

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: **“Проектування первинних вимірювальних перетворювачів
температури для автоматизованих систем хлібопекарного
виробництва”**

Виконав: студент гр. Акт-41
Спеціальності 151 – „Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології”
(шифр і назва)

Варениця Володимир Ігорович
(Прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. Запорожцев С.Ю.
(Прізвище та ініціали)

Рецензенти: д.т.н., проф. Власовець В.М.
(Прізвище та ініціали)

(Прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ-2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Спеціальність 151 – „Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____

д.т.н., проф. А.М. Тригуба

“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Варениця Володимир Ігорович

1. Тема роботи: «Проектування первинних вимірювальних перетворювачів температури для автоматизованих систем хлібопекарного виробництва»

Керівник роботи Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджені наказом по університету від 27 листопада 2023 року № 641/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 14.06.2024 р.

3. Початкові дані до роботи: 1. Методи вимірювання температури

2. Принципи роботи і будова термоперетворювача. 3. Метрологічні і експлуатаційні вимоги до термоперетворювачів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Предметна область дослідження

2. Аналіз дослідницької галузі.

3. Розроблення базових конструкцій термоперетворювачів

4. Охорона праці

5. Розрахунок економічної ефективності розроблених конструкцій термоперетворювачів

Висновки.

Список використаних джерел.

Додатки.

5. Перелік презентаційного матеріалу : _____
Тема, автор, керівник роботи. Термоперетворювач опору і схема його під'єднання.
Схема показуючого пристрою манометричного термометра. Аналіз похибок
вимірювання температури. Схема встановлення екранованого ТП в трубопроводі.
Схема встановлення ідеалізованого термоприймача при наявності виступаючої
частини. Вертикальне встановлення ТП на металевій стінці чи трубопроводі.
Горизонтальне встановлення ТП на металевій стінці чи трубопроводі. Схема
встановлення термоперетворювача на трубопроводі для вимірювання температури
перегрітої водяної пари. Схема встановлення ТП для вимірювання температури
рідких середовищ _____

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	<i>Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій</i>		
4	<i>Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва</i>		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Написання першого розділу та означення головних завдань роботи</i>	28.11.23-21.01.24	
2	<i>Виконання другого розділу та формування головних показників для розрахунків</i>	23.01.24-01.03.24	
3.	<i>Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи</i>	02.03.24-01.04.24	
4.	<i>Виконання четвертого розділу та узагальнення вимог охорони праці</i>	02.04.24-21.04.24	
5.	<i>Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи</i>	22.04.24-06.05.24	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації</i>	07.05.24-22.05.24	
7.	<i>Завершення роботи в цілому</i>	23.05.24-14.06.24	

Студент _____ Варениця В.І.
 (підпис)

Керівник роботи _____ Запорожцев С.Ю.
 (підпис)

УДК 631.365.2

Проектування первинних вимірювальних перетворювачів температури для автоматизованих систем хлібопекарного виробництва. Варениця В.І. – Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра інформаційних технологій – Дубляни, ЛНУЦ, 2024.

73 с. текст. част., 16 рис., 7 табл., 22 літ. джерел, 5 додатків.

Текстова частина включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел.

У вступі показано, що якість температурного контролю обумовлює успіх процесу випікання хліба, подано короткий опис різних типів термоперетворювачів.

В першому розділі подано обґрунтування необхідності розроблення первинних перетворювачів температури для автоматизованих систем хлібопекарного виробництва, типи термоперетворювачів.

В другому розділі проаналізовано похибки вимірювання температури, досліджено динамічні властивості термоперетворювачів, розроблено узагальнену математичну модель термоперетворювача, досліджено термометричні та конструктивні матеріали для виготовлення термоперетворювачів.

У третьому розділі здійснено вибір методу вимірювання температури, мінімізовано методичну похибку вимірювання, обумовлену впливом теплообміну випромінюванням та обумовлену теплообміном через теплопровідність, подано методику розроблення конструкції термоперетворювача, способи встановлення термоперетворювачів на технологічних об'єктах, розраховано захисну арматуру та надійність термоперетворювача.

У четвертому розділі розроблені заходи з охорони праці і навколишнього середовища. У п'ятому розділі розраховано економічну ефективність від впровадження розроблених конструкцій термоперетворювачів.

На підставі виконаної роботи зроблено відповідні висновки.

Ключові слова: конструкції термоперетворювача, математична модель, похибки.

АНОТАЦІЯ

Метою кваліфікаційної роботи є розробка принципів конструювання термоперетворювачів для технологічних процесів хлібопекарного виробництва з мінімальним значенням методичної похибки, високими показниками надійності.

В роботі подано обґрунтування необхідності розроблення первинних перетворювачів температури для автоматизованих систем хлібопекарного виробництв, типи термоперетворювачів. Проаналізовано похибки вимірювання температури, досліджено динамічні властивості термоперетворювачів, розроблено узагальнену математичну модель термоперетворювача, досліджено термометричні та конструктивні матеріали для виготовлення термоперетворювачів. Здійснено вибір методу вимірювання температури, мінімізовано методичну похибку вимірювання, обумовлену впливом теплообміну випромінюванням та обумовлену теплообміном через теплопровідність, подано методику розроблення конструкції термоперетворювача, способи встановлення термоперетворювачів на технологічних об'єктах, розраховано захисну арматуру та надійність термоперетворювача.

Описані заходи з охорони праці і пожежної безпеки. Розрахована економічна ефективність впровадження розроблених конструкцій термоперетворювачів.

ABSTRACT

The purpose of the qualification work is to develop the principles of designing thermoconverters for technological processes of bakery production with a minimal value of methodical error, high reliability indicators.

The paper presents the justification of the need to develop primary temperature transducers for automated systems of bakery production, types of thermotransducers. The temperature measurement errors were analyzed, the dynamic properties of thermotransducers were studied, a generalized mathematical model of the thermotransducer was developed, thermometric and structural materials for the manufacture of thermotransducers were studied. The method of temperature measurement was selected, the methodical measurement error due to the influence of heat exchange by radiation and due to heat exchange due to thermal conductivity was minimized, the method of developing the design of the heat exchanger, methods of installation of heat exchangers at technological facilities were presented, the protective fittings and reliability of the heat exchanger were calculated.

Occupational health and fire safety measures are described. The calculated economic efficiency of the implementation of the developed designs of heat converters.

ЗМІСТ

Вступ	7
1.Предметна область дослідження.....	9
1.1. Обґрунтування необхідності розроблення первинних перетворювачів температури	9
1.2 Теоретичні основи та методи вимірювання температури	12
2. Аналіз дослідницької галузі.....	23
2.1.Аналіз похибок вимірювання температури	23
2.2. Дослідження динамічних властивостей термоперетворювачів	34
2.3. Розробка узагальненої математичної моделі термоперетворювача	37
2.4. Дослідження термометричних та конструктивних матеріалів для виготовлення термоперетворювачів.....	41
3. Розроблення базових конструкцій термоперетворювачів.....	47
3.1. Вибір методу вимірювання температури	47
3.2. Мінімізація методичної похибки вимірювання, обумовленої впливом теплообміну випромінюванням	50
3.3. Мінімізація методичної похибки, обумовленої теплообміном через теплопровідність	52
3.4. Методика розроблення конструкції термоперетворювача	54
3.5..Способи встановлення термоперетворювачів на технологічних об'єктах	55
3.6. Розрахунок захисної арматури термоперетворювачів.....	59
3.7. Розрахунок надійності термоперетворювача	63
4. Охорона праці	68
4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці.....	68
4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці	69
4.3. Пожежна безпека.....	73
5. Розрахунок економічної ефективності розроблених конструкцій термоперетворювачів	74
Висновки.....	76
Список використаних джерел.....	79

ВСТУП

Наші стосунки з хлібом завжди були унікальними. Тривалий час ціну на хліб вважали мірилом національного добробуту. Хоча сприйняття хліба не змінилося, тепер він, по суті, є товаром і, як і інші товари, повинен підкорятися законам ринку. В результаті умови його продажу значно покращилися. Хліб продовжував відігравати значну роль у суспільстві, незважаючи на те, що він був товаром у торгівлі. Це призводить до унікальних умов для бізнесу на ринку хлібобулочних виробів.

Основою хлібопечення є теплові процеси. Одним з найважливіших елементів технічного процесу є температура. Тому якість температурного контролю часто обумовлює успіх процесу випікання хліба. В зв'язку з цим важливим завданням приладобудування і вимірювальної техніки є розроблення надійних методів вимірювання температури, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності і швидкодії, а також дослідження впливу всіх факторів на результат вимірювання.

Отримати достовірні дані про температуру, систематизувати та якісно опрацювати неможливо без використання методів збору первинних даних. Від точності та надійності вимірювання температури в великій мірі залежить протікання процесу випікання хліба, надійна та безперебійна робота технологічного обладнання, якість функціонування автоматичних систем контролю, керування та регулювання.

Специфічною особливістю вимірювання температури в хлібопекарних процесах є те, що термоперетворювач (ТП) знаходиться в складному процесі теплообміну одночасно як з процесом так і з навколишнім середовищем. Тому для таких умов виникають складності розроблення і створення надійних ТП для вимірювання температури.

Одним з напрямків вирішення завдання підвищення точності вимірювання температури в хлібопекарних процесах є зниження методичної похибки, обумовленою умовами теплообміну термоперетворювача.

Вимірюванню температури присвячено багато наукових і прикладних робіт, в яких розроблені окремі питання теоретичних і експериментальних досліджень, пропозиції конструктивних рішень створення ТП з мінімальним значенням методичної похибки, здатних функціонувати в системах автоматичного керування. Але до теперішнього часу відсутні науково-обґрунтовані методи створення ТП для вимірювання температури з необхідною в конкретних умовах експлуатації точністю вимірювання. Мало уваги приділено вивченню умов теплообміну, впливу технологічних і експлуатаційних факторів на значення похибки, характеру її прояву і стабільності. Вимагає вирішення проблема забезпечення єдності температурних вимірювань для отримання інформації про метрологічні характеристики ТП. Тому метою даної кваліфікаційної роботи є розробка принципів конструювання ТП для технологічних процесів хлібопекарного виробництва з мінімальним значенням методичної похибки, високими показниками надійності, які були б зручними і простими при монтажі і експлуатації, а також розроблення метрологічного забезпечення та експериментальних методів досліджень.

1. ПРЕДМЕТНА ОБЛАСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Обґрунтування необхідності розроблення первинних перетворювачів температури

Технологія виготовлення хліба складається з наступних стадій:

- зберігання і підготовка сировини до виробництва;
- приготування тіста;
- розділення тіста;
- випікання хліба;
- охолодження хліба;
- зберігання хліба.

Аналіз технологічного процесу показує, що практично на кожній стадії з певною похибкою необхідно вимірювати температуру.

Так, початкова температура тіста повинна становити 28...30 °С. При опарному способі виготовлення тіста початкова температура опари повинна становити також від 28 до 30 °С.

Остаточне вистоювання тіста проходить в шафах спеціальної конструкції при температурі 40 – 46 °С і відносній вологості 76 – 86 %.

Режим випікання хліба визначається температурою середовища, вологістю в пекарній камері, часом випікання і тиском.

Процеси клейстеризації крохмалу, поглинання води білків, проходять повільно, закінчуються при прогріванні м'якуша до температури 90 – 95 °С.

Коли температура досягає 100 °С, утворюється початкова скоринка. З зовнішніх шарів вода переходить до середини пекарної камери і до внутрішніх шарів, температура яких не перевищує 90 °С, оскільки вологість всередині хліба дуже висока. Для забезпечення оптимальної випічки хліба необхідно регулювати температурний режим в хлібопекарній печі.

Під час випікання хліба для печей застосовують такий режим випікання: температура в першій зоні – 255, в другій зоні – 220, в третій – 240, в четвертій – 220. Час випікання становить (40 ± 1) хвилини.

Важливе значення в процесі випікання мають мікробіологічні та мікрохімічні явища.

При температурі 60 °С дріжджі відмирають. При вищій температурі відбувається розклад ферментів, збільшується вміст вуглекислого газу, збільшується кислотність тіста, проходить клейстеризація крохмалу. Наслідком клейстеризації крохмалу є утворення цукринів, частина білків розкладається. Внаслідок взаємодії цукринів і білків при розщепленні крохмалу утворюються меланими, які визначають темний колір хліба.

Після випікання готові вироби втрачають від 10 до 30 % вологи і від 10 до 15 % маси. Тому для зменшення усушки хліб намагаються найшвидше охолодити повітрям з температурою від 15 до 20 °С. Тобто, знову необхідно регулювати температуру.

Таким чином, в технологічному процесі випікання хліба необхідно контролювати і регулювати температуру в досить широкому діапазоні: від 28 (початкова температура тіста і опари) до 1300 °С.

Якість температурного контролю в великій мірі обумовлює досягнення необхідних якісних і кількісних показників готового продукту, техніко-економічних показників процесу.

Як вказувалося вище, ТП є засобами отримання первинної інформації про тепловий стан досліджуваного об'єкта. Тому для надійної і ефективної роботи систем автоматичного контролю чи управління, в склад яких вони входять, до них повинні пред'являтися вимоги високої експлуатаційної надійності. Необхідно відмовитися від конструювання і виготовлення низьконадійних, не розрахованих на роботу в автоматичних системах контролю чи керування приладів для вимірювання температури, які ускладнюють системи автоматизації і знижують їх надійність.

ТП повинні забезпечувати потрібну точність вимірювання, яка встановлюється допустимими відхиленнями температури при протіканні технологічного процесу (технологічним регламентом). А оптимальний тепловий

режим технологічного об'єкта веде також до значної економії енергетичних ресурсів.

Внутрішні і зовнішні збурення, що діють на технологічний об'єкт неминуче виведуть із рівноваги систему автоматичного управління, яка почне реагувати на них. Тому для зменшення часу регулювання системи при впливі зовнішніх факторів, ТП повинні мати певне значення показника теплової інерції, який повинен вибиратися також з врахуванням умов теплообміну і не спотворювати форму кривої зміни температури за технологічним регламентом.

Важливою вимогою, яка пред'являється до ТП, є висока технологічність під час їх серійного виробництва на приладобудівному підприємстві, зручність при монтажі на технологічному обладнанні, простота в експлуатації і профілактиці.

Основними факторами, які необхідно враховувати є: неперервність вимірювання, допустима похибка вимірювання температури вибраним способом; термічна інерція ТП; фізико-хімічні властивості середовища, температуру якого необхідно вимірювати; ступінь взаємодії середовища і матеріалів конструкції, зануреного в нього ТП; взаємодія матеріалів самого ТП; його надійність.

ТП повинні витримувати також і термоциклічні режими роботи при збереженні достатньої стабільності номінальної статичної характеристики (НСХ) і механічної міцності за задану кількість циклів нагрівання і охолодження, що є характерним для змінних і особливо для короткотривалих теплових процесів.

Аналіз існуючих серійних засобів для вимірювання температури показав, що не завжди можна вибрати технічний засіб, який буде задовольняти вимоги технологічного процесу. Тому виникає необхідність розробки деяких ТП для даного технологічного процесу.

При розробці засобів для вимірювання температури необхідно враховувати такі фактори:

- діапазон вимірюваних температур;
- необхідна точність вимірювання;
- відтворюваність результатів вимірювання;

- динаміка досліджуваного процесу;
- хімічні взаємодії;
- властивості навколишнього середовища;
- метод реєстрації результатів вимірювання та інші.

Температура належить до таких фізичних величин, які не піддаються безпосередньому вимірюванню. Тому для вимірювання її завжди перетворюють в яку-небудь іншу фізичну величину. З цією метою (в залежності від діапазону вимірювання температур і умов вимірювання) використовують ту чи іншу термометричну властивість тіл, тобто залежність від температури відповідним чином вибраної фізичної характеристики тіла. Частіше всього температуру перетворюють в яку-небудь електричну величину. Приймач, який виконує перетворення температури в іншу фізичну величину називають термоперетворювачем.

Використані для вимірювання температур термометричні властивості тіл досить різноманітні. Під час вимірювання температури змінюються більшість фізичних властивостей тіл, що дає широку можливість вибору термометричних властивостей, зручних для використання в певних цілях.

В залежності від вибраної термометричної властивості використовують той чи інший метод вимірювання температури.

1.2. Теоретичні основи та методи вимірювання температури

Термоперетворювачі опору

Принцип роботи термоперетворювача опору (ТО) оснований на температурній залежності електричного опору від температури. Вказаною властивістю володіють більшість матеріалів, але тільки деякі з них задовільняють експлуатаційні вимоги, зв'язані з стабільністю властивостей і нечутливістю до зовнішньої взаємодії інших фізичних параметрів (тиск, густина магнітного потоку, потоку нейтронів і т.п.). Комплекс метрологічних і експлуатаційних вимог задовільняє відносно вузька номенклатура матеріалів, які здатні проводити електричний струм: метали, напівпровідники, електроліти.

Завдяки високим метрологічним параметрам платинові ТО використовуються для вимірювання температур в діапазоні від 13,81 до 903,89 К, напівпровідникові ТО володіють екстремальними характеристиками, які піддаються конструктивній варіації в широких межах. Тому вони разом з металевими термометрами ефективно використовуються в системах вимірювання, контролю і автоматизації в промислових технологічних комплексах.

ТО складається з чутливого елемента відповідної конструкції, захисної арматури і з'єднувальних провідників (рис. 2.1). Зміна опору чутливого елемента фіксується показуючим приладом чи регулятором. Спосіб ввімкнення ТО визначається схемою вторинного приладу і діапазоном вимірюваної температури.

Платинові ТО. Основні вимоги, яким повинен відповідати матеріал чутливого елемента ТО: 1) нечутливість до невеликих домішок, які можуть появитися в процесі виготовлення чи експлуатації; 2) простота технології отримання і виготовлення. В промислових умовах застосування платинових ТО нормовано для вимірювання температури до 1100 °С [19].

Залежність відносного опору від температури для платини описується рівняннями, які регламентовані МТШ-90. Для вимірювання низьких температур платиновими ТО необхідно користуватись залежністю $T=f(W)$ в вигляді стандартної таблиці [20].

З метою забезпечення взаємозаміни ТО вони розбиваються на групи з подібними характеристиками і комплектуються вторинними приладами, які мають відповідні статичні характеристики. При цьому вторинні прилади можуть мати вставки для підналагоджування вимірювальної схеми до фіксованих номінальних статичних характеристик [21].

Конструкції чутливих елементів. Для вимірювання температури до 630,74 °С використовуються ТО, чутливі елементи яких виготовлені з платинового дроту діаметром 0,05 ... 0,2 мм, який намотаний на каркас біфілярно для усунення впливу магнітних завад. В якості ізоляційного каркасу використовують слюдяні пластини, керамічні стержні з хрестоподібною формою перерізу. Слюда в природному стані містить зв'язану воду і адсорбовані гази.

Слюду рекомендується використовувати при температурах до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кварц, алунд (електрокорунд) і фарфор більш термостійкі і краще зберігають ізоляційні властивості. При $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ струм, який протікає по ізолятору каркаса, обумовлює похибку порядку 10^{-1} K . при подальшому збільшенні температури похибка, яка викликана втратами ізоляційних характеристик каркасу, швидко росте і в значній мірі залежить від технології його виготовлення.

