне тіло. Для таких умов математична модель теплообміну може бути представлена у вигляді рівняння нестационарної теплопровідності Фур'є [225]:

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

де C_V , λ - відповідно об'ємна теплоємність і теплопровідність матеріалів чутливого елемента; div і grad – операції дивергенції і градієнту; 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 (1) стане лінійним і прийме вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) + \frac{1}{C_V} \omega, \quad (2)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності матеріалу чутливого елемента.

Рівняння (2) є узагальненою математичною моделлю теплової підсистеми ТП.

Як вказувалося вище, теплообмін ТП для вимірювання температури газових потоків обумовлений теплообміном через теплопровідність чутливого елемента з елементами конструкції ТП, теплообміном випромінювання з внутрішньою поверхнею камери гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком. Розглянемо методи впливу на складові похибки, обумовлені кожною складовою теплообміну.

Складова похибки за рахунок теплообміну через теплопровідність. Під час вимірювання температури газових потоків ТП певним чином повинні закріплюватися в деякій арматурі (трубопроводи, резервуари, тощо) температура якої в загальному випадку відрізняється від температури газового потоку. Внаслідок цього розподіл температур по довжині ТП буде нерівномірним. Через тепловідведення по корпусу ТП і з'єднувальних чи термоелектродних провідниках температура чутливого елемента $t_{че}$ буде відрізнятися від дійсної температури газового потоку t_0 .

Кількісна оцінка цього явища може бути одержана із аналізу теплового балансу ТП при дії на чутливий елемент тільки конвективного теплового потоку і відведенні тепла до місця закріплення. Вплив тепловідведення на температуру чутливого елемента ТП можна розглядати як процес теплообміну між газовим потоком і ТП, виконаним у вигляді однорідного стержня, який консольно закріплюється на стінці арматури з температурою t_{cm} .

При побудові математичної моделі приймаємо *такі допущення*:

- тепловий вплив чутливого елемента на елементи конструкції ТП не враховується;
- тепловий контакт торцевої поверхні чутливого елемента з елементами кріплення є абсолютним, тобто відсутній тепловий опір;
- зміна температури ТП (стержня) $t(x)$ в радіальному напрямку не враховується, а тільки вздовж його осі і в кожному поперечному січенні залишається постійною.

Рівняння теплообміну для такого ТП має вигляд:

$$\frac{d^2 t_n(x)}{dx^2} - \nu^2 [t_0 - t_n(x)] = 0, \quad (3)$$

де $\nu^2 = \frac{\alpha U}{\lambda S}$; α – повний коефіцієнт теплообміну між ТП і потоком; U і S – відповідно периметр і площа поперечного перерізу ТП; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ТП.

Допускаємо, що теплом, яке поступає через торець ТП при $x=0$ можна знехтувати в порівнянні з теплом, що поступає через його бокову поверхню і що температура ТП при $x=L$ дорівнює температурі стінки t_{cm} :

$$\frac{dt_n(x)}{dx} = 0 \text{ при } x=0; \quad t = t_{cm} \text{ при } x = L \quad (4)$$

Приймаючи, що коефіцієнт ν не залежить від температури потоку і координати x , з врахуванням (4) дістанемо:

$$\frac{t_0 - t_n(x)}{t_0 - t_{cm}} = \frac{ch\nu x}{ch\nu L}. \quad (5)$$

Складова похибки вимірювання Δt_m за рахунок тепловідведення через теплопровідність при розміщенні чутливого елемента ТП в точці $x=0$ (наприклад, спай термопари) визначиться залежністю:

$$\Delta t_m = t_n - t_0 = -\frac{t_0 - t_{cm}}{ch\mu}, \quad (6)$$

$$\text{де} \quad \mu = \nu L = L \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda S}} \quad (7)$$

Виразивши U і S через діаметр ТП d одержимо:

$$\Delta t_m = t_n - t_0 = -\frac{t_0 - t_{cm}}{chL \sqrt{\frac{4\alpha}{d\lambda}}}. \quad (8)$$

Рівняння (8) є вихідним для оцінки складової похибки вимірювання температури газового потоку від теплообміну через теплопровідність.

