

Рис. 1.2 – Структурна схема локальної автоматизованої системи протипожежного захисту:

а) з комутатором; б) з організацією зв'язку між програмувальними контролерами; в) з організацією зв'язку через системну шину

Інтерфейс виведення (Івив) ПК забезпечує узгодження за потужністю вихідних сигналів ПК і сигналів, необхідних для управління виконавчими механізмами ЛСППЗ. Кількість виводів Івив визначається кількістю входів виконавчих механізмів.

У випадку обмеженого числа виводів Івив або збільшується число програмувальних контролерів, або ущільнюються вхідні канали виконавчих механізмів.

На рис. 1.3 наведена схема включення ПК, у якій число його виводів більше або дорівнює числу входів виконавчих механізмів ЛСППЗ.

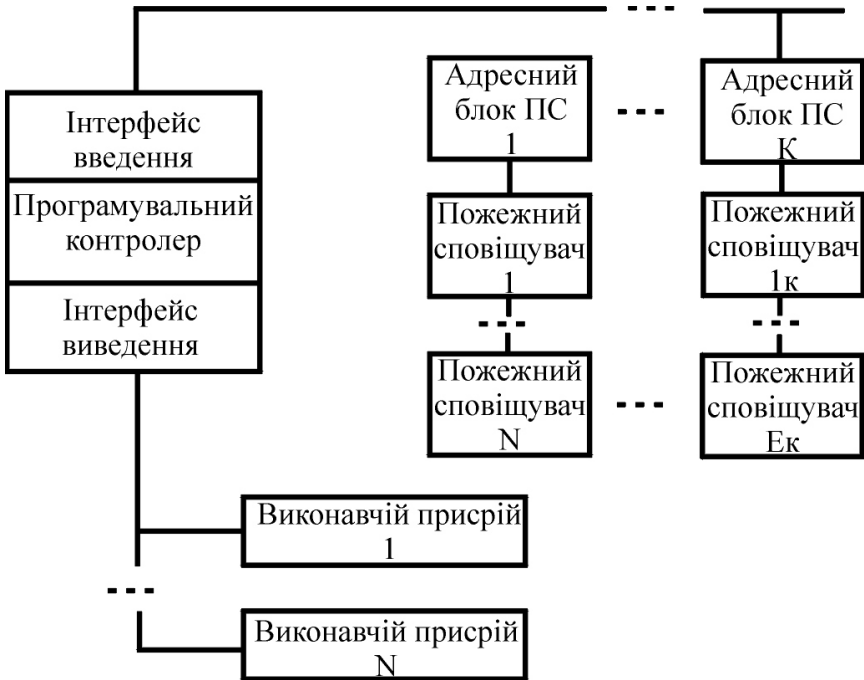


Рис. 1.3 – Структурна схема з прямим підключенням виконавчих пристроїв до програмувального контролера

За великої кількості входів виконавчих механізмів, що перевищує кількість вихідних каналів ПК, доцільно здійснювати ущільнення вхідних каналів виконавчих пристроїв, використовуючи адресні блоки (рис. 1.4), комутатори (рис. 1.5) чи адресні блоки і комутатори спільно (рис. 1.6).