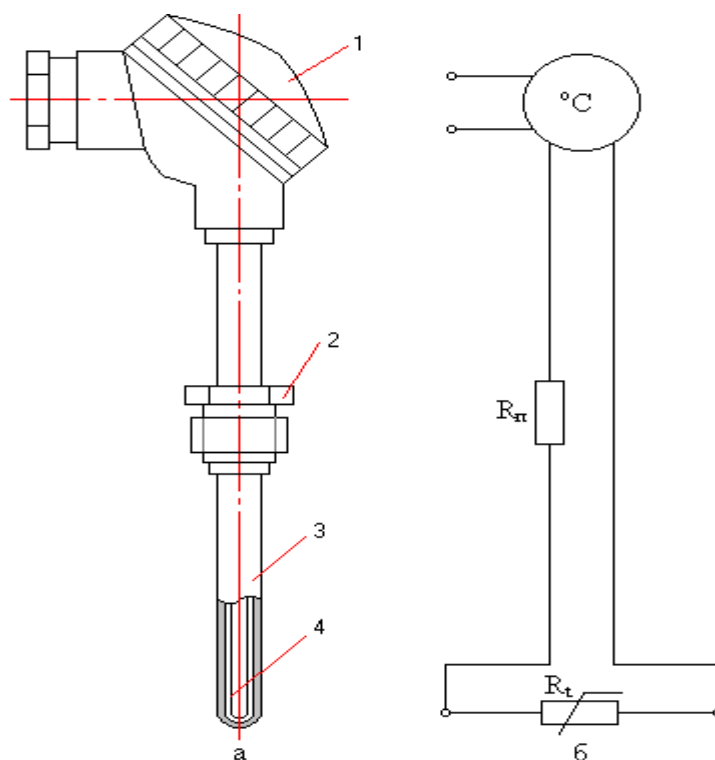


Рис. 1.1. Термоперетворювач опору (а) і схема його під'єднання (б):

1 – головка; 2 – штуцерна гайка; 3 – арматура; 4 – чутливий елемент.

Протягом довшого часу для вимірювання температури використовувалась конструкція платиногого ТО, яку запропонував Г.Л. Каллендар [21], в якій на слюдяний хрест намотувався платиновий дріт діаметром $0,1 \dots 0,2$ мм. Пізніше появились ТО з керамічним каркасом. В платинових ТО для вимірювання з високою точністю [21] напруження в провіді, яке виникає від деформації спіралі, зведено до мінімуму. Провід діаметром $0,1$ мм звивається в спіраль діаметром $0,45$ мм, а потім біфілярно намотується на слюдяний хрестоподібний каркас, який розміщується в захисній трубці, яка виготовлена з пірекса діаметром $7 \dots 7,5$ мм. Чутливий елемент з'єднаний з головкою ТП золотими дротами довжиною 430 мм. В якості іншої типової конструкції можна привести ТО [24], чутливий елемент

якого виготовлений з платиного дроту діаметром 0,05 мм, опір котрого при 0 °С приблизно 25 Ом. Платинова спіраль діаметром 1,5 мм розміщується в тонкій U – подібній пірексовій трубці з внутрішнім діаметром, який незначно перевищує зовнішній діаметр спіралі, і товщиною стінки 0,5 мм. Кінці спіралі припаяні до жорстких платинових виводів так, щоб спіраль завжди була вільна від напружень. Конструкція термоперетворювача представляє собою двоканальну трубку з оксиду кремнію, в каналах якої розміщена спіраль чутливого елемента (рис. 2.2) [15].

Для вимірювання низьких і середніх температур каркаси чутливих елементів виготовляють із скла з близьким до платини коефіцієнтом термічного розширення. Для вимірювання температур в діапазоні 630 ... 1100 °С використовується платиновий дріт діаметром 0,3 ... 0,6 мм, оскільки дріт менших діаметрів піддається впливу сторонніх газів та парів. При цьому для каркасу використовується синтетичний сапфір. Технічні платинові термоперетворювачі повинні бути механічно міцними і вібростійкими. Для цього в багатьох конструкціях чутливих елементів платинову спіраль розміщують в чотирьох каналах керамічного каркасу [13, 16, 17].

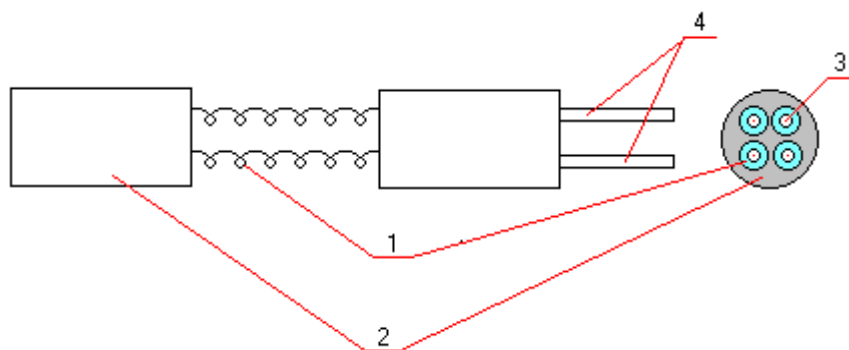


Рис. 1.2. Платиновий чутливий елемент:

1 – спіраль; 2 – каркас; 3 – порошок; 4 – виводи.

Крім чутливих елементів розміщених в керамічних каркасах, випускаються різноманітні конструкції мініатюрних чутливих елементів з платиного дроту, який покритий ізоляційним лаком.

Мідні ТО. Залежність електричного опору R_t від температури t мідного ЧЕ є лінійною:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

де R_0 – електричний опір ЧЕ при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha = (R_{100} - R_0)/100$ – температурний коефіцієнт електричного опору. Для мідного ЧЕ $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$.

Основними характеристиками ТО є значення електричного опору при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ R_0 і параметр

$$W = R_{100}/R_0, \quad (1.2)$$

який характеризує відношення електричного опору при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ R_{100} до електричного опору при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для мідних ЧЕ $W = 1,428$.

Згідно державного стандарту України ДСТУ 2858-94 для характеристики ТО використовують номінальні стандартні характеристики (НСХ). НСХ ТО – це залежність електричного опору ЧЕ від температури. Для мідних ТО встановлені такі НСХ: 10М; 50М; 100М. Число в умовних позначеннях НСХ відповідає опору термоперетворювача при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а буква – матеріал ЧЕ (М – мідь). Міжнародні позначення НСХ згідно ДСТУ 2858-94: Cu10, Cu50, Cu100.

Таблиця 1.1.

Значення W_{100} для різних термоперетворювачів опору

Тип ТО	Клас допуску	Значення W_{100}	
		Номінальне	найменш допустиме
ТОП	А	1,3850	1,3845
		1,3910	1,3905
	В	1,3850	1,3840
		1,3910	1,3900
	С	1,3850	1,3835
		1,3910	1,3895
ТОМ	В	1,4260	1,4250
		1,4280	1,4270
	С	1,4260	1,4240
		1,4280	1,4260

Діапазон вимірювання мідних ТО – від -200 до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При виготовленні чутливих елементів технічних платинових ТО допустиме відхилення номінального значення при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ повинно відповідати А, В, С класам допуску, мідних – В, С класам допуску. В табл. 1.1 показано значення W_{100} для різних ТО (W_{100} відношення опору при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Термопари

Принцип роботи термоелектричного перетворювача (ТП) оснований на ефекті Зеебека. Ефект Зеебека (1826 р.) визначається тим, що в електричному колі, який складається із послідовно з'єднаних різних провідників виникає термоЕРС, якщо в місцях контактів підтримується різна температура. Причина виникнення термоЕРС полягає в тому, що середня енергія носіїв заряду з ростом температури збільшується. Внаслідок цього градієнт температури викликає дифузійний потік носіїв. В розімкнутому колі в стаціонарному стані щільність струму в будь-якій точці провідника дорівнює нулю. Це відбувається тому, що перерозподілення носіїв заряду в провіднику призводить до утворення електромагнітного поля, яке компенсує потік носіїв, пропорційно градієнту температури. При цьому в колі виникає термоЕРС. В спрощеному випадку, коли таке коло складається двох різних провідників, то він називається термопарою. ТермоЕРС термопари залежить від температури робочого (вимірювального) і вільного (опорного) спая і від складу матеріалу провідників, які утворюють термопару.

ТП використовують для вимірювання температури теплоносіїв, газу, пари і води. Конструктивно ТП мають різні форми, але виконані на єдиній базі чутливих елементів і входять в склад засобів ДСП.

Чутливий елемент складається з двох термоелектродів виконаних з різних сплавів і спаяних між собою.

Вимоги до матеріалів з яких виготовляють чутливі елементи

- матеріали повинні бути хімічно стійкими по відношенню до вимірюваних середовищ;
- бажано, щоб величина термоЕРС для даного значення температури була як найбільшою;
- НСХ повинна бути лінійною та стабільною в часі;
- повинна бути однозначна залежність між температурою і термоЕРС;
- матеріали повинні мати невелике значення температурного коефіцієнта електричного опору.

Зовнішня арматура ТП складається із захисної труби, рухомого або нерухомого штуцера (фланця) кріплення термоперетворювача і головки. В головці розміщена контактна колодка з затискачами для під'єднання провідників, з'єднуючих ТП з вимірювальним приладом. Ввід провідників в головку ущільнюється сальником. В ТП без головки проводиться заробка вивідних кінців.

Кріплення ТП на об'єктах проводиться з допомогою штуцера, фланця, спеціального кріплення, зварною, пайкою, тощо.

В табл. 1.2 наведено номінальні статичні характеристики термопар, які стандартизовані в Україні.

Таблиця 1.2.

Номінальні статичні характеристики термопар, які стандартизовані в Україні.

Тип ТП	Найменування	Умовне позначення НСХ	Матеріали ТП	Діапазон температур, °С
ТВР	Вольфрамений/ вольфрам- ренієвий	ВР 5/20 (А)	(5%Re+95%W) / (20%Re+80%W);	0-2200
ТПР	Платинородій/ платино- родієвий	ПР 30/6 (В)	Платинородій (30%Rh+70%Pt)/ платинородій (6%Rh+94%Pt)	300-1600
ТПШ	Платинородій/ платиновий	ПП(S)	Платинородій (10%Rh+90%Pt) /платина	0-1300
ТХА	Хромель/ алюмелевий	ХА(К)	Хромель (90,5%Ni+9.5Cr)/ алюмель(94,5%Ni+5.5%Si + Mn, Al, Co)	-200-1100
ТХК	Хромель/ копелевий	ХК(L)	Хромель (90,5%Ni+9.5Cr)/ копель(56%Cu+44%Ni)	-200-600
ТМК	Мідь/копелевий	МК(M)	Мідь / копель (56%Cu+44%Ni)	-200-100

Примітки. 1. Перший електрод, який фігурує в назві термопари має позитивний заряд. Другий - негативний. 2. Умовні позначення НСХ, дані в дужках, відповідають міжнародним позначенням.

ТП типу ТВР застосовують для вимірювання температури в нейтральних середовищах і в вакуумі. Інші типи можуть застосовувати в окислювальних і відновлювальних середовищах.

Манометричні термометри

Принцип дії манометричних термометрів полягає на використанні однозначної залежності між температурою і тиском термометричної речовини, яка знаходиться в герметично замкнутій манометричній термосистемі. Манометрична термосистема складається з термобалона, з'єднувальної трубки (дистанційного капіляра) і пружного чутливого елемента, які разом утворюють герметичний об'єм, заповнений термометричною (робочою) речовиною.

В залежності від виду робочої речовини і його агрегатного (фазового) стану манометричні термометри розділяють на три класи: газові (Г), рідинні (Р) і конденсаційні (К) чи парорідинні. Манометричні термометри випускають в різних виконаннях: в вигляді показуючих, самопишучих приладів без чи з вмонтованими пристроями сигналізації і регулювання температури.

Схема конструктивного оформлення показуючого манометричного термометра показана на (рис. 1.3, а) [10].

Манометрична система термометра складається з термобалона, капіляра і манометричної пружини. Температура термобалона, зануреного в досліджувальне середовище, функціонально перетворюється в тиск робочої речовини манометричної системи. З'єднувальний капіляр передає вимірювання тиску на манометричну пружину. Держак з'єднує внутрішню порожнину закріпленого кінця пружини з капіляром. Вільний герметизований кінець пружини шарнірно з'єднаний повідком з зубчастим сектором, який знаходиться в зчепленні з зубчастим колесом. На осі зубчастого колеса насаджена стрілка-вказівник. Зазор в передаючому механізмі вибирається спіральною пружиною.

Термобалон має циліндричну форму, його діаметр і довжина залежать від роду термометричної рідини і діапазону вимірювальних температур. Термобалон переважно виготовляють зі сталі 12Х18Н10Т.

Капіляри манометричних термометрів виготовляють з латуні і сталі з зовнішнім діаметром 2,5 і внутрішнім 0,35 мм. Довжина капіляра дискретно нормована і може приймати наступні значення: 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 12,0; 16,0; 25,0; 40,0 і 60,0 м. Капіляр може бути захищений від можливих

механічних пошкоджень оболонкою з оцинкованої сталеві стрічки або поліетилену високого тиску. В термометрах тропічного виконання капіляр захищений оболонкою з нержавіючої сталеві стрічки марки 12Х18Н10Т-М.

Манометрична пружина має переріз овальної форми (рис. 1.3, г), або в вигляді вісімки (рис. 1.3, в). Профіль перерізу пружини останнього виду має ряд переваг.

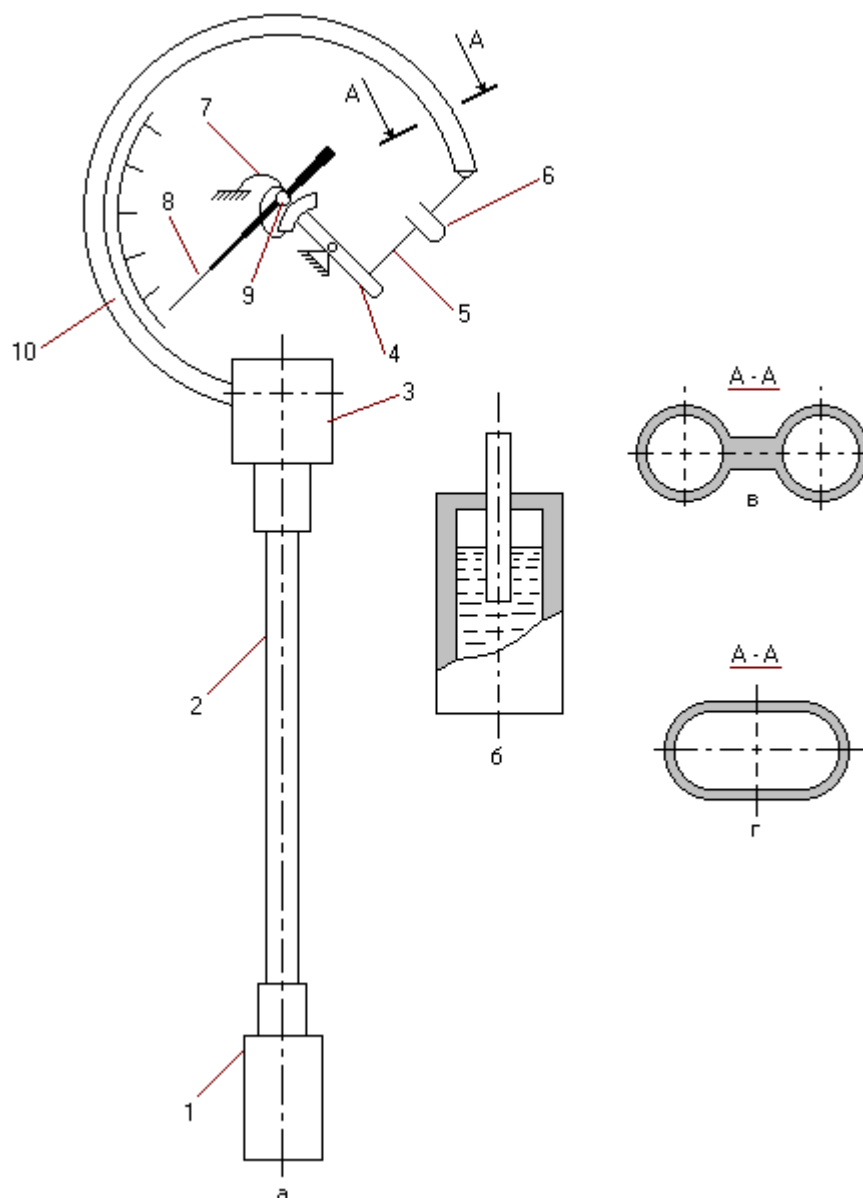


Рис. 1.3. Схема показуючого пристрою манометричного термометра:
 а – термосистема; б – термобалон; в, г – профілі перерізу пружини;
 1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – тримач; 4 – сектор; 5 – повідок; 6 – компенсатор;
 7 – спіральний волосок; 8 – вказівна стрілка; 9 – трибка; 10 – манометрична пружина;

Термометрична система заповнюється робочою речовиною під деяким тиском, різним для газових, рідинних і конденсаційних термометрів. Термобалон конденсаційного термометра заповнений робочою рідиною на 0,7 ... 0,75 його об'єму (рис. 1.3, б). Верхню частину балона заповнюють насичені пари цієї рідини. Капіляр конденсаційного термометра занурений на таку глибину, щоб його відкритий кінець завжди знаходився в конденсаті.

При вимірюванні температури термобалона змінюється тиск всередині манометричної системи, проходить деформація (розкручення або закручення) пружини. Свобідне переміщення кінця пружини з допомогою передавального механізму (ланок 5, 6 і 7) перетворюється в обертання стрілки-вказівника відносно відміток оцифрованої в градусах Цельсія шкали. Варіація температури середовища, в якому знаходиться пружина, тобто відхилення температури пружини від її нормального значення $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, усувається з допомогою термобіметалевого компенсатора (рис. 1.3, а).

Манометричні термометри використовуються для вимірювання, запису і регулювання температури газів, пари і рідин в діапазоні від $-170 \dots 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термометри випускаються з класами точності 1,0; 1,5; 2,5 при заповненні термосистеми газами чи рідинами і класами точності 1,5; 2,5; 4,0 при заповненні системи конденсатом.

Рідинно – скляні термометри

Рухливість молекул, відповідно, інтенсивність об'ємного і лінійного термічного розширення у рідин значно більша, ніж в твердих тілах. Тому рідина, яка заповнює посудину, з ростом температури знаходиться в надлишку, а при зменшенні – в недостатці. Це явище покладено в основу всіх рідинно-скляних термометрів (РСТ). Конструктивна схема РСТ включає резервуар з термометричною рідиною і приєднаний до нього капіляр, частково заповнений надлишковою рідиною. Про вимірювану температуру резервуару судять по висоті стовпця рідини в капілярі при допомозі шкали, яку наносять прямо на капіляр або на спеціальну пластину, яка приєднана до капіляра. Історично склалось, що РСТ були першими термометрами, які отримали масове поширення. Такі переваги, як

простота в користуванні, дешевизна забезпечили широке їх застосування в діапазоні вимірювання від -200 до 1200 °С.

Використання ртуті відкрило можливість створення неокислювальних електричних контактів, що привело до широкого застосування ртутних термоконтактних пристроїв в системах контролю та регулювання.

Недоліки РСТ обумовлені труднощами неперервного поєднання їх з електричними системами подальшої обробки. Тому в деяких областях РСТ витісняються термоелектричними і резистивними термометрами.

Ємнісні термометри

В ємнісних термометрах використовується температурна залежність діелектричної проникливості матеріалів, яка від температури вище точки Кюрі підпорядковується закону Кюрі-Вейса. Якщо застосувати цю залежність до ємнісного конденсатора то вона буде мати вигляд:

$$C = \frac{k}{T - T_K}; \quad (1.3)$$

Де k – стала, T – температура, T_K – температура точки Кюрі [5].

Оскільки чутливий елемент є параметричним перетворювачем (ПП), а його опір носить реактивний характер, то це дозволяє збільшити чутливість за рахунок збільшення вимірювального струму при малому самонагріванні [6]. Термозалежну ємність вмикають разом з індуктивністю в коливальний контур, резонансна частота котрого залежить від температури [5]:

$$f_{рез} = A(T - T_K)^{\frac{1}{2}}; \quad (1.4)$$

де A – константа.

Ємнісні термометри на основі твердого розчину $(BaSr) \cdot (TiSn) O_3$ використовуються для вимірювання температури в діапазоні $183 \dots 323$ К на радіозондах. В медичних цілях використовуються термометри на основі $BaTiO_3 - CaSnO_3$ для діапазону температур $307 \dots 315$ К з похибкою $\pm 0,1$ К [6].

Ємнісні термометри на кристалах $NaPOH$ і $KClOH$ використовують для діапазону $0,065 \dots 2,5$ К. Положення максимуму ємності конденсатора з $KClOH$ (при $\sim 0,19$ К) можна міняти зміною концентрації групи OH [1].

