

6.5 Вплив конструкції і способу монтажу первинних термоперетворювачів на похибку вимірювання температури плинних енергоносіїв

При транспортуванні трубопроводами плинні енергоносії піддаються багатфакторним впливам температури і тиску, що призводить до зміни їх густини. Додаткові похибки, що виникають при цьому, можуть досягати значних величин, особливо при вимірюванні витрати або кількості газоподібних енергоносіїв. Одним із шляхів зменшення цих похибок є оснащення витратомірів і вимірювачів кількості автоматичними пристроями, що коректують їх покази на зміну температури і тиску (або густини). В свою чергу ці пристрої також повинні забезпечувати незначні відхилення параметрів від їх дійсних значень. Розглянемо фактори виникнення похибок і шляхи їх зменшення при вимірюванні температури плинних енергоносіїв, що транспортуються трубопроводами.

Під час вимірювання температури тепло передається від досліджуваного середовища через захисну арматуру первинного термоперетворювача (ПТ) до його чутливого елемента, який фіксує температуру цього середовища. Але при цьому проходить також теплообмін між чутливим елементом і елементами захисної арматури в поздовжньому напрямку, оскільки між ними і вимірюваним середовищем існує перепад температур. Внаслідок цього виникає відхилення виміряної температури від її дійсного значення. Ці відхилення визначають похибку вимірювання, що виникає в процесі перетворення температури у вимірювану фізичну величину з допомогою ПТ. Ця складова похибки має повністю тепловий характер і визначається умовами теплового балансу між досліджуваним газовим потоком і ПТ та має найбільший вплив на загальну похибку вимірювання. 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. Цим визначаються динамічні характеристики ПТ (час установлення показів, показник теплової інерції).

Для повного виключення або підтримання цих відхилень в допустимих межах необхідно використовувати для конкретних вимірювань найбільш конструктивно придатний для цієї мети ПТ. Питання, які необхідно враховувати при конструюванні, виборі і монтажі ПТ, витікають із законів теплопередачі.

При вимірюванні температури газоподібних енергоносіїв і пари низького тиску похибка, яка має тепловий характер, може досягати великих значень.

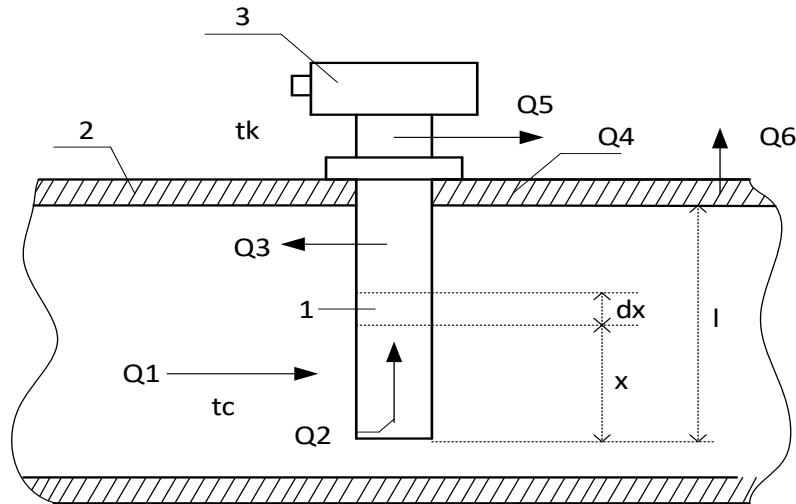
Розглянемо спрощену схему теплових потоків ПТ із захисною арматурою, який вмонтований в трубопровід і знаходиться в тепловому контакті з ним, для випадку, коли температура навколишнього середовища є нижчою від температури енергоносія в трубопроводі (малюнок 1). Тепловий потік Q_1 від досліджуваного середовища до захисної арматури передається в результаті конвективного теплообміну. Через захисну арматуру і чутливий елемент в результаті теплопровідності до місця закріплення ПТ на трубопроводі направлений тепловий потік Q_2 .