Методи впливу на складову похибки за рахунок теплообміну через теплопровідність. З рівняння (8) видно, що значення даної складової похибки можна зменшити такими способами:

- зменшенням різниці температур ($t_0 - t_{cm}$);
- збільшенням глибини занурення L ТП в газовий потік;

- зменшенням діаметра ТП, термоелектродних і з'єднувальних провідників, а також вибирати їх з малою теплопровідністю;
- збільшенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі від газового потоку до чутливого елемента ТП.

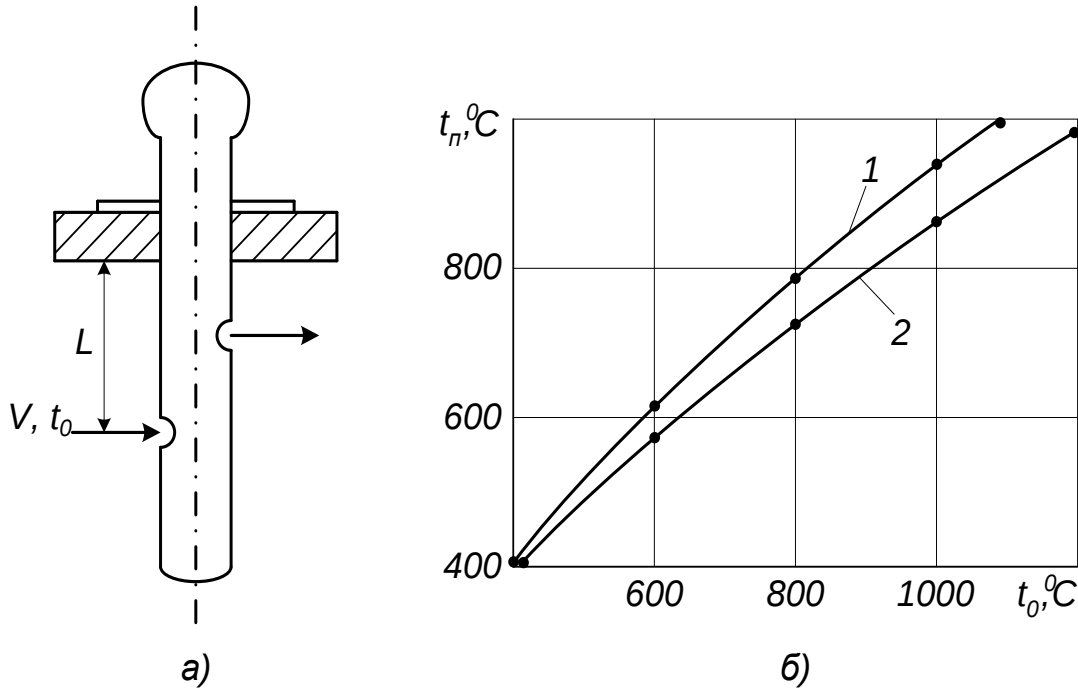
Зменшення різниці температур ($t_o - t_{cm}$) практично здійснити важко. В основному це можна досягнути тільки за рахунок електричного підігрівання стінки, на якій закріплюється ТП. Такий захід дозволяє практично повністю виключити складову похибки Δt_m від теплообміну через теплопровідність, але це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

Температура t_{cm} визначається взаємодією виступаючої частини ТП із зовнішнім середовищем, в якому він встановлюється. Оскільки температура t_{cm} залежить від інтенсивності теплообміну виступаючої частини ТП, що розміщена поза газовим потоком, з навколишнім середовищем, необхідно виступаючу частину, по можливості, конструювати як найменших розмірів і теплоізолювати її від навколишнього середовища. Таку теплову ізоляцію можна досягнути шляхом розміщення між стінкою і корпусом ТП прокладок із матеріалу з низькою теплопровідністю (наприклад текстоліту, склотекстоліту, азбоцементу, тощо) або розміщення навколо виступаючої частини ТП нетеплопровідних екранів.