2. АНАЛІЗ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ГАЛУЗІ

2.1. Аналіз похибок вимірювання температури

В хлібопекарній промисловості вимоги до точності підтримування заданої температури є високими. Похибка вимірювання температури з допомогою взірцевих платинових ТО в діапазоні температур 0-50 °С не перевищує декількох тисячних градуса, гранична похибка промислового ТО класу А досягає 0,5 °С, тобто на два порядки вища порівняно з взірцевим термометром. Таке відносно велике значення похибки термометра ($\delta = \frac{0,5}{50} \cdot 100 = 1\%$) нашою думкою, що подальше збільшення точності вимірювання вторинних приладів, навряд чи можна рахувати обґрунтованим, оскільки збільшення точності вторинного приладу в два рази зменшує похибку вимірювання температури комплексу приблизно на одну шосту чи величину, яка дуже мала порівняно з допустимим значенням приведеної похибки вимірювання температури. Тому для зменшення похибки вимірювання необхідно в першу чергу зменшити значення похибки ТО.

Проаналізуємо основні складові інтегральної похибки вимірювання температури за допомогою ТО.

Похибка, обумовлена нагріванням термоперетворювача вимірювальним струмом

Похибка, обумовлена нагрівом ТО вимірювальним струмом, який протікає по чутливому елементу, при поміщенні в лід що тане не повинна перевищувати 0,2 °С для платинових ТО і 0,4 °С для мідних ТО, якщо розсіювана в них потужність не перевищує 10 мВт.

Таке визначення граничного значення температури нагріву при заданій в тТО розсіюваній потужності дозволить знайти граничне значення температури нагріву ТО Δt при будь-якому значенні потужності P_1 :

$$\frac{\Delta t_1}{P_1} = \frac{\Delta t_0}{P_0}. \quad (2.1)$$

Проте значення температури нагріву залежить від значення вимірювального струму, поверхні і умов охолодження. Оскільки величина поверхонь охолодження

і умови охолодження можуть бути різними, навряд чи з формули (2.1) можна отримати достатньо точні значення нагріву термометра. Слід відмітити, що ця обставина має велике практичне значення, особливо для приладів, які вимірюють малі різниці температур, оскільки в таких випадках спостерігаються відносно невеликі абсолютні зміни опору і відносно великі значення опору термометрів. Наслідком відносно невеликих змін опору термометра є відносно мала чутливість схеми. Збільшення чутливості схеми можливе за рахунок підвищення струму навантаження, значення якого не може перевищувати максимально допустимого значення, яке визначається максимально допустимим нагрівом термометра. Тому необхідно достатньо точно знати ступінь нагріву термометра, при чому не тільки при 0 °С, але й при інших температурах, тому що умови тепловіддачі можуть бути іншими. Також слід мати на увазі, що при заданих умовах охолодження, заданій величині поверхні і потужності значення температури нагріву можна прийняти визначеним, якщо тепло виділяється практично у всьому об'ємі досліджуваного об'єкта. В ТО об'єм платини порівняно з об'ємом простору, який займає чутливий елемент є незначним. Тому поверхню охолодження необхідно визначати, як поверхню дроту чутливого елемента термометра, або прийняти [28], що:

$$\Delta t = C \frac{P}{S} = C \frac{I^2 R}{S} = C \frac{I^2 \rho \frac{l}{\pi r^2}}{\pi dl} = CI^2 \frac{4\rho}{\pi^2 d^3}, \quad (2.2)$$

звідки

$$I = C' d^{\frac{3}{2}} \Delta t^{\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

де

$$C' = \frac{\pi}{\sqrt{4\rho C}}; \quad (2.4)$$

P – значення потужності, яка виділяється в термометрі, Вт, $P = I^2 R$; I – значення струму в термометрі, А; R – опір термометра, Ом; C – коефіцієнт пропорційності; S – поверхня охолодження проводу чутливого елемента, $S = \pi dl$; d – діаметр проводу чутливого елемента, $d = 2r$; l – довжина проводу чутливого елемента; r –

радіус проводу чутливого елемента; ρ - питомий електричний опір чутливого елемента.

З рівняння (2.3) видно, що для заданих умов охолодження і конструкції термометра значення максимально допустимого струму є функцією діаметру проводу і температури нагріву.

Відносне значення похибки від нагріву термометра визначаються з виразу

$$\delta_{нагр} = \frac{\Delta t_{нагр}}{\Delta t'} 100\% , \quad (2.5)$$

де $\Delta t_{нагр} = 0,2^{\circ}C$; $\Delta t'$ - вимірюване значення температури вторинного приладу для початку шкали приладу $t=0^{\circ}C$ або різниця температур початку і показу приладу, якщо $t \neq 0^{\circ}C$.

Вплив похибки від нагріву на результат вимірювання не повинен перевищувати одної п'ятої похибки вимірювання приладу або в будь-якій точці шкали не перевищувати значення

$$\Delta t_{нагр} = \frac{k}{5 \cdot 100} \Delta t'_{макс} , \quad (2.6)$$

де $\Delta t'_{макс} = t'_{макс} - t'_{мін}$; $t'_{макс}$ і $t'_{мін}$ - відповідно максимальне і мінімальне значення вимірювальних температур.

Максимально допустиме значення вимірювального струму термометра визначається з виразу

$$\frac{I_t^2}{I_{1^{\circ}C}^2} = \frac{\Delta t_{нагр}}{1^{\circ}C} , \quad (2.7)$$

звідки

$$I_t = I_{1^{\circ}C} \sqrt{\frac{k \Delta t'_{макс}}{5 \cdot 100}} ,$$

де $I_{1^{\circ}C}$ - мінімальне значення вимірювального струму термометра, який викликає нагрів термометра на $1^{\circ}C$ в діапазоні температур $t'_{макс}$ і $t'_{мін}$.

Похибка підгонки термоперетворювача

Максимально допустиме відхилення опору при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_0) від його номінального значення для ТО класу А складає $\pm 0,05\%$. Цьому значенню опору відповідає деяка величина відхилення температури при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. При підвищенні температури збільшується як номінальне значення опору термометра, так і величина відхилення від номінального значення опору термометра:

$$R_t = (R_0 + \Delta R_0) \cdot (1 + At + Bt^2) = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2) + \Delta R_0 \cdot (1 + At + Bt^2), \quad (3.8)$$

де t – температура термометра; R_0 – номінальне значення опору термометра при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; ΔR_0 – величина відхилення від номінального значення опору термометра при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; A, B – температурні коефіцієнти платинових ТО для температур вище $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A=3,96847 \cdot 10^{-3}$ (1/К); $B= -5,847 \cdot 10^{-7}$ (1/К²).

Зі зміною температури змінюється чутливість (величина опору, яка відповідає одному градусу) згідно формули

$$\Delta R_{1^{\circ}\text{C}} = \frac{dR_t}{dt} = \frac{d[R_0(1 + At + Bt^2)]}{dt} = R_0(A + 2Bt). \quad (2.9)$$

Абсолютному значенню зміни величини відхилення відповідає зміна температури:

$$\Delta t_{\text{нід}} = \frac{\Delta R_0}{\Delta R_{1^{\circ}\text{C}}} = \frac{\Delta R_0(1 + At + Bt^2)}{R_0(A + 2Bt)} = \delta \frac{1 + At + Bt^2}{A + 2Bt}. \quad (2.10)$$

Відносна похибка показів температури, викликана неточністю визначення величини опору термометра при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, визначається за формулою

$$\delta_{\text{нід}} = \frac{\Delta t_{\text{нід}}}{\Delta t'} \cdot 100 = \delta \frac{1 + At + Bt^2}{(A + 2Bt)\Delta t'} \cdot 100\%. \quad (2.11)$$

В принципі для зменшення впливу похибки підгонки на результат вимірювання необхідна більш точна підгонка ТО. При існуючих методах і засобах підгонки забезпечити величину похибки чутливого елемента не більше одної п'ятої похибки вихідного приладу практично неможливо. Тому ТО необхідно підганяти по класу допуску В, але опір вимірювати необхідно на порядок точніше порівняно з значенням, яке визначене класом В, вказавши на термометрі це

значення, а у вторинному приладі передбачити можливість врахування підгонки чутливого елемента.

*Вплив на результат вимірювання відхилення значень R_{100}/R_0 від
номінального значення*

Максимально допустиме значення відхилення R_{100}/R_0 для платиного ТО від його номінального значення $R_{100}/R_0 = 1,391$ складає $\Delta \frac{R_{100}}{R_0} = \pm 0,0007$. Для різних значень відношення R_{100}/R_0 значення коефіцієнта B практично не змінюється. Зміна значення R_{100}/R_0 в основному визначається величиною зміни коефіцієнта $A(\Delta A)$, яке знаходиться з рівняння $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$, де для $t=100$ °C і $R_0=100$ Ом маємо:

$$139,17 = 100 \cdot [1 + (A + \Delta A) \cdot 100 + B \cdot 100^2]; \quad (2.12)$$

$$139,17 = 100 \cdot (1 + A \cdot 100 + B \cdot 100^2); \quad (2.13)$$

звідки

$$0,07 = 10 \cdot \Delta A \cdot 100; \quad (2.14)$$

або

$$\Delta A = 7 \cdot 10^{-6}. \quad (2.15)$$

На основі формул (2.12) - (2.15) вираховується абсолютне значення зміни опору в залежності від величини відхилення R_{100}/R_0 від номінального:

$$\Delta R_{\text{від}} = R_0 \Delta A t \quad (2.16)$$

або абсолютне значення відхилення температури від номінальної:

$$\Delta t_{\text{від}} = \frac{\Delta R_{\text{від}}}{\Delta R_{1^\circ\text{C}}} = \frac{R_0 \Delta A t}{R_0 (A + 2Bt)}; \quad (2.17)$$

Відносне значення відхилення температури від номінального значення:

$$\delta_{\text{від}} \frac{\Delta t_{\text{від}}}{t} \cdot 100 = \frac{100 \cdot R_0 \Delta A t}{R_0 (A + 2Bt)t} = \frac{100 \cdot \Delta A}{A + 2Bt} \% . \quad (2.18)$$

Вплив величини відхилення відношення R_{100}/R_0 від номінального можна зменшити, встановивши більш жорсткий допуск на відношення (наприклад, $\pm 0,0002$ або $\pm 0,0001$ замість $0,0007$), або розділити термометри на групи

(градування) за значеннями відношення R_{100}/R_0 . На практиці ні перший, ні другий спосіб не можливі, так як в першому випадку необхідна дуже чиста платина, а в другому необхідно збільшити кількість градувань термометрів, що не вигідно з виробничої і експлуатаційної точки зору. Тому краще підбирати значення відношення R_{100}/R_0 для термометрів по класу допуску В, вказавши на термометрі це значення (з округленням до $\pm 0,0001$), а у вторинному приладі передбачити можливість врахування відхилення значення R_{100}/R_0 від номінального.

Інтегральна похибка чутливого елемента термометроретворювача

Інтегральну похибку чутливого елемента можна розглядати як суму похибок від нагріву, підгонки і відхилення величини відношення R_{100}/R_0 від номінального значення:

$$\delta_{ч.е} = \delta_{нагр} + \delta_{під} + \delta_{від}. \quad (2.19)$$

Як видно з формули (2.19), значення похибки чутливого елемента визначається як сума похибок від нагріву, підгонки і відхилення величин R_0 і R_{100}/R_0 від номінальних значень.

Оскільки значення температури впливає на точність вимірювання і чутливість схеми, її граничне значення для максимального відхилення приладу необхідно прийняти рівним 0,01%, а двох інших похибок – по 0,05 %, щоб в сумі значення граничної похибки термометра не перевищувало для повного відхилення приладу $\delta_{че} = 0,1 + 0,05 + 0,05 = 0,2\%$ (для приладів з діапазоном вимірювання 15 °С і вище).

Похибка вторинного приладу

Похибки показуючих, записуючих і автоматичних приладів характеризуються класом приладу k , а відносна похибка показів приладу знаходиться з виразу

$$\delta_{прил} = k \frac{\alpha_{макс}}{\alpha} \quad (2.20)$$

де $\alpha_{\text{макс}}$ - максимальне значення повного відхилення приладу; α - відхилення приладу, для якого визначається значення похибки.

Значення абсолютної похибки приладу визначається з виразу

$$\Delta_{\text{прил}} = 0,01k. \quad (2.21)$$

Як видно з формули (3.20) вплив похибки вторинного приладу на результат вимірювання може бути відносно великим, особливо при малих відхиленнях приладу. Зменшити похибку комплексу можна збільшенням класу точності приладу або звуженням діапазону вимірювання.

Інтегральна похибка термометроробочача і вторинного приладу

Значення похибки при вимірюванні температури з допомогою ТО і вторинного приладу в нормальних умовах визначається з виразу:

$$\delta_m = \delta_{\text{ч.е}} + \delta_{\text{прил}} = \delta_{\text{нагр}} + \delta_{\text{нід}} + \delta_{\text{від}} + \delta_{\text{прил}}. \quad (2.22)$$

Для підвищення точності вимірювання температури необхідно:

- уточнити значення нагріву термометрів робочим струмом в залежності від діаметру чутливого елемента, конструкцій і умов охолодження, а також діапазону вимірювання температури і внести відповідні дані в паспорт ТО;

- вказувати на шкалі ТО дійсне значення опору заокруглене до 0,01 – 0,05% і дійсне значення відношень R_{100}/R_0 з округленням до $\pm 0,0001$;

- підвищити клас вимірювального приладу з 0,5 до 0,2.

Нижче розглянуті можливі джерела методичних похибок при різних умовах вимірювання температури.

Методична похибка, обумовлена впливом теплообміну випромінюванням

При вимірюванні температур газів контактними методами необхідно мати на увазі, що методичні похибки, які обумовлені впливом теплообміну випромінювання між теплоприймачем і оточуючими його тілами чи стінкою труби, при несприятливих умовах можуть значно перевищувати допустимі похибки використовуваних засобів вимірювання.

Якщо допустити, що тепловідвід термометроробочача 1, який встановлений в трубопроводі чи газоході 2 (рис. 3.1), відсутній, то при тепловому режимі який

встановився кількість тепла, яку отримує від газу занурена частина теплоприймача рівна кількості тепла, яке віддає поверхня теплоприймача шляхом теплообміну з поверхнею стінки труби.

Кількість тепла, яку отримує поверхня теплоприймача від газу протікаючого в трубопроводі можна визначити за залежністю:

$$Q_k = \alpha F(t_g - t_T), \quad (2.23)$$

де: α - коефіцієнт тепловіддачі від газу до теплоприймача, Вт/(м²·К); F – поверхня зануреної частини теплоприймача, м²; t_g – температура газу, який протікає в трубопроводі, °С; t_T – власна температура робочої частини теплоприймача, °С.

Кількість тепла, що віддається поверхнею зануреної частини теплоприймача шляхом променевого теплообміну з поверхнею стінки труби, становить:

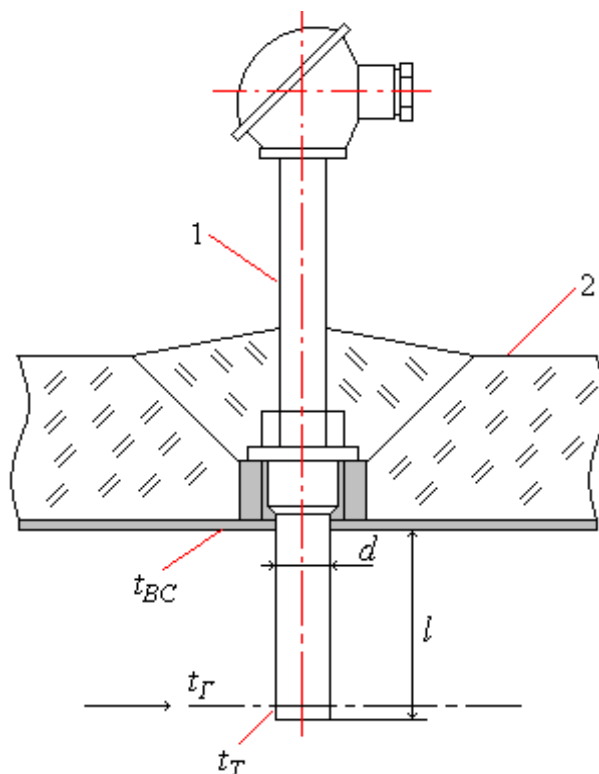


Рис. 2.1. Схема встановлення термоперетворювача на трубопроводі: 1 – термоперетворювач; 2 – трубопровід.

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{тп}} \delta_0 F \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{B.C.}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.24)$$

де $\varepsilon_{ПР}$ – приведений коефіцієнт чорноти системи двох тіл, в даному випадку поверхонь термоперетворювача і стінки труби; σ_0 – константа випромінювання абсолютно чорного тіла (постійна Стефана-Больцмана): $\sigma_0=5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_T і $T_{B.C}$ – температура робочої частини термоприймача і внутрішньої стінки трубопроводу, К.

Оскільки термоперетворювач знаходиться всередині труби і його поверхня F мала порівняно з поверхнею стінки труби, то можна прийняти приведений коефіцієнт чорноти системи $\varepsilon_{ПР}$ рівним коефіцієнту ε_T поверхні термоперетворювача [19, 20]. В цьому випадку рівняння (3.24) прийме вигляд:

$$Q_{Л} = CF \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{B.C}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.25)$$

де C – коефіцієнт випромінювання поверхні термоперетворювача; $C = \varepsilon_{ПР} \sigma_0 = 5,67 \varepsilon_T$, Вт/(м²·К⁴).

Розв'язуючи рівняння (2.23) і (2.25), врахувавши, що $Q_K = Q_{Л}$, отримаємо формулу для визначення поправки $\Delta t = t_T - t_{T'}$ або методичної похибки вимірювання температури:

$$\Delta_{M.B} = t_T - t_{T'} = -\frac{C}{\alpha} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{B.C}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.26)$$

Методична похибка, обумовлена теплообміном через теплопровідність

Під час вимірювання температур рідин чи газів ТП встановлюють в трубопроводі чи в інших місцях технологічного обладнання і закріплюють його тим чи іншим способом. При цьому температура місць закріплення ТП переважно відрізняється від температури середовища. Внаслідок цього розподілення температур по довжині ТП буде нерівномірним через теплопідвід (чи тепловідвід) температура робочої частини може відрізнятись від дійсної температури середовища.

Слід мати на увазі, що методичну похибку, обумовлену теплопровідністю, так як похибку променевого теплообміну, з достатньою ступеню точності можна визначити тільки експериментальним шляхом. Величину можливої похибки

вимірювання визначають розрахунковим шляхом при припущенні, що термоприймач представляє собою однорідний стержень (трубу) довжиною l , один кінець якого закріплений в стінці, наприклад трубопроводі (рис. 2.2).

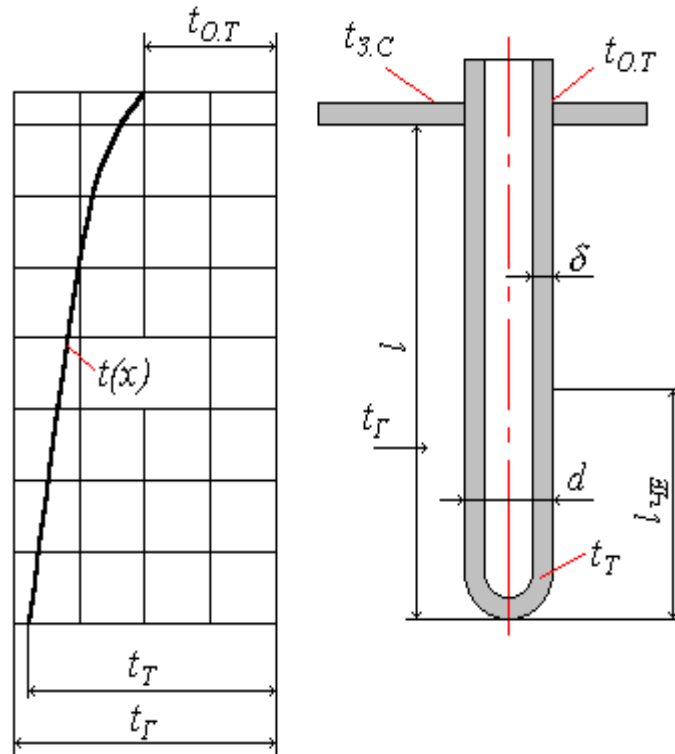


Рис. 2.2. Схема встановлення ідеалізованого термоприймача без виступаючої частини.