Тепловий потік Q_3 відводиться в результаті випромінення між захисною арматурою ПТ і стінкою трубопроводу. Від місця закріплення захисної арматури частина теплового потоку Q_2 передається в радіальному напрямку в стінку трубопроводу (потік Q_4), а інша частина відводиться через захисну арматуру ПТ, що виступає з трубопроводу, і головку в навколишнє середовище (потік Q_5). В результаті конвективної теплопередачі від енергоносія до стінки труби в навколишнє середовище буде відводитися тепловий потік Q_6 . Рівняння теплового балансу можна записати наступним чином:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_6 = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 .$$

При умові теплоізоляції трубопроводу і місця закріплення ПТ температура стінки трубопроводу і місця закріплення ПТ будуть наближатися до температури досліджуваного середовища і тепловими потоками Q_4 і Q_6 можна знехтувати. Оскільки значення температури енергоносіїв при транспортуванні їх трубопроводами не перевищують $-50...+50^{\circ}\text{C}$, то теплопередача випроміненням

(потік Q_3) буде незначною і для спрощення математичного апарату її також можна не враховувати.



Малюнок 1. Схема теплових потоків ПТ, вмонтованого в трубопровід:

1 - захисна арматура ПТ; 2 - стінки трубопроводу; 3 - головка ПТ

Допустимо також, що через поверхню дна захисної арматури не відбувається підведення або відведення тепла. Тоді рівняння теплового балансу:

$$Q_1 = Q_2 .$$

На віддалі x від дна захисної арматури ПТ виділимо елемент dx і запишемо для нього рівняння теплового балансу. Потік тепла через поперечний елемент dx захисної арматури ПТ діаметром d в результаті конвективної теплопередачі від досліджуваного середовища складає

$$dQ_1 = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot dx \cdot (t_c - t), \quad (1)$$

де α - коефіцієнт конвективної теплопередачі на поверхні ПТ; t_c - температура досліджуваного середовища; t - температура поперечного елемента dx .

З іншої сторони осьовий тепловий потік в поперечному елементі dx складає:

$$dQ_2 = Q_2' - Q_2''$$

Згідно закону Фур'є:

$$Q_2' = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dt}{dx} \text{ і}$$

$$Q_2'' = -\lambda \cdot F \cdot \frac{d}{dx} \left(t + \frac{dt}{dx} dx \right).$$

Тоді

$$dQ_2 = \lambda \cdot F \cdot \frac{d^2 t}{dx^2} \cdot dx, \quad (2)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності захисної арматури ПТ при температурі t ; F - площа поперечного сечення захисної арматури.

Порівнюючи вирази (1) і (2) одержимо диференціальне рівняння, яке описує розподіл температури t_x вздовж захисної арматури ПТ:

$$\frac{d^2 x}{dx^2} = \frac{\pi \cdot d}{\lambda \cdot F} \cdot \alpha \cdot (t_c - t) \quad (3)$$

Прийнявши граничні умови: при $x=0$ $t=t_c$ і при $x=l$ $t=t_k$ (t_k - температура в місті закріплення ПТ на трубопроводі) рішення рівняння (3) можна представити залежністю

$$\delta_t = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_k} = \frac{ch \left(\sqrt{\frac{\alpha \cdot \pi \cdot d}{\lambda \cdot F}} \cdot x \right)}{ch \left(\sqrt{\frac{\alpha \cdot \pi \cdot d}{\lambda \cdot F}} \cdot l \right)} \quad (4)$$

Залежність (4) представляє собою математичну модель теплової підсистеми ПТ і відповідає математичній моделі теплообміну чутливого елемента, яка повинна складатися з врахуванням його теплової взаємодії з елементами конструкції ПТ, навколишніми тілами і газовим потоком плинного енергоносія, а також можливою наявністю внутрішніх джерел тепла.

При розробленні даної математичної моделі теплової підсистеми ПТ розглядалося як однорідне ізотропне тіло.

Залежність для математичної моделі (4) показує вплив теплопередачі на похибку вимірювання, обумовлену теплопровідністю (статична складова похибки). Вона одержана при введенні вказаних вище допущень для циліндричної захисної арматури.

Реальні умови теплообміну і конструктивні особливості ПТ значно відрізняються від прийнятих нами і для їх визначення необхідно використати складний математичний апарат та виконати громіздкі розрахунки. Тому точне значення похибки вимірювання простіше отримати із експериментальних досліджень. Але одержана залежність (4) дає

рекомендації відносно вибору конструкції ПТ та особливостей його встановлення на трубопроводі.