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 випромінювання і перетворення частини кінетичної енергії в теплову. Тобто, зміною глибини занурення ТП можна тільки послабити тепловідведення через корпус.

Розглянемо вплив глибини занурення на покази ТП, конструкція якого схематично зображена на мал. 1а. Корпус ТП виготовлено із нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т, для якої коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 27,6$ Вт/(м·К).

Глибина занурення становила $L_1 = 100\text{мм}$ і $L_2 = 20\text{мм}$. Чутливим елементом служила термопара з номінальною статичною характеристикою типу К згідно [226]. При $L_1 = 100\text{мм}$ похибка від тепловідведення по корпусу для температури газового середовища $t = 1000^\circ\text{C}$ становила $\approx 3\%$, а при $L_2 = 20\text{мм}$ ця похибка зросла до $\approx 7\%$ (мал. 1б).



Малюнок 1. Розрахункова схема (а) та залежність (б) показів ТП від температури потоку для різних глибин занурення: 1 – $L = 100\text{ мм}$; 2 – $L = 20\text{ мм}$.

Для зменшення похибки Δt_m доцільно використовувати термоелектроди з малою теплопровідністю. Це дає змогу 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.

Під час обтікання газовим потоком твердого тіла біля його поверхні утворюється пристінний шар, в межах якого швидкість середовища зменшується від значення, що дорівнює швидкості набігаючого потоку, до нуля. Кількість тепла, що переноситься від середовища до твердого тіла буде визначатися

коефіцієнтом конвективної тепловіддачі α , який залежить від критерію Рейнольдса, геометричних параметрів ТП і параметрів газового потоку.

За результатами багатьох досліджень і за дослідженнями автора, при дозвукових швидкостях потоку в діапазоні зміни Re від 100 до 10000 можна рекомендувати такі емпіричні залежності, що характеризують теплообмін між ТП і газовим потоком :

- для круглих циліндричних ТП, що поперечно омиваються потоком

$$Nu = (0,44 \pm 0,06) Re^{0,5}, \quad (9)$$

а для повздовжнього обтікання

$$Nu = (0,085 \pm 0,009) Re^{0,674}. \quad (10)$$

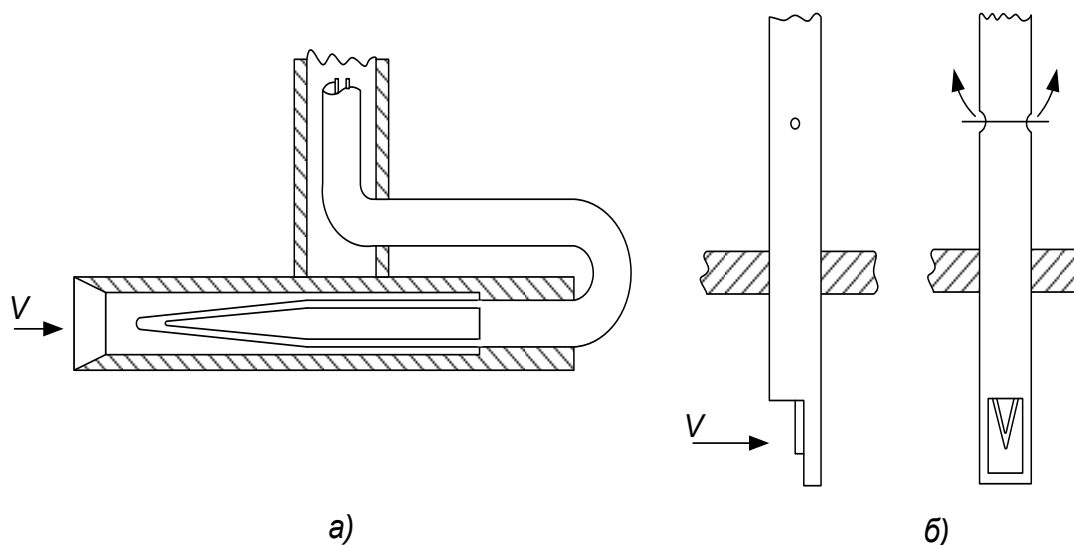
Залежності (9) і (10) охоплюють температурний діапазон від 15 до 1620 °C і числа Маха M від 0,015 до 0,9. Ці дані можуть бути використані під час синтезу ТП з камерами гальмування, в яких швидкість газового потоку завжди відповідає числу $M < 1$.