Температура $t_{O.T}$ біля основи такого ТП, тобто в місці його з'єднання з стінкою, відрізняється від температури t_T робочої частини ТП ($x=0$), а разом з тим і від температури t_T середовища. Температура $t_{O.T}$ наближено приймається рівною температурі $t_{3.C}$ зовнішньої стінки трубопроводу. Передбачається, що в кожному поперечному перерізі ТП розподілення температур рівномірне і температура $t(x)$ термоприймача змінюється тільки вздовж його осі .

Рівняння, яке описує зміну температури такого ідеалізованого ТП, має вигляд:

$$\frac{d^2 t(x)}{dx^2} = m^2 [t_T - t(x)], \quad (2.27)$$

де:

$$m = \sqrt{\frac{\pi d \alpha}{\lambda_M f}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_M \delta}}; \quad (2.28)$$

d – зовнішній діаметр термоприймача, м; α - коефіцієнт тепловіддачі від середовища до термоприймача, Вт/(м²·К); λ_M – коефіцієнт теплопровідності матеріалу термоприймача (трубки), Вт/(м·К); f – площа поперечного перерізу термоприймача ($f = \pi d \delta$, де δ - товщина стінки термоприймача, м), м².

Кількістю тепла, яке поступає через торець ТП при $x=0$, переважно нехтують. В цьому випадку

$$\left. \frac{dt(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0.$$

Розв'язуючи рівняння (2.27) з врахуванням граничних умов і приймаючи, що комплекс m^2 не залежить від координати x , отримаємо [30, 31]:

$$\frac{t_r - t(x)}{t_r - t_{o.T}} = \frac{ch(mx)}{ch(ml)}. \quad (2.29)$$

З цього виразу при $x=0$ отримаємо формулу для визначення поправки $\Delta t = t_r - t_T$ чи методичної похибки $\Delta_{M.T}$ вимірювання температури:

$$\Delta_{M.T} = t_T - t_r = -\frac{t_r - t_{o.T}}{ch(lm)}; \quad (2.30)$$

де t_r , t_T і $t_{o.T}$ – відповідно температура середовища, робочої частини термоприймача ($x=0$) і в місці з'єднання його з стінкою труби ($x=l$), °С; l – довжина зануреної частини термоприймача, м; m – згідно формули (2.28).

Температура t_T термоприймача при $x=0$ може бути прийнята з деяким наближенням до температури його робочого кінця. Проте при вимірюванні температури термоперетворювачем опору внаслідок великих розмірів чутливого елемента, середня температура t'_T робочої частини термоприймача буде менша, ніж температура t_T при $x=0$.

Якщо чутливий елемент термоприймача (наприклад, ТО) розташований на деякій довжині $l_{чЕ}$ (рис. 2.2), то середня температура t'_T його робочої частини, а

разом з тим і методична похибка, визначається на основі виразу (2.29) за залежністю [30]:

$$\Delta_{M.T} = t'_T - t_T = -\frac{t_T - t_{o.T}}{ch(lm)} \cdot \frac{sh(lmb)}{lmb}, \quad (2.31)$$

де $b = \frac{l_{qe}}{l}$ - відносна довжина ділянки усереднення температури.

Якщо ТП омивається потоком середовища поздовжньо, то методична похибка для всіх типів ТП визначається за формулою (2.30).

2.2. Дослідження динамічних властивостей термопретворювачів

З явищем теплової інерції доводиться зустрічатись в різних областях вимірювальної техніки. Всебічність цього явища заставляє приділити йому особливу увагу. Розглянемо типовий випадок прояву теплової інерції.

На практиці часто доводиться зустрічатись з випадком, коли температура θ середовища постійна, а внесене в середовище тіло в початковий момент часу має температуру U_0 , яка відрізняється від температури середовища. Досвід показує, що в цьому випадку температура тіла асимптотично наближається до температури середовища (рис. 2.3). Це випадок так званого “простого” охолодження чи нагрівання.

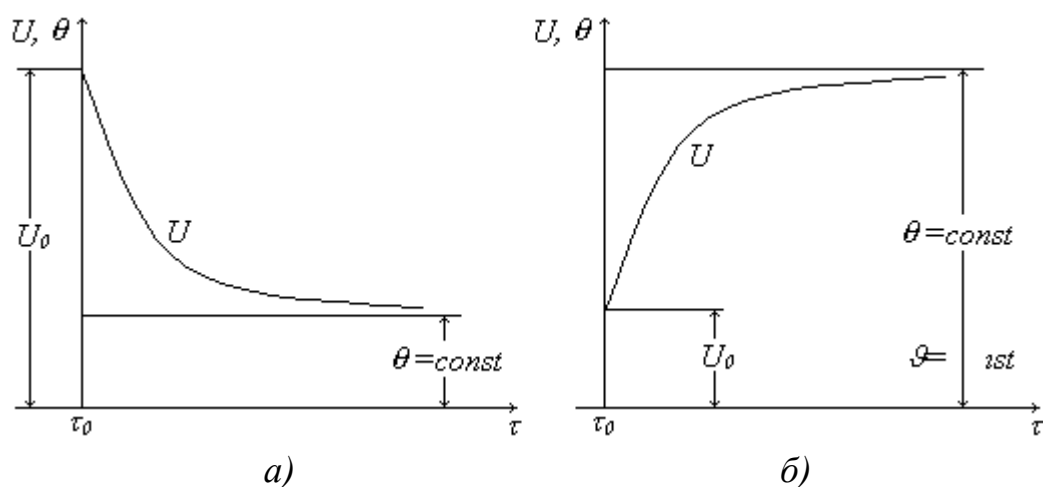


Рис. 2.3. Просте охолодження (а) і нагрівання (б) тіла.

Рівняння різниці температур системи і середовища має вигляд [32]:

$$u - \theta = (u_0 - \theta_0) e^{-m(\tau - \tau_0)} - e^{-m\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{m\tau} F'(\tau) d\tau \quad (2.32)$$

де: $\theta = F(\tau)$; $m = \frac{\alpha S}{C}$; α - коефіцієнт тепловіддачі; S - площа поверхні термоперетворювача; C - середня питома теплоємність термоперетворювача.

Для випадку простого нагрівання чи охолодження

$$\theta = F(\tau) = t = const. \quad (2.33)$$

Тоді отримаємо:

$$u - \theta = (u_0 - t) e^{-m(\tau - \tau_0)}, \quad (2.34)$$

оскільки $F'(\tau) = 0$.

Тобто, різниця температур тіла і середовища при його простому охолодженні чи нагріванні змінюється за експоненціальним законом.

Замість коефіцієнта m , який визначає характер експоненти, часто вводять обернену величину

$$\varepsilon = \frac{1}{m} = \frac{C}{S\alpha}, \quad (2.35)$$

яку називають показником теплової інерції термоперетворювача.

Величина ε має розмірність часу, тоді як m має розмірність

$$[m] = \frac{1}{\text{од. часу}} = (\text{од. часу})^{-1}.$$

Формула (2.34) може бути представлена ще простіше: прологарифмувавши її, отримаємо:

$$\ln|u - \theta| = -\frac{\tau}{\varepsilon} = const. \quad (2.36)$$

Звідси видно, що залежність $\ln|u - \theta|$ від часу зображається прямою лінією (рис 2.4) з від'ємним кутовим коефіцієнтом (бо $\varepsilon > 0$).

Цей результат отриманий чисто теоретичним шляхом, як наслідок перекладу на мову математики деяких передумов про теплообмін між тілом і

середовищем. В ряді випадків цей результат в повній мірі підтверджується дослідями.

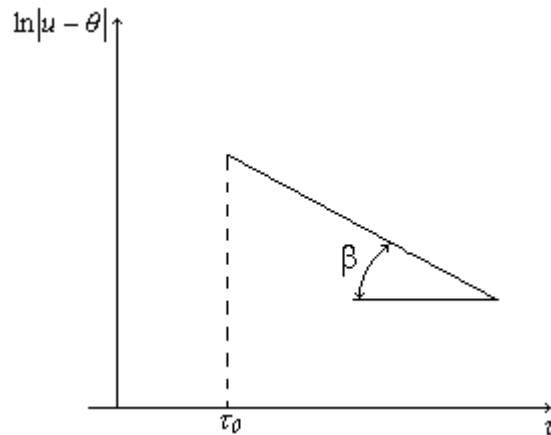


Рис 2.4. Графік простого охолодження тіла в напівлогарифмічних координатах ($\theta = const$; $tg\beta = m$).

З рівняння (2.32), застосувавши до інтеграла в його правій частині узагальнену теорему про середнє значення інтеграла, отримаємо:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} e^{mz} F'(z) dz = F'(\xi) e^{m\xi},$$

де ξ знаходиться між τ_0 і τ . $\tau_0 < \xi < \tau$.

Тут ми користуємося узагальненою теоремою про середнє значення інтеграла, яка полягає в наступному. Нехай підінтегральна функція може бути представлена як добуток двох функцій $f(x)$ і $\varphi(x)$ причому нехай $\varphi(x)$ монотонно зростає чи спадає на інтервалі (a, b) , в межах якого береться інтеграл. Тоді інтеграл від функції $f(x)\varphi(x)$ рівний

$$\int_b^a f(x)\varphi(x)dx = f(\xi)\int_b^a \varphi(x)dx, \quad (2.37)$$

де ξ число в інтервалі (a, b) .

Замінивши в рівнянні (2.37) a і b на τ_0 і τ , а x на z і вважаючи, що $\varphi(x) = e^{mx}$, отримаємо попередню формулу.

Тому формулу (2.32) можна також записати в наступному вигляді:

$$u - \theta = (u_0 - \theta_0) e^{-m(\tau - \tau_0)} - F'(\xi) \frac{1 - e^{-m(\tau - \tau_0)}}{m} \quad (2.38)$$

З формули (2.38) випливає, що як тільки похідна $\frac{d\theta}{d\tau} = F'(\tau)$ не приймає нескінченних значень – а такі значення не мають фізичного змісту, – то згідно з елементарною теорією відставання u від θ завжди залишається кінцевою величиною, яка з часом, тобто по мірі зростання $\tau - \tau_0$ (це тягне за собою наближення до нуля виразу $e^{-m(\tau - \tau_0)}$), виражається простою формулою:

$$u - \theta = -\varepsilon F'(\xi). \quad (2.39)$$

Рівність (2.39) показує, що для даної системи і для даних умов тепловіддачі, теплова інерція її залежить – в кінцевому рахунку – від швидкості зміни температури середовища.

Громіздкість математичних виразів, які характеризують тепловий стан тіла, є серйозними перешкодами для використання їх при аналізі динамічних властивостей теплових вимірювальних перетворювачів. В той же час, при розгляді динамічних властивостей термометра, необов'язково знати розподілення температурного поля всередині термометра, а важливо визначити його реакцію на зовнішні збурення, тобто зміну його опору.

Динамічні властивості термометра мають дві характеристики: функцію передачі W , яка показує реакцію термометра на зміну температури досліджуваного середовища, і функцію нагріву Q , яка показує нагрів термометра від зміни розсіювальної потужності. Характер цих функцій буде залежати не тільки від конструктивних особливостей термометра, але й від умов теплообміну, які можуть бути різноманітними.

2.3. Розробка узагальненої математичної моделі термоперетворювача

Для того, щоб задовольнити вимоги споживачів та прискорити виробництво ТП з заданими метрологічними характеристиками, розширення їх номенклатури і можливості прискореної модернізації, необхідно скоротити терміни і підвищити якість їх проектування. Ефективним методом прискорення проектування ТП високого класу, із забезпеченням їх відповідної якості і техніко-економічних показників є створення для різноманітних конструктивних виконань

термоперетворювачів системи узагальнених математичних моделей і ефективних загальних методів розв'язку задач теплопровідності для розроблених моделей. З допомогою такої системи, змінюючи конструктивні розміри елементів ТП, використовуючи матеріали з певними теплофізичними характеристиками, умови теплообміну з допомогою виведених математичних розв'язків, можна створити оптимальні конструкції ТП і дослідити залежність метрологічних характеристик термоперетворювачів від цих параметрів. В даний час немає ефективної інженерної системи узагальнених математичних моделей ТП, які б дозволили оцінити розрахунковим шляхом вплив геометричних і теплофізичних параметрів конструкцій ТП на їх метрологічні характеристики.

При математичному моделюванні складних конструкцій ТП і умов теплообміну виникають певні проблеми. Однією з проблем є врахування неоднорідності конструкції ТП. Найефективніше моделювати ТП кусково-однорідним тілами, а теплофізичні характеристики елементів конструкцій описувати єдиним виразом за допомогою асиметричних одиничних функцій для всього тіла як єдиного цілого. При цьому кожний елемент конструкції має своє конкретне значення теплофізичної характеристики. Застосовуючи узагальнені функції до складання вихідних диференціальних рівнянь теплопровідності кусково-однорідних тіл та умов теплообміну, можна одержати єдиний розв'язок для всього термоперетворювача.

Іншою проблемою, яка виникає при математичному моделюванні, є врахування залежності теплофізичних характеристик матеріалів конструкцій від температури. Застосування усереднених значень теплофізичних характеристик на проміжках їх значної зміни в залежності від температури приводить до неточного визначення значень метрологічних характеристик. Введення аналітичних залежностей теплофізичних характеристик у рівняння теплопровідності та крайові умови у вигляді неперервних аналітичних функцій приводить до диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, що не дає можливості одержати замкнутий аналітичний вираз. Наближені розв'язки таких рівнянь вимагають значного часу та мають недостатню точність. Для підвищення точності визначення

метрологічних характеристик ТП запропоновано методику опису залежностей теплофізичних характеристик від температури з допомогою асиметричних одиничних функцій, що дозволяє максимально врахувати реальні значення характеристик і одержати замкнутий аналітичний розв'язок поставленої задачі. Залежності коефіцієнтів теплопровідності $\lambda(T)$ і теплоємності $C(T)$ елементів конструкцій від температури T запропоновано описувати у вигляді:

$$\begin{aligned}\lambda(T) &= \lambda_0 + \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \cdot S(T - T_i) \\ C(T) &= C_0 + \sum_{j=1}^m (C_j - C_{j-1}) \cdot S(T - T_j)\end{aligned}\tag{2.40}$$

де: λ_0, C_0 – величини коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності при найменшій температурі розглядуваного інтервалу;

$(T-T_i), (T-T_j)$ – інтервали температури, на яких величини λ і C можна вважати постійними із заданою точністю;

$S(T-T_i)$ – одинична асиметрична функція, яка дорівнює:

$$S(T-T_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } T > T_i \\ 0.5, & \text{якщо } T = T_i \\ 0, & \text{якщо } T < T_i \end{cases}$$

n, m – кількість різних значень λ_i та C_i відповідно.

Усереднені значення $\lambda(T)$ і $C(T)$ на проміжку $(T_{i-1}; T_i)$ записується у вигляді:

$$\begin{aligned}\lambda_{cep} &= \frac{1}{T_i - T_{i-1}} \int_{T_{i-1}}^{T_i} \lambda(T) dT; \\ C_{cep} &= \frac{1}{T_i - T_{i-1}} \int_{T_{i-1}}^{T_i} C(T) dT.\end{aligned}\tag{2.41}$$

Записані таким чином усереднені значення коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності не вносять великої складності в постановку задачі теплопровідності, але дозволяють одержати аналітичний розв'язок у замкнутому виді, що дає можливість зробити аналіз температурного поля ТП та підвищити точність розрахунку метрологічних характеристик.

Конструкції термоперетворювачів у вигляді циліндра з поздовжніми каналами, центри яких розміщені на концентричному колі, при визначенні

інструментальної похибки, зумовленої нагрівом вимірювальним струмом, змодельовано циліндром радіуса R з n різнорідними круговими тепловиділяючими включеннями радіуса R_0 , які рівномірно розміщені на концентричному колі радіуса B [35] коефіцієнти теплопровідності циліндра і включень відповідно рівні λ_l і λ_0 , питома потужність джерел тепла у включеннях ω_0 . Бічна поверхня циліндра $\rho-R$ підтримується при постійній температурі рівній t_R .

Враховуючи симетрію задачі, з циліндра виділяємо сегмент $\left\{0 \leq \rho \leq R; 0 \leq v \leq \frac{\pi}{n}\right\}$ і для нього записуємо рівняння теплопровідності і крайові умови в стаціонарному режимі:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left[\rho \lambda^*(\rho, v) \frac{dt}{d\rho} \right] + \frac{1}{\rho^2} \frac{d}{dv} \left[\lambda^*(\rho, v) \frac{dt}{dv} \right] + w^*(\rho, v) = 0 \quad (2.42)$$

$$\left. \frac{dt}{dv} \right|_{v=0} = 0, \quad \left. \frac{dt}{dv} \right|_{v=\frac{\pi}{n}} = 0, \quad (2.43)$$

$$\left. \frac{dt}{d\rho} \right|_{\rho=0} = 0, \quad t|_{\rho=R} = 0 \quad (2.44)$$

Для ТП у формі концентричних циліндрів та циліндрів з поздовжніми каналами при розгляданні інструментальних похибок, зумовлених відтоком (притоком) тепла від чутливого елемента по елементах конструкції, дані ТП змодельовано ступінчастими по перерізу і кусково-однорідними по довжині стрижнями.

Рівняння стаціонарної теплопровідності має наступний вигляд:

$$\frac{d^2 T}{dz^2} = \left\{ T - \left[t_c^{(1)} - (t_c^{(2)} - t_c^{(1)})S - (z - l_1) \right] \right\} \cdot \left\{ \chi_1^2 (1 + S - (z - 1)) - \left[\chi_2^2 - (\chi_4^2 - \chi_2^2)S - (z - l_1) \right] \cdot S(z - 1) \right\} \quad (2.45)$$

де:

$$\chi_1^2 = \frac{2\alpha_1}{\lambda_1 R_1} \left(1 + \frac{\alpha_1 R_1}{4\lambda_1} \right)^{-1} + \frac{8\sigma\varepsilon_1 (t_c^{(1)})^3}{\lambda_1 R_1};$$

$$\chi_2^2 = \frac{2\alpha_2}{\lambda_2 R_2} + \frac{8\sigma\varepsilon_2 (t_c^{(2)})^3}{\alpha_2 R_2};$$

$$\chi_4^2 = \frac{2\alpha_4}{\lambda_4 R_4} + \frac{8\sigma\varepsilon_4 (t_c^{(2)})^3}{\alpha_4 R_4}.$$

Теплофізичні характеристики з індексом “1” відносяться до частини стержня, який моделює теплочутливий елемент і знаходиться в вимірювальному середовищі з температурою $t_c^{(1)}$. Теплофізичні характеристики з індексом “2” відносяться до частини стержня, який моделює струмовиводи і знаходиться в вимірювальному середовищі з температурою $t_c^{(1)}$. Теплофізичні характеристики з індексом “4” відносяться до частини стержня, який моделює струмовиводи і знаходиться у вимірювальному середовищі з температурою $t_c^{(2)}$. z – координата; T – температура тіла; l – довжина частини стержня, який моделює теплочутливий елемент; l_1 – довжина відрізка стержня, який знаходиться у вимірювальному середовищі. R_1 і R_2 – радіуси частин стержня.

2.4. Дослідження термометричних та конструктивних матеріалів для виготовлення термоперетворювачів

Основою якості ТП є термометричні та конструктивні матеріали, стабільність їх електрохімічних, хімічних і механічних властивостей в широкому діапазоні температур. Замість метрологічного контролю зібраних термоперетворювачів перспективним і економічно вигідним є метрологічне забезпечення контролю виготовлення термометричних матеріалів.

Недостатнє приділення уваги металознавчій стороні конструювання термоперетворювачів в значній мірі відображається на їх властивостях. Високі технічні параметри термоперетворювачів закладаються на стадії розробки, дослідження і виготовлення термометричних матеріалів.

В табл. 2.1 показаний взаємозв'язок технічних параметрів термоперетворювачів з їх конструктивними особливостями і з властивостями матеріалів, які використовуються в ТП.