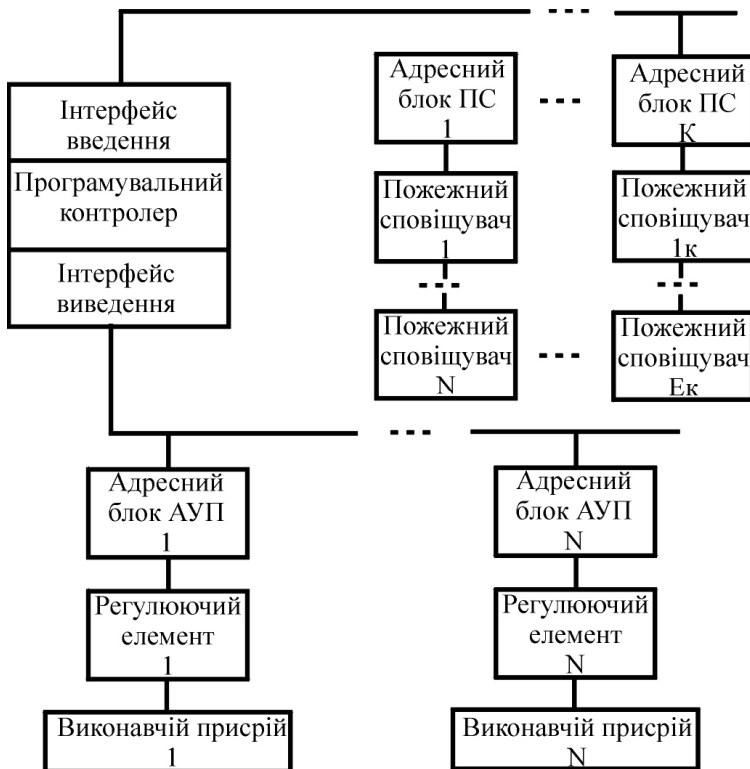


Рис. 1.4 – Структурна схема ЛАСППЗ з адресними блоками

Датчики і виконавчі механізми, розподілені по технологічних пристроях, що захищаються, являють собою локальну мережу з виходом на програмувальний контролер і спеціалізований пульт управління. Конструктивне виконання і параметри датчиків і виконавчих механізмів забезпечують виконання наступних функцій:

- виявлення осередку загоряння і видача сигналу на ПК для наступної обробки;
- подача вогнегасної речовини в зону виникнення осередку пожежі;
- створення і підтримка необхідної концентрації вогнегасної речовини протягом необхідного часу;

- можливість перевірки працездатності, а також контролю спрацьовування датчиків і виконавчих механізмів;
- резервування й оперативна заміна елементів, що вийшли з ладу, устаткування.