Аналіз (4) показує, що похибка вимірювання залежить як від параметрів досліджуваного середовища, так і від конструктивних особливостей ПТ.

Розглянемо основні вимоги, що витікають з (4), які необхідно враховувати при розробленні конструкції і монтажі ПТ для зменшення похибки вимірювання температури.

Значення даної складової похибки можна зменшити такими способами:

- зменшенням різниці температур ($t_c - t_x$);
- збільшенням глибини занурення l ПТ в газовий потік;
- зменшенням діаметра ПТ, термоелектродних і з'єднувальних провідників, а також вибирати їх з малою теплопровідністю;
- збільшенням коефіцієнта конвективної тепловіддачі α від газового потоку до чутливого елемента ПТ.

Розглянемо основні вимоги, що витікають з (4), які необхідно враховувати при розробленні конструкції і монтажі ПТ для зменшення похибки вимірювання температури.

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

Температура t_c визначається взаємодією виступаючої частини ТП із зовнішнім середовищем, в якому він встановлюється. Оскільки температура t_c залежить від інтенсивності теплообміну виступаючої частини ПТ, 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 трубопроводу і корпусом ПТ прокладок із матеріалу з низькою теплопровідністю (наприклад текстоліту, склотекстоліту,

азбоцементу, тощо) або розміщення навколо виступаючої частини ПТ нетеплопровідних екранів.

Найбільш вільно можна змінювати глибину занурення / ПТ в газовий потік. Ця глибина занурення повинна бути по можливості найбільшою. Але навіть при великій глибині занурення ПТ 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 ПТ можна тільки послабити тепловідведення через корпус.

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

Авторами проводилися експериментальні дослідження впливу глибини занурення на похибку вимірювання температури ПТ, корпус якого був виготовлений із нержавіючої сталі марки 12Х18Н10 з коефіцієнтом теплопровідності 46 Вт/(м.К). Глибини занурення становили відповідно 100 і 20 мм. Чутливим елементом служила термопара з номінальною статичною характеристикою типу К за стандартом «Thermoelectric temperature transducers. Part 1. Performance specification and tolerance of the electromotive force (EMF) : ДСТУ EN 60584-1:2016 (EN 60584-1:2013, Idt). – [Effective 2016–11–01]. – Kyiv: State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy, 2016. – 90 р. – (National Standards of Ukraine». При глибині занурення 100 мм похибка вимірювання температури від тепловідведення по корпусу ПТ становила 3 %, а при глибині занурення 20 мм ця похибка зросла до 7 %.

Для зменшення похибки доцільно також використовувати термоелектроди з малою теплопровідністю. Це дає змогу виготовити ПТ будь-якої конструкції досить компактним. Особливо це відноситься до ПТ з поздовжнім обтіканням

чутливого елемента, оскільки для них складніше забезпечити достатню глибину занурення, яка гарантувала б мінімальні похибки від тепловідведення через теплопровідність.

Зменшення похибки можливе за рахунок збільшення коефіцієнта конвективної тепловіддачі α , зменшення теплового потоку через елементи захисної арматури ПТ, а також збільшення теплопередачі від захисної арматури до чутливого елемента ПТ.

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 авторів, 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