Взаємозв'язок технічних параметрів термометрів з їх конструктивними особливостями і з властивостями матеріалів

Основні технічні параметри ТП	Фактори, які визначають ці параметри
Діапазон вимірювання	Температура плавлення, жаростійкість, летучість чутливого елемента, електроізолятора, захисної арматури і захисного покриття; сумісність між собою матеріалів чутливого елемента, електроізолятора, захисної арматури і захисного покриття; хімічна стійкість захисної арматури і захисного покриття в вимірюваному середовищі.
Номінальна статична характеристика ТП	Хімічний склад, фізичний стан, електрофізичні властивості і їх відтворюваність [$E=f(T, \tau)$, $R=F(T, \tau)$], електричний опір електроізолятора; технологія отримання матеріалу чутливого елемента.
Похибка вимірювання	Фізико-хімічна однорідність, досконалість структури, термомеханічні напруження, стабільність електрофізичних властивостей матеріалу чутливого елемента, електричний опір електроізолятора, технологія отримання чутливого елемента, конструкція і методи перевірки ТП.
Інерційність	Теплопровідність матеріалів чутливого елемента, електроізолятора, захисної арматури і захисного покриття; конструкція робочого кінця ТП.
Надійність	Матеріали, конструкція, технологія виготовлення, методи контролю ТП.

Аналіз стану металознавства в термометрії показав необхідність розробки критерію вибору (створення) термометричних матеріалів. При цьому слід враховувати цілий ряд вимог, як і до властивостей матеріалів, їх технологічності і сумісності з конструктивними матеріалами і вимірювальним середовищем, так і до однорідності і стабільності метрологічних характеристик при експлуатації. Цей критерій визначається за такою формулою:

$$K_{\text{че}} = \frac{T_{\text{пл}} \cdot T_{\text{рекр}} \cdot T_{\text{вз}}}{T_{\text{кп}} \cdot \Delta_{\text{нелд}} \cdot \Delta_{\text{стаб}}} \quad (2.46)$$

де:

$K_{\text{че}}$ - критерій вибору матеріалу чутливого елемента термометрів;
 $T_{\text{пл}}$ - температура плавлення (характеризує жаростійкість), К; $T_{\text{рекр}}$ - температура рекристалізації, К; $T_{\text{вз}}$ - температура взаємодії (початку реакції) з

конструктивними матеріалами і вимірювальним середовищем, К; $T_{кп}$ - температура переходу в крихкий стан (характеризує технологічність), К; $\Delta_{неод}^*$ - неоднорідність термометричних властивостей (відхилення від статичної характеристики), К; $\Delta_{стаб}^*$ - зміна термометричних властивостей після 2 годин нагріву (стабільність показів), К.

Розрахунки показують, що термометричні матеріали термоперетворювачів, які забезпечують сучасний рівень, повинні мати $K_{че}$ не менше 10^5 .

Слід врахувати, що на термометричні властивості матеріалів в значній мірі впливає технологія їх отримання. Досліди показали, що наприклад, збільшення щільності металокерамічних штабиків молібдену з 9,6 до 9,8 г/см³ призводить до росту термоЕРС, отриманої здроту діаметром 0,5 мм на 30 мкВ при температурі 1500 °С. 30%-на деформація при волочінні дроту знижує рівень його термоЕРС при 1500 °С в середньому на 25 мкВ.

Розглянемо основні термометричні матеріали, які можна використати для забезпечення діапазону температур в хлібопекарній промисловості.

Хромель – копелева термопара (тип ХК(L)). Із всіх промислових термопар має високу термоЕРС і відрізняється високою лінійністю. Додатній термоелектрод – хромель (сплав нікелю з 9,5% хрому) володіє високою жаростійкістю, стійкий до окислення і сульфуризації. Термопара з хромелевого і копелевого проводу діаметром 1,5; 3,2; 5,0 мм стабільно може працювати довший час (10000 год). Зменшення в десять раз діаметра дроту, приводить до зменшення часу стабільної роботи в стільки ж разів.

Хромель – алюмелеві термопари (тип ХА(K)) є найбільш високотемпературними (1300 °С) і жаростійкими серед термопар з неблагородних металів. Алюміній (1,6 – 2,4 %), яким легують нікель, зменшує його окислення на повітрі, утворюючи щільний окисний шар; марганець (0,6 – 1,2 %) і кремній (0,85 – 1,50 %) захищає нікелевий термоелектрод від впливу сірки, зв'язуючи її на поверхні в сульфіди. Хромель – алюмелеві термопари практично нечутливі до нейтронного опромінення і тому часто застосовуються в ядерних реакторах.

Основний недолік хромель – алюмелевих термопар – висока чутливість до деформації.

Платино-родій – платинова термопара (тип $ПП(S)$) може використовуватись для неперервних вимірювань в окислювальних і інертних середовищах при температурі до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ з невеликою зміною номінальних статичних характеристик, до $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – з невеликим дрейфом і до $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для короткочасних вимірювань. ТермоЕРС термопари повільно зменшується з часом при температурах вище $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ внаслідок випаровування родію чи міграції родію в платиновий термоелектрод, який дуже чутливий до цього забруднення.

Найбільші труднощі виникають з вибором конструктивних тепло- та електроізоляційних матеріалів під час вимірювання температури газових потоків, де за самою природою можливі швидкі зміни температури, а також погіршені умови теплообміну між потоком і ТП. Тому вибору матеріалів для забезпечення необхідних експлуатаційних та метрологічних характеристик ТП необхідно приділяти велику увагу.

Важливим елементом ТП є вогнетривка теплова та електрична ізоляція, яка суттєво впливає на їх надійність, динамічні характеристики та точність вимірювання температури.

При виборі конструктивних теплоізоляційних матеріалів високотемпературних ТП необхідно враховувати такі їх властивості: 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.

При виборі матеріалів в якості захисної арматури високотемпературних термоперетворювачів розглядаються наступні їх властивості: жаростійкість в заданому середовищі, термостійкість, газощільність, технологічність, теплопровідність, сумісність з іншими елементами конструкції (вплив на стабільність метрологічні характеристики чутливих елементів).

Керамічні матеріали, які використовуються при створенні ТП, умовно можна розділити на декілька груп в відповідності з їх призначенням: електроізоляційна кераміка, матеріали для захисної арматури і вогнестійкі покриття. До кожної групи є окремі специфічні вимоги.

Електроізолятори, крім своєї основної функції (електричної ізоляції термоелектродів), виконують роль елемента конструкції і несуть значні механічні навантаження, захищають термоелектроди від дії навколишнього середовища. Параметри, які визначають придатність матеріалів до використання їх в якості електроізоляторів ТП є наступні: термостійкість; хімічна сумісність з матеріалом термоелектродів і захисної арматури; наявність в ізоляторах домішок, які впливають на термоелектричні властивості термоелектродів і їх стабільність; теплопровідність; коефіцієнт лінійного розширення; летучість; технологічність.

Теоретичні розрахунки показують, що для того, щоб технічні параметри термоперетворювачів відповідали вимогам міжнародних стандартів, питома електропровідність кераміки не повинна перевищувати значення які наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Питома електропровідність кераміки

Тип ТП	Електропровідність при температурі $^{\circ}\text{C}$, $\text{Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$					
	20	300	500	850	1000	1500
ТП	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-3}$
ТС	$2 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}$	-	-

Цим вимогам в певних діапазонах температур відповідають чисті оксиди (SiO_2 , Al_2O_3 , BeO , T_2O_2 , MgO , ZrO_2).

Оксид алюмінію (Al_2O_3). Найбільше поширення при виготовленні промислових термоперетворювачів отримали електроізолятори на основі глинозему (Al_2O_3). Температура плавлення якого коливається від 1995 до 2050 $^{\circ}\text{C}$. При низьких температурах існує декілька модифікацій чистого глинозему, але при нагріванні всі вони перетворюються в α – глинозем (корунд).

Оксид магнію (MgO). Температура плавлення MgO складає 2640 – 2900 °С. Оксид магнію має єдину модифікацію, яка називається периклаз. Чистий оксид магнію стійкий в повітрі, азоті, оксиді вуглецю, аміаку і вакуумі до температури 1700 °С.

Оксид берилію BeO – найбільш широко вживаний електроізолятор при вимірюванні температури вище 1800 °С. Температура плавлення BeO складає 2450 – 2550 °С. BeO має одну кристалічну модифікацію – гексагональну структуру. Оксид берилію порівняно з іншими оксидами при високих найбільш інертний, не втрачає своїх властивостей при роботі в вакуумі до температури 2000 °С. BeO не взаємодіє з воднем, азотом і оксидом вуглецю (до 2000 °С), проте нестійкий в середовищах з галоїдами і H₂S.

Для захисту термочутливих елементів від дії вимірювального середовища використовується захисна арматура. Найбільш широко в якості захисної арматури використовують корозійностійкі, жаростійкі сплави на основі заліза, нікелю, хрому і домішок алюмінію, кремнію, марганцю.

Нержавіюча хромиста сталь феритного класу 08X13, яка містить 13% хрому, пластична, використовується в перетворювачах для вимірювання температури до 650 °С в слабоагресивних середовищах.

Широке застосування при створенні захисної арматури отримали аустенітні стабілізовані сталі 12X18H1T і 08X18H10T. Стійкість сталей до міжкристалічної корозії обумовили їх використання для кабельних термоперетворювачів, які використовуються при вимірюванні температури в умовах опромінення в ядерних реакторах.

В якості замітника сталі марки 12X18H10T для ТП, які не піддаються дії ударних навантажень, рекомендується сталь 15X15T.

Більш високотемпературним є сплав ХН45Ю, арматура з якого довший час може працювати при температурі до 1300 °С і короткочасно до 1400 °С. В сплаві підібраний оптимальний склад заліза, хрому, нікелю і алюмінію, який забезпечує високу жаростійкість обумовлену захисними властивостями окалини, і хорошу пластичність при виготовленні з нього труб.

3. РОЗРОБЛЕННЯ БАЗОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1. Вибір методу вимірювання температури

Завдання розроблення засобу для вимірювання температури зводиться до вибору методу вимірювання та відповідного його конструктивного оформлення для можливості експлуатації в даному вимірюваному середовищі та забезпечення потрібних метрологічних характеристик.

Розглянемо послідовність розроблення ТП.

Вибір методу вимірювання температури є складною проблемою в зв'язку з тим, що необхідно враховувати ряд факторів, які часто можуть бути суперечливими. Термоперетворювачі повинні витримувати і термічні режими роботи при збереженні достатньої стабільності номінальної статичної характеристики і механічної стійкості за задану кількість циклів нагрівання і охолодження, що є характерним для змінних і короткочасних теплових процесів. Правильний вибір методу вимірювання температури дає можливість отримати вірогідні результати.

Основними факторами, які необхідно враховувати при виборі методу вимірювання температури є:

1. Робочий діапазон температур. Даний фактор є одним із найважливіших. Питання про можливість використання даного методу вимірювання і побудованого на його основі перетворювача повинно вирішуватися з врахуванням умов експлуатації і швидкості зміни НСХ при вимірювання даного рівня температури. Верхнім температурним діапазоном використання приймається те значення температури, при якому за необхідний період експлуатації перетворювача зміна його НСХ не перевищує допустимі значення, встановлені в нормативно-технічній документації.

2. Однорідність температурного поля досліджуваного об'єкта. Для вимірювання можуть використовуватися контактні і безконтактні методи вимірювання. При цьому конструктивні особливості перетворювачів повинні враховувати умови теплообміну їх з об'єктом. Так, при вимірювання локальних температур в неоднорідному температурному полі контактні методи призведуть

до значних спотворень температурного поля. Тому для забезпечення оптимальних умов теплообміну необхідно правильно визначити співвідношення габаритних розмірів досліджуваного об'єкта і термоперетворювача.

При використанні безконтактних методів необхідно правильно вибрати властивість теплового випромінювання відповідний первинний перетворювач.

3. Агресивність об'єкта. Стабільність НСХ термоперетворювача при високих температурах значною мірою залежить від хімічної взаємодії матеріалів з вимірюваним середовищем. Тому для забезпечення надійної роботи в агресивних середовищах необхідно конструювати термоперетворювач, яких буде захищений від хімічної взаємодії з середовищем.

4. Властивості середовища, що оточують об'єкт. При безконтактному методі вимірювання середовище, яке оточує об'єкт, є одним із основних джерел виникнення систематичних і випадкових (при змінах властивостей середовища) складових похибки вимірювання температури.

Використання контактних методів також залежить від властивостей середовища, оскільки встановлення термоперетворювача порушує теплообмін між ним і об'єктом. А зміна умов теплообміну призводить до виникнення додаткових похибок вимірювання.

5. Вібраційні і ударні навантаження. Враховувати навантаження, які діють на встановлений на об'єкті термоперетворювач, важливо в першу чергу з точки зору забезпечення його міцнісних характеристик. Крім цього, вібраційні й ударні прискорення призводять до тензометричного ефекту, що може стати додатковим джерелом похибок, а використання пристроїв для амортизації термоперетворювачів може призвести до паразитного теплового опору між ним і об'єктом і стати джерелом систематичних похибок вимірювання температури.

6. Необхідна точність вимірювання. Вона визначається допустимим значенням інтегральної похибки результату вимірювання. Із цього значення необхідно виділити частину, яка визначає допустимі значення випадкової і систематичної складової похибки результатів вимірювання. Інша частина визначить значення похибки для вибору термоперетворювача.

7. Тривалість процесу вимірювання. Якщо тривалість процесу незначна до 1 с), то використання контактних методів призводить до значних динамічних похибок і більш ефективним буде використання безконтактних методів вимірювання. При вимірюванні високих температур інколи доводиться штучно зменшувати тривалість процесу вимірювання, щоби уникнути перегріву термоперетворювача. В цьому випадку вимірне значення температури знаходять розрахунковим методом за перехідною кривою нагрівання термоперетворювача.

8. Динаміка процесу вимірювання. При виборі термоперетворювача для дослідження нестационарних процесів вимірювання особливу увагу необхідно звертати на динамічні характеристики термоперетворювача, які визначаються показником теплової інерції.

9. Реєстрація результатів вимірювання. Похибка реєстрації результатів вимірювання визначається класом точності вимірювального приладу, який характеризує величину його зведеної похибки. Серійні прилади для реєстрації на діаграмній стрічці забезпечують фіксацію результатів з похибкою $\pm 0,5$ %. Для зручності контролю і керування технологічними процесами широке використання отримали цифрові вторинні прилади, основна похибка яких не перевищує $\pm 0,25$ %.

Найбільш повно вказаним вимогам відповідають електричні контактні методи вимірювання з допомогою термоперетворювачів опору (ТО) і термопар (ТП), які в подальшому будемо розглядати.

До основних переваг контактного методу можна віднести конструктивну простоту; дешевизну (в порівнянні з іншими методами); відносно легкий спосіб індикації; висока надійність, що забезпечується електричним методом вимірювання; можливість значного підвищення місцевої роздільної здатності при зменшенні діаметра термоперетворювача; можливість локального вимірювання температури. Крім цього електричний метод в принципі дозволяє неперервні вимірювання, що важливо при використанні термоперетворювачів в системах автоматичного вимірювання, контролю та регулювання.

Таким чином, в даній роботі будуть розглянуті контактні методи вимірювання температури .

Основними недоліками контактного методу є вторгнення ТП в зону вимірювання, що може призводити до виникнення додаткових похибок, а також порушення температурного поля об'єкта.

При створенні контактних ТП основна складність виникає у виборі необхідних матеріалів зі стабільними характеристиками як для термочутливих елементів, так і для захисної арматури.

ТП необхідно проектувати так, щоб значення методичної похибки вимірювання температури було мінімальним. Для цього певним чином необхідно спроектувати конструкцію вимірювального блоку термоперетворювача.

3.2. Мінімізація методичної похибки вимірювання, обумовленої впливом теплообміну випромінюванням

Методична похибка вимірювання пропорційна коефіцієнту випромінювання C поверхні термоприймача і для її зменшення вигідно використовувати ТП з гладкою або блискучою поверхнею, оскільки коефіцієнт чорноти ε_T , а відповідно, і випромінювання C для гладких поверхонь менший, ніж для шорсткуватих. Крім того, похибка випромінювання буде зменшуватись при збільшенні швидкості середовища, оскільки коефіцієнт тепловіддачі збільшується при зростанні швидкості потоку. Також слід мати на увазі, що методична похибка вимірювання температури газового середовища зменшиться, якщо використовувати термоприймачі менших діаметрів.

Методична похибка вимірювання в значній мірі залежить також і від температури стінки оточуючих тіл. Щоб наблизити температуру внутрішньої стінки тіла до температури середовища, її необхідно покрити тепловою ізоляцією 2 (рис. 3.1). Похибку вимірювання, обумовлену променевим теплообміном, можна також значно зменшити при застосуванні тонкостінних екранів.

На рис. 3.1 показана схема встановлення екранованого ТП в трубопроводі, через який протікає газовий потік. На цій схемі ТП 1, встановлений вздовж осі

трубопроводу, знаходиться всередині екрана 2, виготовленого з листового металу. В цьому випадку випромінювання теплообміном проходить між термодатчиком і поверхнею екрана, який має температуру t_E вищу, ніж температура $t_{B.C}$ внутрішньої стінки труби ($t_T > t_E > t_{B.C}$).

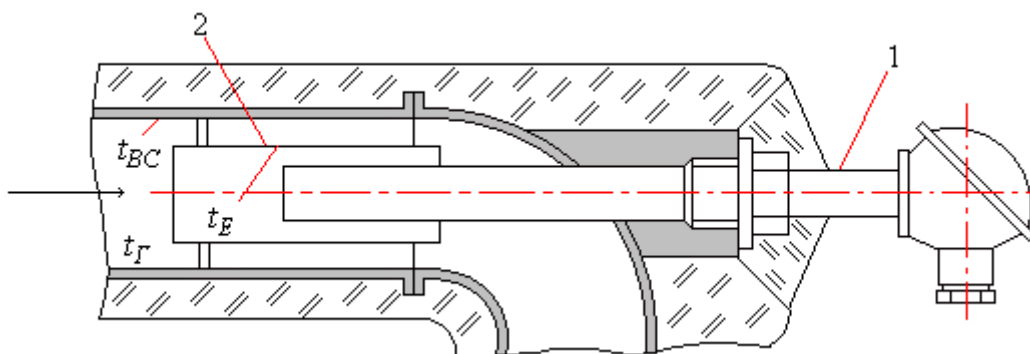


Рис. 3.1. Схема встановлення екранованого ТП в трубопроводі.

Отримаємо наступні формули для визначення наближених значень методичної похибки від випромінювання і температури екрана:

$$t_T - t_T = -\frac{\sigma_0 \varepsilon_{TP}}{\alpha} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_E}{100} \right)^4 \right]; \quad (3.1)$$

$$t_E = t_T - \frac{\sigma_0 \varepsilon_{H.E}}{2\alpha_E} \left[\left(\frac{T_E}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{B.C}}{100} \right)^4 \right]; \quad (3.2)$$

де ε_{TP} – зведений коефіцієнт чорноти поверхні термодатчика і екрана; $\varepsilon_{H.E}$ – зведений коефіцієнт чорноти екрана і стінки труби; α_E – коефіцієнт тепловіддачі від газу до екрана, Вт/(м²·К); T_E – температура екрана, К.

Внаслідок того, що значення деяких величин, які входять в формули (3.1) і (3.2), можуть бути визначені розрахунковим шляхом тільки наближено, ці формули не можуть бути використані для точного визначення методичної похибки, але дозволяють оцінити порядок можливої методичної похибки вимірювання. Точне значення методичної похибки вимірювання температури за рахунок впливу теплообміну випромінюванням можна визначити тільки на основі експериментальних даних.

3.3. Мінімізація методичної похибки, обумовленої теплообміном через теплопровідність

Методична похибка вимірювання може бути зменшена шляхом збільшення температури $t_{o.t}$. Для цього необхідно трубопровід і місце з'єднання ТП з його зовнішньою стінкою покривати тепловою ізоляцією. Похибка вимірювання буде також зменшуватись при збільшенні коефіцієнта тепловіддачі і глибини занурення ТП. Крім того, похибка вимірювання буде тим менша, чим менший коефіцієнт теплопровідності матеріалу захисної трубки термоприймача і його елементів. При виборі способу встановлення ТП слід враховувати, що коефіцієнт тепловіддачі більший при поперечному омиванні ТП, ніж при похилому і поздовжньому омиванні.