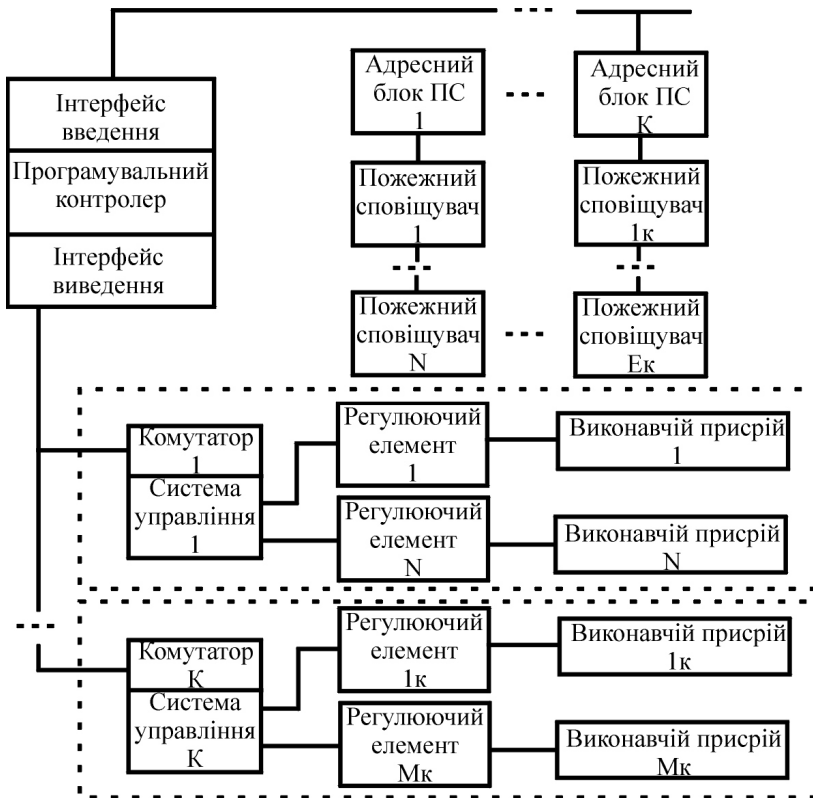


Рис. 1.5 – Структурна схема ЛАСППЗ із комутаторами

До складу локальних АСППЗ входять різні системи (структурні елементи), що забезпечують протипожежний захист окремих технологічних пристроїв, цехів, виробничих ділянок тощо: локальна АС інформації, локальна система роботизованих засобів, локальні АС протипожежного захисту електричних кабелів і шаф з електротехнічним устаткуванням, запобігання передпожежних режимів електродвигунів тощо.

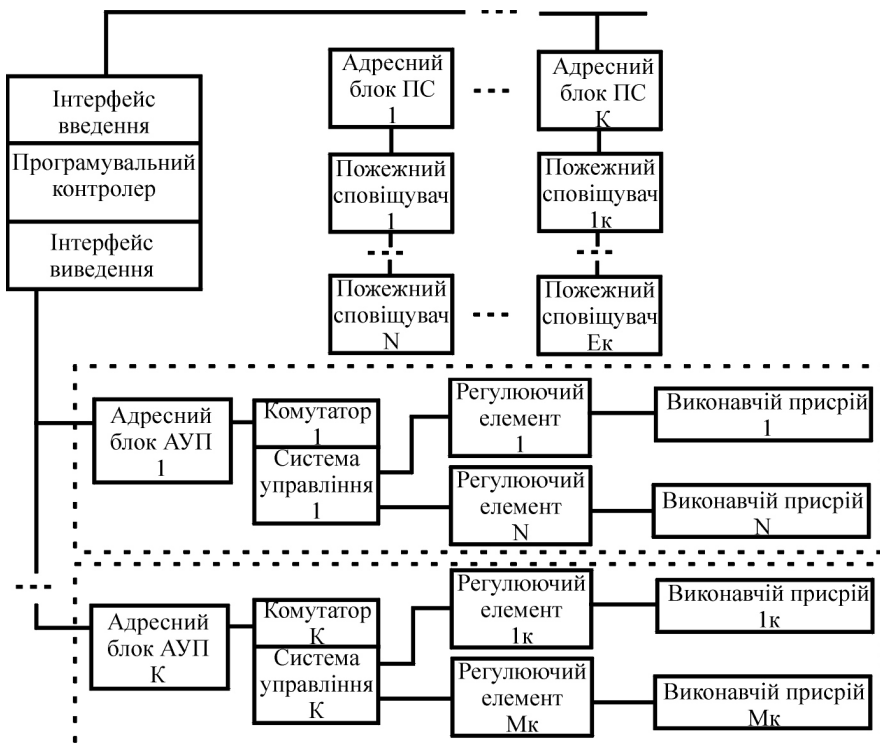


Рис. 1.6 – Структурна схема ЛАСППЗ з адресними блоками і комутаторами

Локальна АС інформації. Дана система призначена для раннього виявлення передпожежних режимів і загорянь, а також контролю роботи виконавчих механізмів локальної АСППЗ та їх діагностики.

До числа основних функцій, виконуваних локальною системою інформації, належать наступні:

- виявлення джерел запалювання, ознак тління, піролізу, загоряння і пожежі в контрольованому пристрої за допомогою пожежних сповіщувачів;

- контроль стану працездатності виконавчих механізмів локальної АСППЗ за допомогою датчиків, що визначають цілісність обмоток, реле, ниток пірозапалів, контакторів тощо, аналогові сигнали яких перетворюються в цифрові коди;

- контроль вихідного і кінцевого положень механізмів ЛСППЗ, що визначають стан замкнутості контактної пари;

- запобігання передпожежних режимів за допомогою температурних датчиків витоку струму, що визначають ступінь локального нагрівання електроустановки в контрольованій точці;

- контроль працездатності пристроїв і підсистем локальної АСППЗ у штатному режимі.