Значення коефіцієнта тепловіддачі α можна регулювати зміною діаметра ТП та швидкістю потоку всередині камери гальмування. Але коефіцієнт α може змінюватися у відносно невеликих межах, оскільки зменшення діаметра ТП призводить до зменшення його механічної міцності, а збільшення швидкості в камері гальмування призведе до збільшення швидкісної похибки, обумовленої неповним перетворенням кінетичної енергії рухомого газу в теплову в пристінному шарі, що оточує чутливий елемент ТП і яка є основною для газодинамічної підсистеми ТП [223]. Отже, існує деякий оптимум для результуючої дії вказаних чинників.

Результати теоретичних розрахунків показують, що при зменшенні числа Рейнольдса (і, відповідно, при зменшенні інтенсивності конвективного теплообміну) необхідно збільшувати глибину занурення ТП в газовий потік. Рекомендоване відношення L/d може знаходитись в межах від 20 до 50 і є достатнім для практично повного усунення похибки від тепловідведення.

На мал. 2 показані типові конструкції ТП, призначені для послаблення тепловідведення від чутливого елемента. В ТП, зображеному на мал. 3а довжина

робочої частини дорівнює 50 діаметрам термоелектродів, що забезпечує послаблення тепловідведення від корпусу.



Малюнок 2. Типові конструкції ТП для зменшення тепловідведення через теплопровідність

Наявність отворів з достатньо великим віддаленням їх від спаю чутливого елемента в ТП, зображеному на мал. 2б, збільшує умовну глибину занурення, що особливо важливо в умовах обмеженості робочого простору для встановлення ТП. Як правило, такий ТП придатний для експлуатації тільки при відсутності теплообміну випромінюванням, оскільки в його конструкції не передбачено екранування. В ТП даної конструкції похибка від тепловідведення зменшується завдяки тому, що газовий потік обтікає термоелектроди термопари на достатньо великому проміжку від спаю до вихідних отворів.

Складова похибки за рахунок теплообміну через випромінення. Під час аналізу теплообміну через випромінення допускалося, що в тепловому балансі ТП приймають участь тільки два види теплообміну – конвективний і випроміненням.

При обтіканні газовим потоком чутливий елемент ТП за рахунок конвективної теплопередачі від потоку до поверхні отримує за одиницю часу кількість теплоти Q_1 , яка визначається виразом:

$$Q_1 = \alpha F_n (t_o - t_n), \quad (11)$$

де F_n – площа поверхні частини ТП, зануреної в газовий потік.

Цей вплив газового потоку на ТП є корисним впливом.

Величина теплового потоку Q_2 , яка віддається поверхнею зануреної частини ТП шляхом теплообміну випроміненням з поверхнями стінок, що оточують потік, визначається залежністю:

$$Q_2 = \frac{\sigma \varepsilon_n F_n}{\xi} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ct}}{100} \right)^4 \right] \quad (12)$$

де σ – постійна Стефана-Больцмана; ε_n – повний коефіцієнт чорноти поверхні ТП; ξ – коефіцієнт зменшення теплових втрат випроміненням за рахунок обтікання ТП газовим потоком; T_n , T_{ct} – відповідно термодинамічні температури чутливого елемента ТП і оточуючих стінок.

Вирішуючи рівняння (11) і (12) при допущенні, що втрати тепла через інші причини, крім випромінювання, відсутні, отримуємо залежність для визначення складової похибки Δt_g за рахунок випромінення:

$$\Delta t_g = t_n - t_0 = \frac{\sigma \varepsilon_n}{\alpha \xi} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ct}}{100} \right)^4 \right]. \quad (13)$$

Методи впливу на складову похибки за рахунок теплообміну через випромінення. Із рівняння (13) видно, що складову похибки, обумовлену випроміненням, можна оптимізувати зміною трьох параметрів: повного коефіцієнта чорноти ε_n , коефіцієнта конвективної тепловіддачі α і температури оточуючих стінок T_{ct} .