На збільшення методичної похибки вимірювання температури великий вплив має виступаюча на зовні частина ТП. Для приблизної оцінки можливої методичної похибки вимірювання при наявності виступаючої частини ТП, виходять з припущення, що він представляє собою однорідний стержень (трубу) довжиною $L=l_1+l_2$ (l_1 і l_2 – відповідно довжина зануреної і виступаючої частин ідеалізованого ТП, м) (рис. 3.2). Розподілення температур $t_1(x)$ і $t_2(x)$ вздовж такого ідеалізованого термоприймача характеризується кривими, які показані на (рис. 3.2). Рівняння яке описує зміну температури на ділянках l_1 і l_2 цього ТП, можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d^2 t_1(x)}{dx^2} - m_1^2 [t_r - t_1(x)] = 0; \\ \frac{d^2 t_2(x)}{dx^2} - m_2^2 [t_{\Pi} - t_2(x)] = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

Рівняння, яке дозволяє визначити температуру $t'_{o.t}$ біля основи ідеалізованого ТП при наявності виступаючої його частини, має вигляд:

$$t_r - t'_{o.t} = \frac{t_r - t_{\Pi}}{1 + \frac{m_1 th(l_1 m_1)}{m_2 th(l_2 m_2)}}, \quad (3.4)$$

де t_{Π} – температура повітря, яке оточує виступаючу частину ТП;

$$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d}{\lambda_{M1} f_1}} = \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{M1} \delta_1}}; \quad (3.5)$$

$$m_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d}{\lambda_{M2} f_2}} = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\lambda_{M2} \delta_2}};$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі в середовищах з температурами $t_{Ж}$ і $t_{П}$, величини які мають індекс “1”, відносяться до зануреної частини, а “2” – до виступаючої частини.

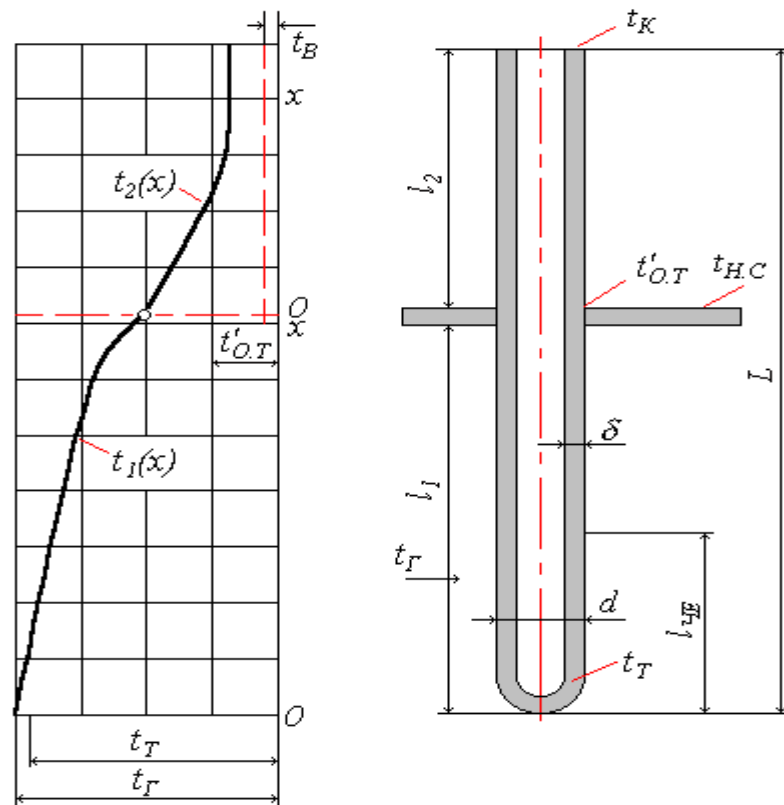


Рис. 3.2 Схема встановлення ідеалізованого термоприймача при наявності виступаючої частини.

Користуючись значенням t'_{OT} можна врахувати методичну похибку вимірювання температури t_T за формулою

$$t_T - t_r = -\frac{t_r - t'_{OT}}{ch(l_1 m_1)}, \quad (3.6)$$

яка з врахуванням рівняння (3.4) приймає вигляд:

$$t_T - t_r = \frac{t_r - t_{П}}{1 + \frac{m_1 th(l_1 m_1)}{m_2 th(l_2 m_2)}} \cdot \frac{1}{ch(l_1 m_1)}. \quad (3.7)$$

Якщо температура вимірюється з допомогою ТП опору, чутливий елемент якого розміщений на деякій відстані $l_{чЕ}$ (рис. 3.2), то на основі рівнянь (3.3) методична похибка визначається за формулою

$$t'_T - t_\Gamma = \frac{t_\Gamma - t_\Pi}{1 + \frac{m_1 th(l_1 m_1)}{m_2 th(l_2 m_2)}} \cdot \frac{1}{ch(l_1 m_1)} \cdot \frac{sh(l_{чЕ} m_1)}{l_{чЕ} m_1}. \quad (3.8)$$

Вирахувавши значення $t'_{O.T}$, вирахувати температуру t_K кінця виступаючої частини (головки) ТП по формулі

$$t_K - t_\Pi = -\frac{t'_{O.T} - t_B}{ch(l_2 m_2)}, \quad (3.9)$$

перетворивши яку і підставивши значення $t'_{O.T}$ (3.5), отримаємо:

$$t_K - t_\Pi = \frac{t_\Gamma - t_\Pi}{1 + \frac{m_2 th(l_2 m_2)}{m_1 th(l_1 m_1)}} \cdot \frac{1}{ch(l_2 m_2)}. \quad (3.10)$$

В розглянутому випадку похибка вимірювання буде тим менша, чим коротша виступаюча частина l_2 , чим більше відношення l_1/l_2 і α_1/α_2 , а також чим менша кількість тепла розсіюється виступаючою частиною ТП. Для зменшення методичної похибки вимірювання температури $t_{ж}$ виступаючу частину ТП частково покривають теплоізоляційним матеріалом.

3.4. Методика розроблення конструкції вимірювального блоку термоперетворювача

В технічних вимогах на розробку і проектування ТП завжди вказують основні характеристики, котрі необхідно досягти.

Такими характеристиками є робочий діапазон вимірювання, значення похибки, динамічної характеристики (показник теплової інерції), габаритні розміри. Виходячи з цих вимог і проводиться проектування.

На основі викладеного вище пропонується такий порядок проектування вимірювального блоку термоперетворювача з мінімальним значенням методичної похибки:

1). Виходячи з діапазону вимірювання температур, в якому буде працювати термоперетворювач вибираємо необхідні конструктивні матеріали і тип термоелектричного чутливого елемента.

2.) Приймаємо номінальне значення температури застосування, яке по стандартам визначається як найбільш ймовірна температура експлуатації термоперетворювача, для якої нормуються похибки вимірювання.

3). Визначаємо необхідні характеристики технологічного обладнання (температура, швидкість потоку).

Таким чином вимірювальний блок термоперетворювача з мінімальним значенням методичної похибки спроектований, а конструкція в цілому буде формуватися в залежності від специфічних умов експлуатації промислового технологічного обладнання, на котрому буде встановлений термоперетворювач.

Основними конструктивними елементами є вимірювальний блок з термоелектричним чутливим елементом, спроектований по запропонованій вище схемі, та механізм кріплення на об'єкті.

Методичну похибку можна зменшити також правильним встановленням ТП на досліджуваному об'єкті. Розглянемо способи правильного встановлення ТП в залежності від умов його експлуатації.

3.5.Способи встановлення термоперетворювачів на технологічних об'єктах для зменшення похибки від тепловідведення

Для зменшення методичної похибки можна запропонувати наступні способи встановлення термоперетворювачів на технологічних об'єктах:

При вимірюванні температури в трубопроводах великого діаметра має бути забезпечена необхідна глибина занурення термоприймача. В якості прикладу на рис. 3.3 показане вертикальне встановлення ТП на металевій стінці чи трубопроводі $D_3 \geq 1020$ мм і $P \leq 10$ кгс/см² (1 МПа). Таке встановлення при монтажній довжині ТП $L \geq 600$ мм і наявності ізоляції дозволяє знехтувати методичною похибкою, викликаною тепловідводом. В п. 3.3. уже вказувалося, що

коефіцієнт тепловіддачі більший при поперечному омиванні ТП ніж при похилому і поздовжньому омиванні.

В тих випадках, коли по деяких причинах вертикальне встановлення ТП неможливе, він може бути встановлений горизонтально. Для більшої надійності при горизонтальному монтажі термприймача на металевій стінці чи трубопроводі ($D_3 \geq 1020$ мм) він встановлюється в закладній трубі (рис.3.4).

Для вимірювання температури перегрітої водяної пари використовують малоінерційні термперетворювачі з конусною захисною гільзою. Схема встановлення такого термприймача показана на (рис. 3.5). З метою великої надійності роботи термперетворювач занурений не до центра трубопроводу. При такому способі встановлення, методична похибка, яка обумовлена впливом теплообміну випромінюванням і тепловідводом, незначна і нею можна знехтувати.

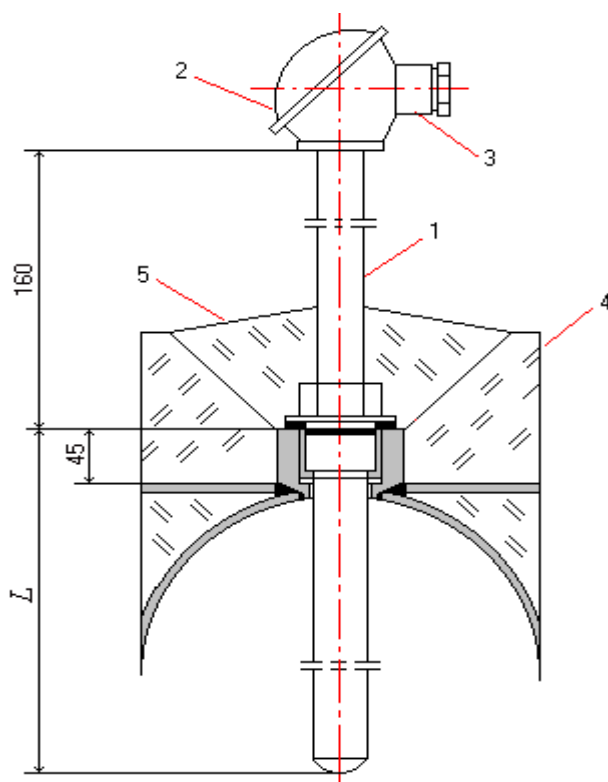


Рис. 3.3. Вертикальне встановлення ТП на металевій стінці чи трубопроводі: 1 – ТП; 2 – головка; 3 – штуцер вводу проводів; 4 – ізоляція; 5 – шар ізоляції, який легко знімається.

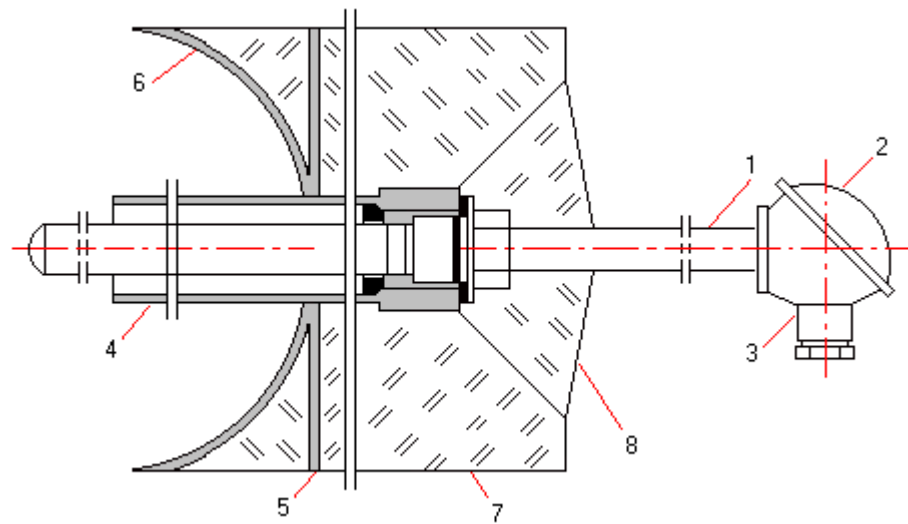


Рис. 3.4. Горизонтальне встановлення ТП на металевій стінці чи трубопроводі: 1 – термоприймач; 2 – головка ТП; 3 – штуцер для вводу проводів; 4 – закладна труба; 5 – металева стінка; 6 – трубопровід.

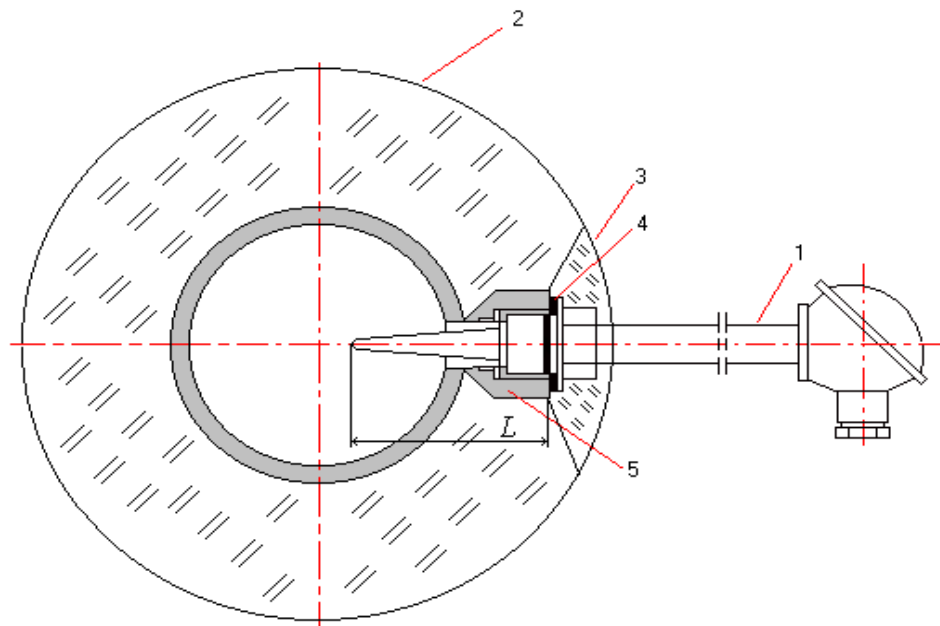


Рис. 3.5. Схема встановлення термоперетворювача на трубопроводі для вимірювання температури перегрітої водяної пари: 1 – ТП; 2 – ізоляція; 3 – шар ізоляції, що легко знімається; 4 – прокладка; 5 – бобишка; L – монтажна довжина.

Умови при вимірюванні температури рідин більш сприятливі, ніж при вимірюванні температури газу чи пари, оскільки для рідин вплив теплообміну випромінюванням можна не враховувати. Крім того, коефіцієнт тепловіддачі для рідин значний, тому методична похибка, яка обумовлена тепловідводом, при правильному встановленні термоприймача незначна і нею можна знехтувати.

На (рис. 3.6) показана схема встановлення ТП на трубопроводі для вимірювання рідких середовищ (наприклад, води, сольових чи цукрових розчинів, тощо).

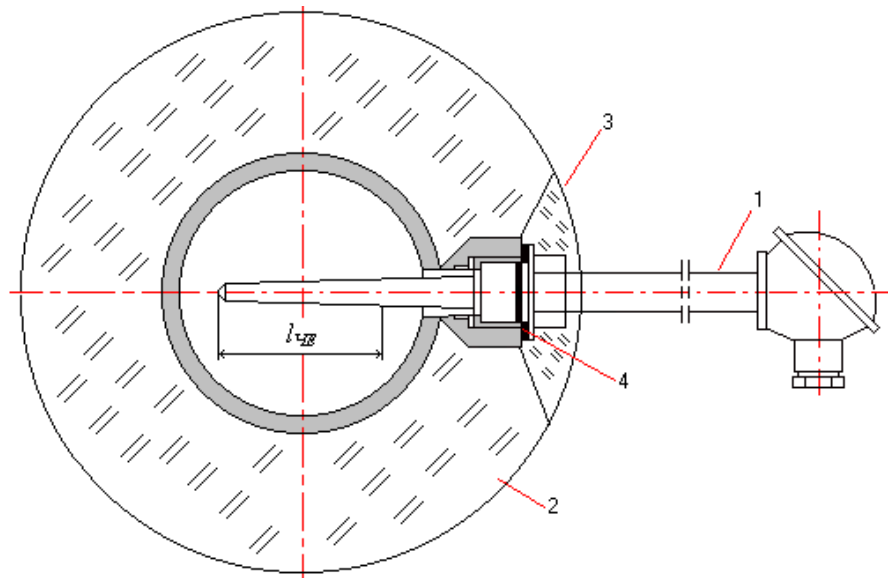


Рис. 3.6. Схема встановлення ТП для вимірювання температури рідких середовищ: 1 – термоперетворювач; 2 – ізоляція; 3 – додатковий шар ізоляції, який легко знімається; 4 – прокладка; $L_{ЧЕ}$ – довжина чутливого елемента.

Коли швидкість газового середовища і коефіцієнт тепловіддачі невеликі, то при допомозі розглянутих пасивних способів не завжди можливо досягти позитивних результатів.

В таких випадках, наприклад при вимірюванні температури газу в газоході збільшують коефіцієнт тепловіддачі до такого значення, при якому методичною похибкою, обумовленою променевим теплообміном, можна знехтувати завдяки штучному збільшенню швидкості газу, який омиває ТП.

Цей спосіб штучного збільшення швидкості газу приводить до створення конструкції ТП з відсмоктуванням (рис. 3.7). ТП 1 вставлений в трубу 2, яка покрита тепловою ізоляцією 3. Відсмоктування газу проводиться через трубу 4 з допомогою ежектора або іншим шляхом.

Газ протікає з великою швидкістю (80 – 120 м/с) через трубу 2, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі від газу до ТП. Необхідно відмітити, що в багатьох випадках температуру газового середовища в сучасних технологічних процесах

необхідно вимірювати з достатньою точністю і застосування серійних приладів не дозволить реалізувати такі вимірювання. В таких випадках в конструкції ТП необхідно застосовувати екранування.

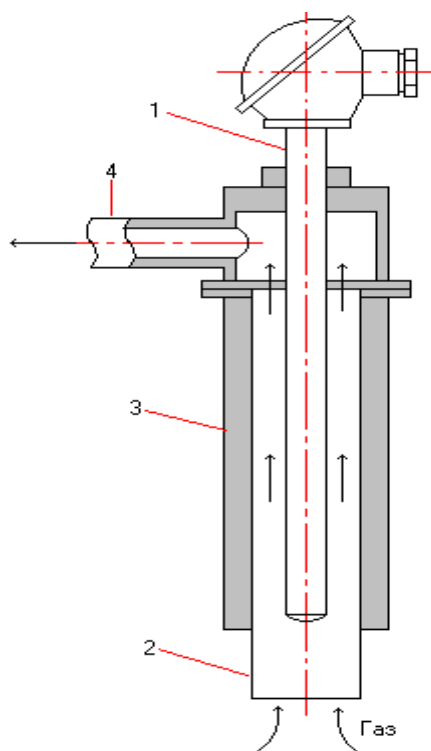


Рис. 3.7. Схема ТП з відсмоктуванням газового середовища.

3.5. Розрахунок захисної арматури термоперетворювачів

Визначення допустимого коефіцієнта запасу стійкості

На арматуру ТП, закріплених в гнізді, розміщених в деякому середовищі діє статичний тиск середовища. Таким чином, в поперечному перерізі арматури виникає напруження стиску σ_{cm} .

Якщо ж потоку середовища, в якому розміщений ТП, надати деяку швидкість V , то в поперечному перерізі арматури виникає додаткове напруження згину $\sigma_{зг}$, викликане динамічною силою Q .

Тоді повне напруження буде рівне:

$$\sigma_{\min}^{\max} = \sigma_{cm} \pm \sigma_{зг}. \quad (3.11)$$

Даний приклад представляє собою випадок складного опору бруса при одночасному згині і стиску.