До технічних засобів локальної АС інформації пред'являються наступні вимоги:

- датчики обираються з урахуванням їх інерційних властивостей;

- датчики включають у свій склад пристрої попередньої обробки інформації та її перетворень;

- кінцеві контакти повинні подавати однозначну інформацію про положення будь-якого виконавчого механізму;

- кінцеві контакти і датчики виконують функції контролю вихідного і кінцевого положень виконавчих механізмів та їх працездатності в умовах вібрації.

Локальна система роботизованих засобів пожежогасіння. Локальна система роботизованих засобів пожежогасіння призначена для здійснення автоматичного чи автоматизованого пожежогасіння за допомогою роботизованих лафетних стволів та інших засобів. Структурна схема локальної системи роботизованих засобів пожежогасіння наведена на рис. 1.7.

Система роботизованих засобів пожежогасіння виконує наступні основні функції:

- прийом команд від програмувального контролера й оператора;

- управління лафетними стволами.

В основний склад локальної системи роботизованих засобів пожежогасіння входять:

- керовані лафетні стволи;

- трубопроводи з вузлами управління;
- місцеві пульти управління;
- пристрої управління виконавчими механізмами.

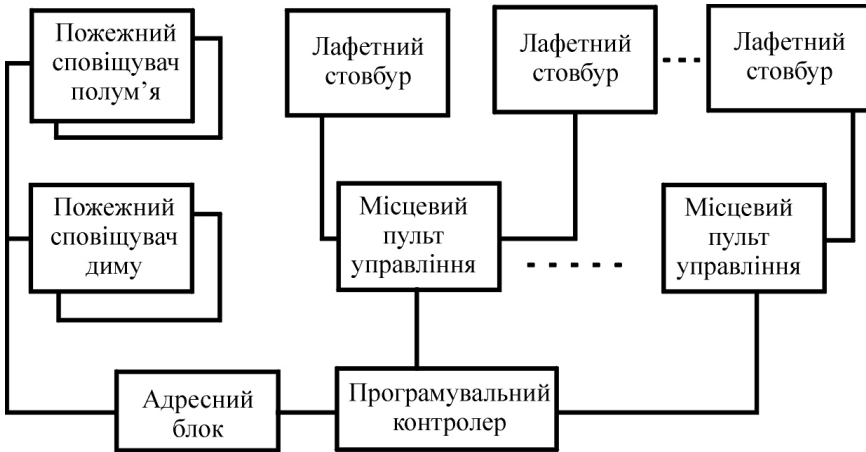


Рис. 1.7 – Структурна схема локальної системи роботизованих засобів пожежогасіння

Витрата води в системі визначається характеристиками пожежного навантаження і площею осередку пожежі. Дальність подачі води повинна складати близько 40 м, ефективний діаметр струменя в зоні осередку пожежі повинен бути близько 0,5 - 1,0 м.

До локальної системи роботизованих засобів пожежогасіння пред'являються наступні вимоги:

- управління виконавчими механізмами здійснюється персоналом з місцевого пульта управління за програмою, записаною в ПЗП цього пульта, або автоматично за програмою, записаною в ПЗП програмувального контролера;
- виявлення загоряння і визначення координат осередку загоряння здійснюються локальною АС інформації;
- кути розвороту лафетних стволів забезпечують подачу води в будь-яку точку простору, що захищається;

- швидкість розвороту лафетних стволів не призводить до порушення компактності водяного струменя;
- тривалість подачі води забезпечує гарантоване придушення осередку загоряння (пожежі) до прибуття особового складу ПРЧ;
- тривалість функціонування лафетного ствола в автоматичному режимі визначається умовами оптимального придушення осередку загоряння і пожежі;
- тривалість функціонування лафетного ствола в автоматизованому режимі визначається оператором;
- при відмовленні одного лафетного ствола передбачається можливість включення іншого лафетного ствола;
- черговість включення лафетних стволів в автоматичному режимі визначається програмою оптимального придушення осередку загоряння (пожежі), записаною в ПЗУ програмувального контролера;
- черговість включення лафетних стволів в автоматизованому режимі визначається оператором [5].