Для зменшення складової похибки Δt_g доцільно використовувати термоелектродні і конструкційні матеріали з низьким і стабільним при різних зовнішніх умовах коефіцієнтом чорноти. Але в цих умовах конструктор буває дуже обмежений у виборі, оскільки 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. Тим не менше і в цих випадках похибка від випромінення може бути зменшена шляхом нанесення на основний матеріал покриття із таких металів з малим значенням коефіцієнта

чорноти, як срібло (0,05), золото (0,05), або платина (0,18). В [224] показано, що при використанні таких покриттів похибка, обумовлена випроміненням, може становити лише 13% похибки, що має місце для аналогічних умов в конструкції без покриття. До недоліків покриттів слід віднести те, що з часом вони руйнуються і втрачають свою ефективність.

Що відноситься до збільшення коефіцієнта конвективної тепловіддачі α , то тут справедливі всі судження, наведені вище, згідно яких коефіцієнт тепловіддачі може змінюватися у відносно невеликих межах.

Основним засобом впливу на складову похибки, обумовлену випроміненням, є підвищення температури стінки t_{cm} . При рівності температур газового потоку і стінки втрати за рахунок випромінення виключаються повністю. Однак практично реалізувати цю умову дуже складно. 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. Захищений екраном чутливий елемент буде втрачати менше тепла, ніж при відсутності екрана і його температура буде ближчою до температури газового потоку. При наявності холодних стінок в теплообміні випроміненням з ними бере участь екран, а вже з екраном взаємодіє чутливий елемент ТП.

Картина теплообміну випроміненням в екранованих ТП з поздовжнім і поперечним обтіканням газовим потоком, питання розрахунку кількості екранів, необхідних для того, щоб складова похибки від випромінення не перевищувала задане значення, а також застереження, які необхідно враховувати під час конструювання екранованих ТП, детально описані в [224].

Необхідно зазначити, що не всі складнощі, які створюються впливом випромінення, піддаються усуненню шляхом тільки встановлення додаткових екранів. Якщо швидкість газового потоку є дуже малою або якщо пред'являються досить жорсткі вимоги до точності вимірювання, то кількість

необхідних екранів значно зросте, конструкція ТП стане громіздкою і в більшості випадків практично її реалізувати буде неможливо. В таких випадках можна рекомендувати використання електричного підігрівання внутрішнього екрана або підвищити швидкість протікання газового потоку всередині ТП між екранами з допомогою зовнішніх пристроїв (відсмоктуючих пірометрів). Але при використанні зовнішнього відсмоктування необхідно враховувати можливе збільшення швидкісної похибки.

Висновки. Аналіз математичної моделі теплової підсистеми ТП для вимірювання температури газових потоків показує, що теплообмін в підсистемі здійснюється через теплопровідність чутливого елемента з елементами конструкції ТП, випроміненням з внутрішньою поверхнею камери гальмування і конвективним теплообміном з газовим потоком. В статті наведено методи впливу на складові похибки, обумовлені кожною складовою теплообміну. Для зменшення складової похибки за рахунок теплообміну через теплопровідність доцільно застосовувати такі способи: зменшувати різницю між температурами газового потоку і оточуючих стінок, в яких розміщено ТП; збільшувати глибину занурення ТП в газовий потік; зменшувати діаметр ТП, термоелектродних і з'єднувальних провідників, а також вибирати їх з малою теплопровідністю; збільшувати коефіцієнт конвективної тепловіддачі від газового потоку до чутливого елемента ТП. Зменшення складової похибки за рахунок теплообміну через випромінення здійснюють зміною повного коефіцієнта чорноти, коефіцієнта конвективної тепловіддачі і температури оточуючих стінок.