Умова стійкості:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]_{t^0C}; \quad (3.12)$$

де $[\sigma]_{t^0C} = \frac{\sigma_{Tt^0C}}{[n]}$; σ_{Tt^0C} - границя текучості при температурі t °С середовища;
 $[n]$ - допустимий коефіцієнт стійкості;

З умови стійкості визначаємо допустимий коефіцієнт запасу стійкості $[n]$.
 Визначаємо фактичний n_ϕ .

При збереженні умови стійкості має виконуватись нерівність: $n_\phi \geq [n]$.

Визначення напруження стиску

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P}{F}; \quad (3.13)$$

де P – нормальний тиск середовища; F – площа поперечного перерізу арматури;

$$P = P_p \frac{\pi D^2}{4}; \quad (3.14)$$

P_p – робочий тиск середовища; D – зовнішній діаметр арматури;

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}; \quad (3.15)$$

де d – внутрішній діаметр арматури.

Зробивши перетворення, дістанемо напруження для $\sigma_{\text{сж}}$.

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_p D^2}{D^2 - d^2}; \quad (3.16)$$

Визначення напруження згину

Напруження згину $\sigma_{\text{зг}}$ викликано двома моментами M_1 і M_2 .

$$\sigma_{\text{зг}} = \frac{M_1}{W} + \frac{M_2}{W}; \quad (3.17)$$

Де W – полярний момент опору; $M_1 = Q \cdot \frac{l}{2}$; $M_2 = P \cdot f_{\text{max}}$; f_{max} – стріла прогину (рис. 3.8).

$$f_{\text{max}} = -\frac{Ql^3}{16EI}; \quad (3.18)$$

де $I_p = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) \approx 0,1(D^4 - d^4)$ - полярний момент інерції,

$$W = \frac{I_p}{\rho_{\max}} = \frac{0,1(D^4 - d^4)}{\rho_{\max}}; \quad (3.19)$$

$$\text{Звідки } \sigma_{\text{пу}} = \frac{Q \frac{l}{2}}{W} + \frac{P_p \frac{\pi D^2}{4} \left(-\frac{Ql^3}{16EI} \right)}{W}. \quad (3.20)$$

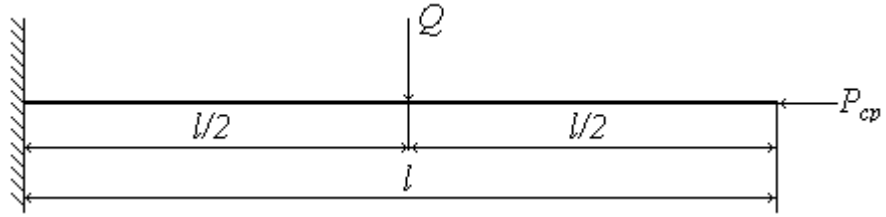


Рис. 3.8. Стріла прогину (визначається з рівняння вигнутої осі [37]).

Підставивши напруження σ_{32} і σ_{cm} в рівняння для σ_{max} , отримаємо:

$$\sigma_{max} = \frac{P}{F} + \frac{Q \frac{l}{2}}{W} + \frac{P_p \frac{\pi D^2}{4} \left(-\frac{Ql^3}{16EI} \right)}{W}; \quad (3.21)$$

Визначаємо динамічну силу потоку Q :

$$Q = \frac{16EIW \left([\sigma] - \frac{P}{F} \right)}{16EI \frac{l}{2} - P_p \pi r_a^2 l^3}. \quad (3.22)$$

Оскільки $Q = F \frac{V^2}{2} \rho$, то допустима швидкість потоку буде рівна:

$$V = \sqrt{\frac{2Q}{F\rho}}; \quad (3.23)$$

де: F – площа на яку діє сила, $F = D \cdot l$; D – зовнішній діаметр арматури; l – довжина заглибленої частини; ρ - щільність середовища.

Визначення залежності допустимої швидкості від температури і тиску досліджуваного середовища $V=f(P,t)$

Для побудови графіка залежності допустимої швидкості потоку від температури і тиску, необхідно з рівняння визначити P_p при відомих V і Q :

$$P_p = \frac{16EIW[\sigma] - Q \frac{l}{2} 16EI}{16EIW \frac{D^2}{D^2 - d^2} - \frac{\pi D^2}{4} Ql^3}; \quad (3.24)$$

Задаючись значеннями температури, визначаємо Q , V і P . Знаходимо одну точку кривої. Вибираємо інші значення температури і знаходимо P_p , знаходимо інші значення цієї кривої. В таблиці 3.1 показані результати розрахунку захисної арматури ТП для сталі 12Х18Н10Т

Розрахунок захисної арматури ТП для сталі 12Х18Н10Т

Динамічна сила	Швидкість потоку	Температура середовища	Робочий тиск середовища	Границя текучості	Модуль Юнга	Момент опору	Момент інерції	Довжина зануреної частини	Середовище	Коефіцієнт Коef. запасу
Q , кг	V , м/с	T , °C	P , кг/см ²	σ_T , кг/мм ²	E , кг/мм ²	W , мм ³	I , мм ⁴	l , мм	ρ , кгс/м ⁴	n
0,08	1,27	20	173	27	20200	174	870	100	вода 100	10
		100	154	24,5	19800					
		200	130	20,5	19300					
		300	101	16	18500					
1,7	5,8	20	142,5	27	20200	174	870	100	вода 100	10
		100	125	24,5	19800					
		200	100	20,5	19300					
		300	72	16	18500					
4,38	9,3	20	84	27	20200	174	870	100	вода 100	10
		100	78	24,5	19800					
		200	50	20,5	19300					
		300	18	16	18500					

Графік залежності допустимої швидкості потоку від температури і тиску досліджуваного середовища $V=f(P, t)$ наведено на рис. 3.9.

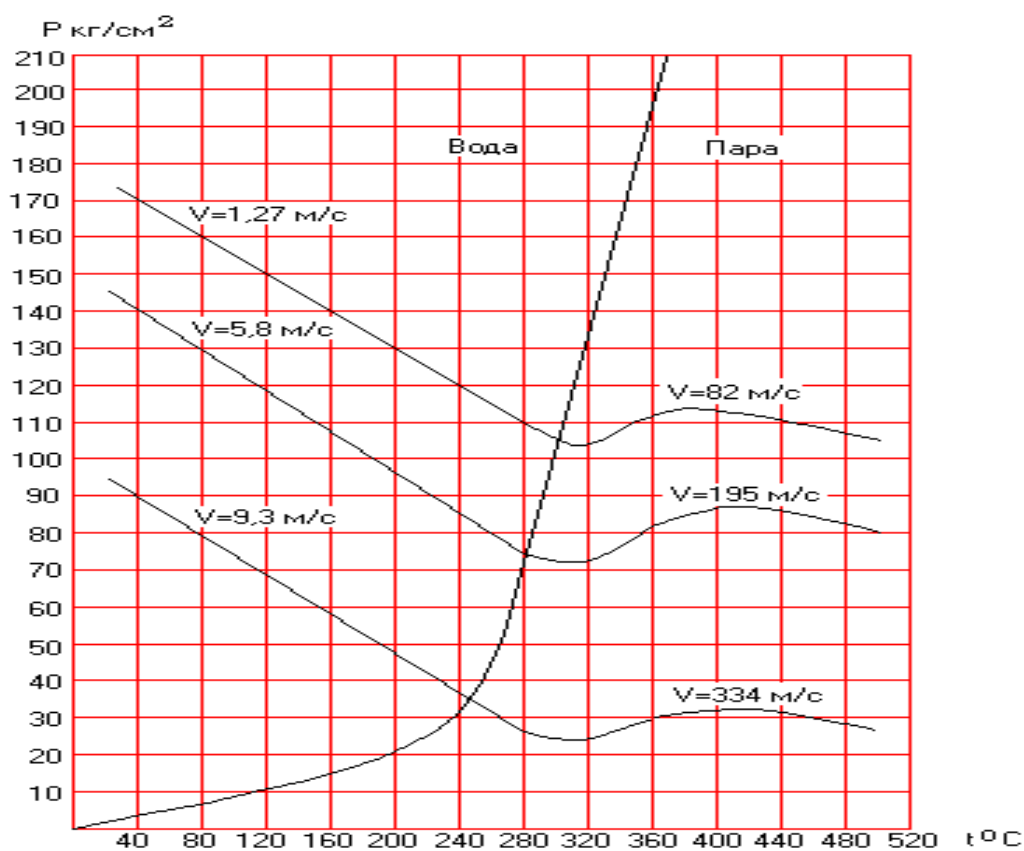


Рис. 3.9. Графік залежності допустимої швидкості потоку від температури і тиску досліджуваного середовища для захисної арматури із сталі 12Х18Н10Т.

3.7. Розрахунок надійності термоперетворювача

При виготовленні та використанні термоперетворювачів слід мати на увазі, що вони мають бути пристосованими до конкретних умов застосування.

Діапазон вимірюваних температур в технологічних процесах хлібопекарної промисловості складає від 20 до 250 °С. Тому в більшості випадків доцільно застосовувати термоперетворювачі опорові з мідними і платиновими чутливими елементами. Для підвищення чутливості доцільно застосовувати термоперетворювачі з НСХ типу 50М, 100М і 50П та 100П.

Якщо необхідно вимірювати температуру рідких чи газоподібних середовищ, з умовним тиском менше 0,25 МПа термоперетворювачі на об'єктах можна встановлювати без спеціальних штуцерів чи гільз. При роботі ТП в середовищах з умовним тиском від 0,25 до 25 МПа необхідно передбачити спеціальну систему встановлення ТП на об'єкті за допомогою захисних гільз або різьбових штуцерів. Можливі конструкції гільзи та штуцерів показані у додатках роботи. Штуцери бувають двох конструкцій – накидні та приварні. Переважно штуцери виготовляють з нержавіючої сталі марок 08Х13, 12Х18Н10Т, 20Х13 або з такого самого матеріалу, що і захисна арматура.

Конструкція ТП, може бути застосована для вимірювання температури холодної та гарячої води в дозаторах, тіста та тістових заготовок, температури в шафах вистоювання тіста, а також в зонах хлібопекарної печі.

Для вимірювання температури в виробничих приміщеннях, метрологічних лабораторіях, експрес-вимірюваннях температури запропоновано конструкцію чутливого елемента. Його можна під'єднувати за різними схемами. Перевагою застосування такого чутливого елемента є те, що він має незначну (до 10 с) інерційність і невеликі габаритні розміри. Як матеріал чутливого елемента можна використовувати як мідь, так і платину. Забезпечення температурного режиму в хлібопекарній печі досягається спалюванням природного газу в камерах згоряння. Тобто, технологічний процес характеризується наявністю в середовищі випарів легкозаймистих речовин, газів та твердих частинок, суміші котрих з повітрям при визначених фізико-хімічних параметрах є вибухонебезпечними.

Основними параметрами, які характеризують вибухонебезпечність середовища є температура спалаху, область запалення, температура самозаймання, швидкість поширення полум'я, мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню, схильність до вибуху і детонації. Вибухонебезпечними середовищами можуть бути суміші газів, парів з повітрям і іншими окислювачами (кисень, озон, хлор та ін.), а також індивідуальні речовини, які здатні до вибухового розкладання (ацетилен, озон, аміачна селітра та ін.).

Для попередження вибуху на об'єкті необхідно виключити як утворення вибухонебезпечного середовища, так і виникнення джерел ініціювання вибуху. Вибухонебезпечні суміші газів та парів з повітрям, які здатні вибухати від джерел ініціювання вибуху, поділяються на категорії згідно таблиці 3.2 в залежності від величини безпечного екстремального максимального зазору (БЕМЗ), тобто максимального зазору між фланцями оболонки, через котру не передається вибух з оболонки в навколишнє середовище при будь-якій концентрації пального в повітрі і на групи згідно таблиці 3.3 в залежності від величини температури самозапалювання.

Таблиця 3.2

Категорії і найменування вибухонебезпечних сумішей

Категорія і найменування вибухонебезпечних сумішей	Величина БЕМЗ, мм
I. Рудниковий метан	>1,0
II. Промислові гази та пари	
II.A	>0,9
II.B	>0,5 до 0,9 включно
II.C	до 0,5

Таблиця 3.3

Групи вибухонебезпечних сумішей

Група вибухонебезпечних сумішей	Температура самозаймання, °C
T1	> 450
T2	> 300 до 450 включно
T3	> 200 до 300 включно
T4	> 135 до 200 включно
T5	> 100 до 135 включно
T6	> 85 до 100 включно

В комплекс заходів по забезпеченню вибухобезпечності на об'єкті входять теплова ізоляція нагрітих зовнішніх частин ТО і ТП від вибухонебезпечного

середовища так, щоб температура на поверхні між ТО чи ТП і вибухонебезпечним середовищем була нижче температури його самозаймання; штучне збільшення температури самозаймання вибухонебезпечної суміші шляхом підтримання заданої концентрації вибухонебезпечного середовища.

Основні вимоги до вибухонебезпечних конструкцій ТП такі:

- виключити можливість електричного розряду на контактах чи можливості передачі вибуху всередині оболонки захисної арматури на зовні в вибухонебезпечне середовище;
- зведення до мінімуму потоків тепла по арматурі;
- збільшення теплообміну між арматурою і вибухонебезпечним середовищем;
- висока стійкість матеріалу оболонки захисної арматури до корозії, висока надійність.

Розроблена базова конструкція термоперетворювача для використання у вибухонебезпечних середовищах. Під час конструювання ТП для вибухонебезпечних середовищ необхідно передбачити “вибухонебезпечну оболонку”. Оболонка запобігає передаванню вибуху з середини оболонки назовні в вибухонебезпечне середовище. Ці ТО і ТП складаються з термочутливого елемента, який розташований в герметичній захисній арматурі і головки з сальниковим виводом кабелю для з'єднання з показуючим приладом. Для запобігання попадання вологи на контакти, між кришкою і корпусом головки встановлюється гумова прокладка.

У додатку зображено конструкцію магнітострикційного термоперетворювача та деталювання окремих елементів конструкції. Конструкція забезпечує кріплення акустичного термоперетворювача в місці з'єднання магнітострикційного сердечника 1 зі звукопроводом. Це кріплення здійснюється графітовим стаканом 3, який складений із двох половин і фіксує осердя зі звукопроводом за рахунок канавки 4. Стакан закріплюється графітовими стопорними гвинтами 5. Котушка збудження 6 встановлюється на кільці 7, а її оптимальне положення відносно торця сердечника 1 можна регулювати гайками 8. Задній торець осердя спирається підп'ятник, виготовлений з графіту,

фторопласту або гуми. Магніострикційне осердя виготовлене навиванням на тонку оправу нікелевої стрічки товщиною 0,1 мм, покритої оксидом нікелю та сформованої у вигляді стержня. Таке виконання забезпечує малі втрати на вихрові струми та спрощує узгодження із звукопроводом за допомогою підбирання кількості витків, які навиваються. Підмагнічування забезпечується розташування поблизу неробочого торця невеликого постійного магніту. Для нікелевих осердь достатньо магнітного поля напруженістю $10 \dots 12 \cdot 10^{-3}$ А/м. Котушки передавача та приймача навиваються на каркас із фторопласту.

Магніострикційний термоперетворювач із звукопроводом з'єднується клеєм, паянням або зварюванням. У місці з'єднання необхідно забезпечити високоякісне передавання акустичного сигналу без спотворень і додаткових паразитних відбивань. Від якості з'єднання значно залежать його метрологічні параметри. Складові похибки вимірювання такого перетворювача будуть визначатися нелінійністю спотворень під час передавання акустичного сигналу, накладанням сигналів, зміною умов підмагнічування. На похибку вимірювання будуть впливати також характеристики і властивості лінії зв'язку між перетворювачем та іншими елементами вимірювальної схеми. Конкретні значення складових похибки мною не визначалися, але низки складових можна уникнути на стадії проектування шляхом правильного вибору режиму технологічного виготовлення перетворювача, розмірів та умов кріплення звукопроводу, а також екрануванням магніострикційного перетворювача.

Якщо ТП використовується в системах автоматичного вимірювання, контролю та регулювання то необхідно передбачити на виході ТП уніфікований вихідний сигнал. У додатку 4 розроблено конструкцію і принципову електричну схему термоперетворювача опору з уніфікованим вихідним сигналом.

Термоперетворювачі, які розробляються, призначені для вимірювання температури різних середовищ в різних діапазонах. Термоперетворювачі з точки зору надійності розглядаються, як системи які складаються з елементів двох видів; елементів електричної схеми і механічних елементів. Елементи електричної схеми, в процесі експлуатації піддаються цілому ряду специфічних впливів, які залежать від великого числа факторів, які впливають на метрологічні та інші

властивості і тим самим на надійність термоперетворювача в цілому. Механічні елементи піддаються небезпекам – механічним пошкодженням.

За результатами експлуатації термоперетворювачів встановлено, що термоперетворювачам притаманні поступові і раптові відмови, які підпорядковані відповідно експоненціальному і нормальному законам розподілення [12].

Ймовірність безвідмовної роботи термоперетворювачів з врахуванням раптових і поступових відмов визначається за формулою [12]:

$$P(\tau) = P_1(\tau) \cdot P_2(\tau), \quad (3.25)$$

де: $P_1(\tau)$ – надійність термоперетворювача при раптових відмовах; $P_2(\tau)$ – надійність при поступових відмовах.

$$P_1(\tau) = e^{-\lambda\tau}; \quad P_2(\tau) = \frac{1 + L \left(\frac{\tau_{CP} - \tau}{\delta} \right)}{1 + L \left(\frac{\tau_{CP}}{\delta} \right)};$$

$$\text{тоді [12]: } P(\tau) = \frac{1}{2} e^{-\lambda\tau} \left[1 + L \left(5 - 5 \frac{\tau}{\tau_{CP}} \right) \right]; \quad (3.26)$$

де: τ - час безвідмовної роботи; τ_{CP} – середній час безвідмовної роботи.

Інтенсивність відмов можна визначити експериментально на основі результатів дослідів ряду однотипних термоперетворювачів безпосередньо на об'єкті та розрахувати за формулою:

$$\lambda = k_1 \cdot k_2 \cdot \left(\sum \lambda_{mi} + \sum \lambda_{pi} \right), \quad (3.27)$$

де k_1 – коефіцієнт збільшення інтенсивності відмов в залежності від температури; λ_{mi} – інтенсивність відмов і-го елемента монтажної частини термоперетворювача; k_2 – коефіцієнт збільшення інтенсивності відмов в залежності від механічних впливів; λ_{pi} – інтенсивність відмов і-го елемента робочої частини термоперетворювача;

За даними [12] коефіцієнти k_1 і k_2 прийняті наступні: $k_1=3$ і $k_2=2,5$; $L=1,8269$; $\lambda=3,5 \cdot 10^{-6}$. Тоді згідно (3.25) ймовірність безвідмовної роботи при 8000 год :

$$P(\tau) = \frac{1}{2} e^{-3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 8000} \cdot 1,8269 = 0,97.$$

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз стану виробничої санітарії і гігієни праці

Охорона праці — це комплекс заходів, спрямованих на створення безпечних та здорових умов праці. Вона є невід'ємною частиною сучасного виробництва і важливим аспектом соціальної відповідальності підприємств.

Гігієнічні вимоги до організації та обладнання робочих місць з ПК. Обладнання і організація робочого місця з ВДТ мають забезпечувати відповідність конструкції всіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності. Конструкція робочого місця користувача ВДТ має забезпечити підтримання оптимальної робочої пози. Робочі місця з ВДТ слід так розташовувати відносно світлових прорізів, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. При розміщенні робочих столів з ВДТ слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ВДТ - 1,2 м; від тильної поверхні одного ВДТ до екрана іншого - 2,5 м. Екран ВДТ має розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600...700 мм, але не ближче ніж за 600 мм з урахуванням розміру літерно-цифрових знаків і символів. Розташування екрана ВДТ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $+30^\circ$ до нормальної лінії погляду працюючого. Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю, звернутого до працюючого. У конструкції клавіатури має передбачатися опорний пристрій (виготовлений із матеріалу з високим коефіцієнтом тертя, що перешкоджає мимовільному її зсуву), який дає змогу змінювати кут нахилу поверхні клавіатури у межах $5...15^\circ$.