РОЗДІЛ 2. ДАТЧИКИ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Вибір засобів виявлення передпожежних і вибухонебезпечних режимів здійснюється на етапі технічного проектування системи. Він визначається особливостями технологічного регламенту об'єкта і граничних значень, уставок режимних параметрів.

До числа основних режимних параметрів, контроль динаміки яких дозволяє знайти, ідентифікувати і спрогнозувати передпожежні і вибухонебезпечні режими, належать: температура, геометрія і координати локального нагрівання; тиск у системах технологічного устаткування; концентрація вибухонебезпечних сумішей, координати місць їх витоків; амплітудні і частотні характеристики вібраційних процесів частин механізмів технологічного устаткування, що обертаються, рухаються або стаціонарно встановлені; координати місць вібрації; токові характеристики електроустановок; струми витоків у кабелях та ізоляції електроустановок; тиск і швидкість потоків у повітропроводах системи вентиляції; амплітудно-частотні характеристики сейсмічних процесів; характеристики вихідної потужності трансформаторів та ін.

Метрологічні характеристики засобів виявлення передпожежних і вибухонебезпечних режимів повинні кореспондуватися з вимогами до аналогічних характеристик АСУТП об'єкта.

Ці засоби виробляють інформацію про контрольовані параметри в обсязі, достатньому для ідентифікації передпожежного і вибухонебезпечного режимів, і забезпечують можливість контролю працездатності засобів виявлення. Видача інформації надається періодично за запитами системи або ініціативно (при перевищенні уставок на контрольовані параметри).

Періодичність знімання інформації в режимі нормальної експлуатації визначається особливостями контрольованого технологічного процесу і ступенем його пожежовибухонебезпечності.

Засоби виявлення передпожежних і вибухонебезпечних режимів забезпечують можливість зміни періодичності знімання інформації і точності вимірів контрольованих параметрів.

Вірогідність інформації, вироблюваної яким-небудь одним засобом виявлення передпожежних чи вибухонебезпечних режимів, підтверджується інформацією від інших засобів, якщо вони використовуються. У тих випадках, коли технологічні умови дозволяють установити групу ідентичних засобів виявлення, вірогідність інформації визначається вибіркою декількох значень параметрів, одержуваних від різних засобів.

Періодичність опитування в аварійному та передаварійному режимах установлюється з урахуванням інерційності вимірювальних пристроїв засобів виявлення передпожежних і вибухонебезпечних режимів.

Проектні показники надійності засобів виявлення розраховуються з урахуванням вимог пріоритету з резервування устаткування системи пожежної сигналізації.

В окремих випадках може використовуватися наступна структура засобів виявлення: чутливий елемент, пристрій перетворення і логічної обробки, пристрій передачі інформації.

Автоматизовані засоби запобігання передпожежних і вибухонебезпечних режимів повинні мати показники надійності не нижче, ніж в АСПВБ у цілому.

2.1 Способи та пристрої для виміру температури

2.1.1 Історія розвитку термометрії

Температура – величина, яка характеризує ступінь нагрівання тіла. Залежність між середньою кінетичною енергією молекул, що поступально рухаються, і температурою ідеального газу визначається виразом:

$$E = (3/2)kT,$$

де $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж·Кг⁻¹ – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура тіла, К.

Якщо тіла мають різну температуру, то при їх контакті відбувається вирівнювання енергій: тіло, що має більш високу температуру, а виходить і велику середню кінетичну енергію молекул, передає свою теплоту (енергію) тілу, що має меншу температуру, а виходить, і меншу середню кінетичну енергію молекул. Таким чином, температура є параметром, що характеризує як якісну, так і кількісну сторону процесів теплообміну, теплопереносу. Однак вимірити температуру безпосередньо не можна; можна визначити її значення тільки за якимись іншими фізичними параметрами тіла, що змінюються однозначно залежно від температури. Такими параметрами, що залежать від температури, є, наприклад, обсяг, довжина, електричний опір, термоелектрорушійна сила, енергетична яскравість випромінювання та ряд інших.