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

а для повздовжнього обтікання

$$Nu = (0,085 \pm 0,009) Re^{0,674}. \quad (6)$$

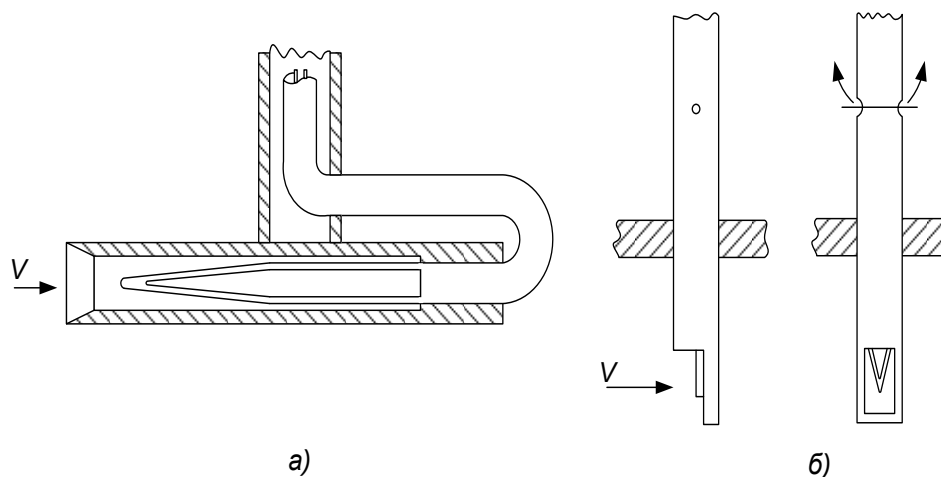
Залежності (5) і (6) охоплюють температурний діапазон від 15 до 1620 °C і числа Маха M від 0,015 до 0,9. Ці дані можуть бути використані під час синтезу ПТ з камерами гальмування, в яких швидкість газового потоку завжди відповідає числу $M < 1$.

Збільшення коефіцієнта конвективної теплопередачі α можна досягнути встановленням ПТ в точці з найбільшою швидкістю протікання досліджуваного середовища, а також штучним її підвищенням. Коефіцієнт α збільшується також при зменшенні діаметра захисної арматури ПТ, тому цей діаметр по можливості

повинен бути невеликим. Але коефіцієнт α може змінюватися у відносно невеликих межах, оскільки зменшення діаметра ПТ призводить до зменшення його механічної міцності, а збільшення швидкості в трубопроводі призведе до збільшення похибки, обумовленої неповним перетворенням кінетичної енергії рухомого газу в теплову. Отже, існує деякий оптимум для результуючої дії вказаних чинників. Збільшення теплосприймаючої поверхні ПТ (її оребрення) також призводить до збільшення α .

Результати розрахунків показують, що при зменшенні числа Рейнольдса (i , 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 малюнку 2 показані типові конструкції ПТ, призначені для послаблення тепловідведення від чутливого елемента. В ПТ, зображеному на мал. 2.а довжина робочої частини дорівнює 50 діаметрам термоелектродів, що забезпечує послаблення тепловідведення від корпусу.



Малюнок 2. Типові конструкції ПТ для зменшення тепловідведення через теплопровідність

Наявність отворів з достатньо великим віддаленням їх від спаю чутливого елемента в ПТ, зображеному на рис. 2б, збільшує умовну глибину занурення, що

особливо важливо в умовах обмеженості робочого простору для встановлення ПТ. Як правило, такий ПТ придатний для експлуатації тільки при відсутності теплообміну випромінюванням, оскільки в його конструкції не передбачено екранування. В ПТ даної конструкції похибка від тепловідведення зменшується завдяки тому, що газовий потік обтікає термоелектроди термопари на достатньо великому проміжку від спаю до вихідних отворів.

Тепловий потік через елементи захисної арматури повинен бути також зменшений до мінімально можливого значення за рахунок зменшення поверхні теплопередачі (зменшення діаметра захисної арматури, товщини стінки, розмірів головки, тощо).

Оскільки вздовж захисної арматури до місця встановлення ПТ на трубопроводі має місце градієнт температур, то чутливий елемент ПТ повинен знаходитись як найближче до дна захисної арматури, а активна довжина його повинна бути мінімальною. При збільшенні довжини чутливого елемента необхідно також збільшувати глибину занурення ПТ в досліджуване середовище. Необхідна глибина занурення в значній мірі залежить від інтенсивності теплообміну, тобто від параметрів досліджуваного середовища. Так, в газових середовищах глибина занурення ПТ повинна не менше, ніж в 2 рази перевищувати активну довжину чутливого елемента або складати не менше 8...10 діаметрів захисної арматури. Але при цьому необхідно враховувати, що глибина занурення ПТ в трубопроводі високого тиску не повинна бути дуже великою з врахуванням механічних навантажень, що діють на захисну арматуру ПТ.

Забезпечення високого коефіцієнта теплопередачі від захисної арматури до чутливого елемента ПТ досягається також впровадженням певних конструкторських рішень (встановлення невеликого проміжку між захисною арматурою і чутливим елементом, забезпечення теплового контакту чутливого елемента з дном арматури, тощо) та дотриманням встановлених технологічних норм при виготовленні ПТ.