Вимоги до режимів праці і відпочинку при роботі з ПК. При організації праці, пов'язаної з використанням ЕОМ і ПЕОМ, для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності передбачаються внутрішньозмінні регламентовані перерви для відпочинку. Внутрішньозмінні режими праці і відпочинку містять додаткові нетривалі

перерви в періоди, що передують появі об'єктивних і суб'єктивних ознак стомлення і зниження працездатності.

Впродовж робочої зміни мають передбачатися:

- перерви для відпочинку і вживання їжі (обідні перерви);
- перерви для відпочинку і особистих потреб (згідно з трудовими нормами);
- додаткові перерви, що вводяться для окремих професій з урахуванням особливостей трудової діяльності.

4.2. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці

Згідно статті 13 закону України про охорону праці «Управління охороною праці та обов'язки роботодавця», третього розділу «Організація охорони праці», роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Згідно статті 6 закону України про охорону праці «Права працівників на охорону праці під час роботи», другого розділу «Гарантії прав на охорону праці», умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам законодавства.

Відповідно до статті 8 закону України про охорону праці «Забезпечення працівників спецодягом, іншими засобами індивідуального захисту, мийними та знешкроджувальними засобами» на роботах із шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими метеорологічними умовами, працівникам видаються безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також мийні та знешкроджувальні засоби.

Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони». Норми виробничого мікроклімату регламентують державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6-042-99.

Показниками, що характеризують мікроклімат є температура повітря; відносна вологість повітря; швидкість руху повітря та теплове навантаження.

Оптимальними вважаються такі умови праці, при яких буде найвища працездатність і хороше самопочуття.

Приміщення повинні бути достатньо освітлені, вдень – як найбільше природним світлом, а в нічний та в вечірній часи електричним освітленням. Освітленість повинна відповідати нормативним значенням за ДБН В 2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення».

Техніка безпеки являє собою комплекс технічних і організаційних заходів, які спрямовані на попередження обслуговуючого персоналу від травматизму, шкідливого впливу, які викликані умовами праці.

Приміщення підприємства повинні розміщатись відповідно до вимог, затверджених у встановленому порядку будівельних норм і правил, санітарних і протипожежних норм проектування.

Вентиляція та опалення

Необхідно, щоб повітря робочої зони виробничих приміщень відповідало вимогам ДСН 3.3.6.042-99.

Під час перевищення у приміщеннях норм концентрації шкідливих газів і пилу, що передбачаються санітарними нормами, необхідно негайно вивести людей в безпечну зону та вжити заходів щодо ліквідації загазованості та запиленості повітря.

Для локалізації пиловиділень необхідно передбачати герметизацію та аспірацію устаткування, застосування зволоження, сигналізацію про заповнення бункерів, регулярне прибирання приміщень.

Всмоктуючі та видувні отвори вентиляторів повинні бути загороджені решітками.

Відбір зовнішнього повітря не повинен виконуватись на висоті менше ніж 2 м від землі і в місцях, забруднених різними шкідливими речовинами.

Для опалення приміщень повинні бути передбачені системи, теплоносії і пристрої, які не створюють додаткових виробничих шкідливих факторів.

Системи опалення будинків і споруд підприємства необхідно вибирати з урахуванням вимог ДСП 173-96 і СНіП 2.04.05-91.

Температура повітря в приміщеннях в холодну пору року не повинна бути нижче 14°C при легкій фізичній роботі, 12°C при роботі середньої важкості і 8°C при важкій роботі.

Освітлення

Робоче освітлення повинно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість і яскравість відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд» та ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення», затверджених наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від. Джерела живлення аварійного освітлення повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів.

Улаштування, монтаж і експлуатація силового та освітлювального устаткування необхідно провадити з дотриманням вимог НПАОП 40.1-1.21-98, НПАОП 40.1-1.32-01 та інших чинних нормативно-правових актів.

Показники освітлення території підприємства, допоміжних приміщень і робочих місць у цехах повинні відповідати встановленим нормам. У структурних підрозділах підприємства необхідно застосовувати робоче, аварійне та евакуаційне освітлення.

Робоче освітлення повинно забезпечувати освітленість і яскравість на робочих поверхнях не нижче нормативної.

Аварійним освітленням необхідно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість не менше 5% від нормативної, установленної для цих поверхонь.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати освітленість на підлозі основних шляхів пересування працівників, на східцях сходів не менше 3 лк (люксів).

Світильники повинні відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.32-01 і розміщуватися таким чином, щоб забезпечити надійність їх кріплення, безпеку та зручність обслуговування.

Оскільки в технологічному процесі використовується природний газ, то можливе накопичення вибухонебезпечної метано-повітряної суміші, тому системи електроосвітлення повинні бути зроблені у вибухобезпечному виконанні.

Заходи безпеки

У приміщеннях з підвищеним забрудненням пилом електропроводка та електропускові пристрої необхідно виконувати таким чином, щоб забезпечувалася можливість вологого прибирання приміщень. В електромашинних приміщеннях необхідно передбачати прибирання пилу з електроустаткування пилососом.

На роботах, що пов'язані з небезпекою ураження електричним струмом, повинні застосовуватися засоби захисту відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98, Правил безпечної експлуатації електроустановок, Правил експлуатації електрозахисних засобів, НПАОП 40.1-1.07-01.

Органи керування на пульті та на щиті повинні розташовуватись в послідовності запуску і зупинки обладнання. Кнопки запуску повинні бути втоплені на 3-5 мм за габарити пускової коробки, а кнопки зупинки повинні бути червоного кольору і виступати на 3 мм.

Органи керування на пульті або на щиті повинні розташовуватись на відстані не більше ніж 800 мм від вертикальної осі сидіння.

Електричні прилади та щити необхідно заземлювати відповідно до вимог чинних нормативно-правових актів.

Контрольно-вимірювальні прилади повинні освітлюватися відповідно до норм освітленості.

Стан і робота приладів, засобів автоматизації, сигналізації, дистанційного керування та пристроїв захисних блокувань повинні постійно контролюватися.

Регулювання та ремонт приладів і засобів автоматизації повинні виконувати тільки працівники служби контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації.

На всіх засобах вимірювання, що контролюють граничні значення параметрів технологічного процесу, червоною фарбою повинні помічатися гранично допустимі значення параметра, що вимірюється.

4.3. Пожежна безпека

Технічні рішення системи запобігання пожежі.

Проектом передбачене наступне:

- всі елементи, які можуть у процесі роботи іскритися, встановлюються у вогнетривких шафах. Застосовуються іскрогасящі діоди;
- кабелі прокладаються на відстані 1 м від нагрітих поверхонь або захищаються екранами з неспалених матеріалів. Всі елементи кабельного господарства прокладаються в коробах, захисних трубах;
- при аварійних ситуаціях передбачене використання аварійного захисту, що відключає встаткування;
- для захисту від короткого замикання застосовуються плавкі запобіжники й автоматичні вимикачі;
- для запобігання згоряння всі деталі й елементи виготовляються з неспалених і важко спалених матеріалів (в основному металеві конструкції).

Установка електричної пожежної сигналізації відповідно складається з оповіщувачів - датчиків (у даному проекті - датчик комбінованого типу КМ-1, що реагує на дим і підвищення температури), встановлених у приміщеннях, що захищають, ліній зв'язку й прийомної станції СДПУ-1 з живленням від мережі змінного струму 220В встановлюваний у приміщенні щитової. У випадку виникнення пожежі за допомогою світлових і звукових сигналів буде вироблятися оповіщення обслуговуючого персоналу й пожежної команди.

Приміщення обладнане первинними засобами пожежогасіння - вогнегасником 2БР2МА (вуглекислотний). При пожежі в електроустановках, які перебувають під напругою. Для гасіння пожеж використовується вода. Приміщення обладнане протипожежним водопроводом.

5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Визначення ефективності від використання розроблених конструкцій термоперетворювачів включає оцінку, наскільки ці технології відповідають визначеним цілям та завданням. При проведенні такої оцінки будемо враховувати такі аспекти: чітке визначення цілей та завдань, які повинні бути досягнуті за допомогою віртуальних засобів; визначення конкретних Ключових Показників Ефективності, які відображають ступінь досягнення поставлених цілей; збір даних про використання засобів, включаючи час використання, активність користувачів, результати навчань та інші параметри; аналіз того, як засоби впливають на бізнес-процеси та результативність організації; оцінка ефективності в контексті зекономленого часу, зниження витрат чи покращення продуктивності; порівняння ефективності розроблених засобів із традиційними методами роботи; аналіз переваг та недоліків засобів порівняно з альтернативними рішеннями; підбір оптимальних рішень для досягнення максимальної ефективності.

Ефективність витрат на розробку визначається як співвідношення між сумою грошей, витрачених на впровадження та підтримку віртуальних засобів, та рівнем задоволення та користі для користувачів. Сума, витрачена на впровадження нових віртуальних засобів включає витрати на закупівлю та інтеграцію; річні чи місячні витрати на технічну підтримку та оновлення систем; витрати, пов'язані з неполадками, витоками даних та іншими інцидентами.

Критерій, що допомагає забезпечити баланс між витратами на засоби та задоволенням користувачів, сприяючи оптимізації витрат та максимізації вигод розраховується так:

$$K=(W + W_p) / (Z - Z_n) \quad (5.1)$$

де W - вартість впровадження нових засобів;

W_p - річні витрати на підтримку засобів;

Z - вартісне оцінення загального задоволення користувачів;

Z_n - вартість невдач та інцидентів)

Загальне задоволення користувачів оцінюється шляхом проведення опитувань або отримання фідбеку від користувачів щодо їхнього задоволення та вражень від використання засобів. Критерій зв'язку між витратами та задоволенням інформаційних потреб користувачів може бути визначений як "Ефективність витрат на вимірювальні засоби". Цей критерій допомагає визначити, наскільки вкладені ресурси в інформаційні технології впливають на задоволення та вигоди, які отримують користувачі від цих технологій.

Виділення показників функціональної повноти (F) важливе при оцінці ефективності системи, що використовується для автоматизованого оброблення інформації. Формула для визначення показників функціональної повноти може бути виражена як відношення обсягу автоматизованого оброблення інформації (Qa) до обсягу всього оброблення інформації (Qf):

$$F = Qa / Qf \quad (5.2)$$

Якщо $F > 1$: система показує високий рівень функціональної повноти, що свідчить про ефективне використання автоматизації в порівнянні з потребами.

Якщо $F = 1$: система забезпечує повний обсяг автоматизації, який відповідає потребам.

Якщо $F < 1$: система може виявитися менш ефективною в автоматизації порівняно з потребами.

Розрахунок проведемо на прикладі оцінення якісних показників запропонованими термодетермінаторами та класичними.

Витрати коштів = впровадження нових засобів + річні витрати на підтримку засобів $W + Wp = 50780 + 29770 = 80550$ грн. Виконані розрахунки свідчать про те, що функціонування розроблених термодетермінаторів окупиться за 0,5 року і прибуток становитиме 34970 грн.

Показник функціональної повноти інформаційної технології оцінення якісних показників показує високий рівень функціональної повноти.

ВИСНОВКИ

Специфічною особливістю вимірювання температури в хлібопекарних процесах є те, що термоперетворювач (ТП) знаходиться в складному процесі теплообміну одночасно як з процесом так і з навколишнім середовищем. Тому для таких умов виникають складності розроблення і створення надійних ТП для вимірювання температури. Одним з напрямків вирішення завдання підвищення точності вимірювання температури в хлібопекарних процесах є зниження методичної похибки, обумовленою умовами теплообміну термоперетворювача.

Аналіз існуючих серійних засобів для вимірювання температури показав, що не завжди можна вибрати технічний засіб, який буде задовольняти вимоги технологічного процесу. Тому виникає необхідність розробки деяких ТП для даного технологічного процесу.

При розробці засобів для вимірювання температури необхідно враховувати такі фактори: діапазон вимірюваних температур; необхідна точність вимірювання; відтворюваність результатів вимірювання; динаміка досліджуваного процесу; хімічні взаємодії; властивості навколишнього середовища; метод реєстрації результатів вимірювання та інші.

Температура належить до таких фізичних величин, які не піддаються безпосередньому вимірюванню. Тому для вимірювання її завжди перетворюють в яку-небудь іншу фізичну величину. З цією метою (в залежності від діапазону вимірювання температур і умов вимірювання) використовують ту чи іншу термометричну властивість тіл, тобто залежність від температури відповідним чином вибраної фізичної характеристики тіла. Частіше всього температуру перетворюють в яку-небудь електричну величину. Приймач, який виконує перетворення температури в іншу фізичну величину називають термоперетворювачем.

В хлібопекарній промисловості вимоги до точності підтримування заданої температури є високими. Основні складові інтегральної похибки вимірювання температури за допомогою ТО: похибка, обумовлена нагріванням термоперетворювача вимірювальним струмом, похибка підгонки

термоперетворювача, вплив на результат вимірювання відхилення значень R_{100}/R_0 від номінального значення, інтегральна похибка чутливого елемента термоперетворювача, похибка вторинного приладу, інтегральна похибка термоперетворювача і вторинного приладу, методична похибка, обумовлена впливом теплообміну випромінюванням, методична похибка, обумовлена теплообміном через теплопровідність.

Ефективним методом прискорення проектування ТП високого класу, із забезпеченням їх відповідної якості і техніко-економічних показників є створення для різноманітних конструктивних виконань термоперетворювачів системи узагальнених математичних моделей і ефективних загальних методів розв'язку задач теплопровідності для розроблених моделей. З допомогою такої системи, змінюючи конструктивні розміри елементів ТП, використовуючи матеріали з певними теплофізичними характеристиками, умови теплообміну з допомогою виведених математичних розв'язків, можна створити оптимальні конструкції ТП і дослідити залежність метрологічних характеристик термоперетворювачів від цих параметрів.

Завдання розроблення засобу для вимірювання температури зводиться до вибору методу вимірювання та відповідного його конструктивного оформлення для можливості експлуатації в даному вимірюваному середовищі та забезпечення потрібних метрологічних характеристик.

У роботі розглянуті контактні методи вимірювання температури. Методична похибка вимірювання пропорційна коефіцієнту випромінювання S поверхні термоприймача і для її зменшення вигідно використовувати ТП з гладкою або блискучою поверхнею, оскільки коефіцієнт чорноти ε_T , а відповідно, і випромінювання S для гладких поверхонь менший, ніж для шорсткуватих. Крім того, похибка випромінювання буде зменшуватись при збільшенні швидкості середовища, оскільки коефіцієнт тепловіддачі збільшується при зростанні швидкості потоку. Також слід мати на увазі, що методична похибка вимірювання температури газового середовища зменшиться, якщо використовувати термоприймачі менших діаметрів.

Пропонується такий порядок проектування вимірювального блоку термоперетворювача з мінімальним значенням методичної похибки:

1). Виходячи з діапазону вимірювання температур, в якому буде працювати термоперетворювач вибираємо необхідні конструктивні матеріали і тип термоелектричного чутливого елемента.

2.) Приймаємо номінальне значення температури застосування, яке по стандартам визначається як найбільш ймовірна температура експлуатації термоперетворювача, для якої нормуються похибки вимірювання.

3). Визначаємо необхідні характеристики технологічного обладнання (температура, швидкість потоку). Для вимірювання температури в виробничих приміщеннях, метрологічних лабораторіях, експрес-вимірюваннях температури запропоновано конструкцію чутливого елемента. Його можна під'єднувати за різними схемами. Перевагою застосування такого чутливого елемента є те, що він має незначну (до 10 с) інерційність і невеликі габаритні розміри. Як матеріал чутливого елемента можна використовувати як мідь, так і платину.

Забезпечення температурного режиму в хлібопекарній печі досягається спалюванням природного газу в камерах згоряння. Тобто, технологічний процес характеризується наявністю в середовищі випарів легкозаймистих речовин, газів та твердих частинок, суміші котрих з повітрям при визначених фізико-хімічних параметрах є вибухонебезпечними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. Вимірювання температури: теорія та практика: [монографія] – Львів: “Бескид Біт”, 2006. – 560 с.
2. Луцик Я.Т., Буняк Л.К., Рудавський Ю.К., Стадник Б.І. Енциклопедія термометрії – Л.: Львівська політехніка, 2003. – 428 с.
3. Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. Енциклопедія термометрії. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2003. – 428 с.
4. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. проф. Є. С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с.
5. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
6. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
7. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С.Поліщук, М.М.Дорожовець, В.О.Яцук, В.М.Ванько, Т.Г.Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
8. Ромака В.А. Фізичні засади розроблення термометричних елементів на основі інтерметалічних напівпровідників: дис. ...доктора техн. наук: спец. 05.11.04 / Ромака Володимир Афанасійович. – Л., 2008. – 366 с.
9. Ромака В.А., Ромака В.В., Стадник Ю.В. Інтерметалічні напівпровідники: властивості та застосування: [монографія] – Львів, Львівська політехніка, 2011. – 488 с.
10. Стадник Ю.В., Ромака В.А. Особливості механізмів електропровідності напівпровідникового твердого розчину $TiNiSn_{1-x}In_x$. Термоелектрика. – 2007. – № 1. – С. 42-50.
11. Ромака В.А., Стадник Ю., Ромака В.В., Гаранюк П. Моделі електронної та кристалічної структур інтерметалічного напівпровідника $TiNiSn_{1-x}In_x$. Збірник

наукових праць “Комп’ютерні технології друкарства”. – 2007. – № 18. – С. 104-111.

12. Стадник Ю., Ромака В.А., Гореленко Ю., Ромака Л., Горинь А. Електрокінетичні властивості твердих розчинів $ZrNiSn_{1-x}In_x$ та $TiNiSn_{1-x}In_x$. Одинадцята наукова конференція “Львівські хімічні читання – 2007” / Збірник наукових праць. – Львів. – 2007. – С. Н41.

13. Ромака В.В., Гладишевський Р.Є., Ромака Л.П., Нілі Е.К., Крайовський Р.В., Гореленко Ю.К. Особливості інтерметалічного напівпровідника $n-ZrNiSn$. І. Критерій розчинності атомів рідкісноземельних металів в $n-ZrNiSn$. Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10. – №2. – С 360-366.

14. Крайовський В.Я. Чутливі елементи термоперетворювачів на основі напівпровідникового матеріалу $n-HfNiSn$: дис. ...кандидата техн. наук: спец. 05.11.04 / Крайовський Володимир Ярославович. – К., 2014. – 153 с.

15. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Берек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки. Том 1: [монографія]. Львів: Видавництво НУ “Львівська політехніка”, 2005. – 532 с.

16. Гамула П., Дацюк М., Крайовський В., Луцик Я., Микитин І., Ришковський О., Скоропад П., Стадник Б. Вимірювання у нанотехнологіях: методи і засоби. Львів, Вид-во Львівської політехніки, 2016, 206 с.

17. Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін.; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського, Основи металургійного виробництва металів і сплавів, Київ, Україна: Вища школа, 2006, 503 с.

18. Мала гірнича енциклопедія, в 3 т., за ред. В. С. Білецького, Донецьк, Україна: Східний видавничий дім, 2004–2013.

19. В. П. Мовчан, М. М. Бережний, Основи металургії, Дніпропетровськ, Україна: Пороги, 2001, 336 с.

20. В. О. Фединець, “Аналіз та оцінювання термоелектричних матеріалів для засобів вимірювання температури газових потоків”, Науковий вісник Національного лісотехнічного Університету України, вип. 24(1), с. 150–155, 2014.

21. В. О. Фединець, Я. П. Юсик, І. С. Васильківський, “Термоелектрична

нестабільність термопар із важкотопких металів і стопів”, Матер. IV Міжнар. наук.- техн. Internet-конфер. “Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами”, Київ, Україна: НУХТ, 22.11.2017 р., с. 283. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/117HLB0bDUYOfEIttGizc_RZddk5S/view

22. Каталог продукції науково-виробничого об'єднання “Термоприлад ім. В.І. Лаха”, Львів: НВО “Термоприлад ім. В. І. Лаха”, 2013, 211 с. [7] ІЕС 60584-1:2013. Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerance Maintenance Result Date