Дотикальна приступність температури відома з давніх часів. До першого тисячоріччя до нашої ери відноситься поява понять про основні складові навколишнього світу, у числі яких поряд із землею, водою і повітрям був вогонь, якому в багатьох зовнішніх проявах приписувалися властивості, що узагальнюються сучасним поняттям температури. Демокрит і Левкіпп оперували поняттям елементарного вогню в загальнофізичних уявленнях, Гіппократ – стосовно до медичних проблем. Однак, очевидно, не ними було введено поняття температури, тому що Аристотель під час обговорення чотирьохелементного світу посилається на «древніх» без згадування імен. Труднощі «древніх» у складанні чіткого уявлення про поняття температури порозумівалися багатьма причинами, пов'язаними, зокрема, з відсутністю будь-якої вимірювальної техніки, презирливим ставленням до експерименту – заняття «рабського», неприпустимого для філософів, і внутрішнім протиріччям інформації про теплові прояви в навколишньому світі. Температура є

показником інтенсивності, тобто якісною характеристикою. Тому поняття температури у простих уявленнях змішується з поняттям кількості теплоти, що лежить в основі дотикальних відчуттів. Теплоті властива суперпозиція, температурі – ні. Важко було зрозуміти, чому нагріті на вогні вода, олія чи смола при короткочасному дотику до них впливали помітно сильніше, ніж сам вогонь. У середні століття багаторазово був описаний дослід, у якому пропонувалося одну руку витримати в теплій воді, а іншу – у холодній. Після цього змішана вода відчувається однією рукою як холодна, інша – як тепла. Приміщення глибокої печери, підвалу уявляється взимку теплим, а влітку прохолодним. У зв'язку з великою параметричною чутливістю організму до теплового впливу головні поняття довго перебували на суб'єктивній основі. Це перешкоджало побудові уявлень у чіткій, логічно замкнутій послідовності умовиводів. Для порівняння можна навести вимір кута нахилу екліптики Ератосфеном: за 22 сторіччя ця величина уточнилася до теперішнього часу тільки на 6 кутових хвилин. Через чисто фізіологічні причини, пов'язані з терморегуляцією, теплокровні організми здатні дуже гостро реагувати на зміну теплового впливу навколишнього середовища з переходом від нагрівання до охолодження, і навпаки. За температури, близької до тілесної, організм здатний реагувати на зміни порядку 0,1 К. Задовго до появи перших інструментів для виміру температури з повсякденного досвіду були відомі головні її параметричні властивості, зокрема прагнення теплоти до температурної рівноваги в результаті її переходу від гарячих тіл до холодних. Рівноважна температура чітко вважалася нижче температури спершу гарячого тіла і вище спершу холодного. Подібні ідеї всюди сприймалися настільки однаково, що рівною мірою глибоко увійшли в усі відомі мови з найдавніших часів.

На основі почуттєвого сприйняття навколишніх явищ природно прийшли до послідовності таких понять, як зимова холоднеча, капель, літня прохолодь, червоне і біле розжарювання, температури, що відповідають здоровій нормі і пропасному стану тіла людини. На такій природній шкалі кожному

тілу в його стані може бути знайдене цілком визначене місце між більш і менш нагрітими тілами, що дозволяє порівнювати відносну кількість енергії, що міститься в тілі, і здатність тіла сприймати чи віддавати енергію в якісному розумінні, тобто незалежно від кількісних характеристик: розмірів, об'єму і маси тіла.

Потреба у вимірах температури з пізнавальною метою виникла лише в середині XVI ст. Щоб робити такі виміри, можна було скористатися будь-якою відомою зі спостережень залежністю якого-небудь параметра від температури. Ще Герону Олександрійському (I ст.) була відома властивість повітря розширюватися при нагріванні, чим він пояснював прагнення вогню нагору. Зміна об'єму зі зміною температури за постійного тиску в газах, зокрема в повітрі, виражена сильніше, ніж у рідких і твердих тіл. На цій основі в 1597 р. Галілеєм був запропонований термоскоп для порівняльних температурних досліджень, що складався зі скляного балончика, заповненого повітрям і сполученого тонкою трубкою із судиною, у якому знаходилася зафарбована рідина (вода або спирт). Зміна температури повітря в балончику супроводжувалася зміною рівня зафарбованої рідини в трубці. Істотним недоліком цього першого з відомих термометрів була чутливість до зміни атмосферного тиску.

У 1631 р. французький лікар Ре описав термометр, дія якого базувалася на використанні властивості термічного розширення води. Конструкція термометра, подібного до розповсюджених тепер рідинно-скляних, створена в 1654 р. Його появу пов'язують з ім'ям учня Галілея герцога тосканського Фердинанда II. Термометр являв собою герметично запаяну судину з вертикальним вказівним капіляром. Як робоча рідина використовувався винний спирт. Збереглися відомості про те, що при снігопаді він показував 20, а в самий пекучий день – 80 градусів. Розподіли градусів були нанесені емалевими крапельками прямо на трубку капіляра. Збереглася гравюра флорентійського термометра, у якому капіляр звитий у 12 витків по гвинтовій лінії, а розподіли шкали нанесені у вигляді вертикальних

скляних брусочків, припаяних до капіляра, які робили усю конструкцію досить стійкою.

Метрологічну основу термометрії заклав падуанський лікар Санкторіо. Використовуючи термоскоп Галілея, він увів дві абсолютні точки і регламентував систему перевірки, відповідно до якої усі флорентійські термометри градуувались за зразковим санкторіансько-галілеєвським приладом. Значення фіксованих точок не збереглися. Відомо, що флорентійські термометри задовольняли основній метрологічній вимозі: в однакових умовах – однакові показання. Флорентійські термометри відразу ж знайшли широке застосування в метеорологічних вимірах; з літописів можна встановити, що точка танення льоду відповідала 13,5 градусам флорентійської шкали.

На початку XVIII ст. зареєстрований ряд пропозицій, спрямованих на прив'язку термометричної шкали до декількох легко і надійно відтворених точок, що надалі одержали найменування реперних. У 1701 р. Ньютон запропонував зв'язати шкалу з температурами танення льоду і тіла людини. Вибір останньої був обумовлений описом походження людини («за образом і подобою» у Біблії – офіційним документом того часу.

У 1703 р. французький академік Амонтон, ґрунтуючись на тому, що теплота являє собою одну з форм руху, прийшов висновку, що нульова точка температурної шкали повинна відповідати стану, за якого припиниться всякий рух часток. Він думав, що при цьому частки будуть займати найменший об'єм або у випадку газу – справляти найменший можливий тиск на обмежуючі його стінки. Амонтон уперше почав спробу визначити положення абсолютного нуля щодо точки танення льоду.

Значна роль у становленні температурних вимірів належить Фаренгейтові. Він народився в 1686 р. у Гданську (Данцизі), від зрілості і до старості (1736 р.) прожив у Голландії й Англії. Основним його заняттям було неогоціанство. Наукою ж він займався для задоволення цікавості. Сполучення дарування вченого з підприємницькими здібностями дозволило йому вперше налагодити серійне виробництво уніфікованих термометрів з відтвореними показаннями. Ним же була вперше застосована

ртуть як робоча рідина (1714 р.) і створена відтворена температурна шкала. У шкалі Фаренгейта як нуль було обрано температуру суміші снігу з нашатирем, друга точка (за Ньютоном) відповідала температурі тіла здорової людини, а проміжок був розділений на 12 градусів. При цьому були зафіксовані температури танення чистого льоду (у первинній шкалі 4 градуси) і кипіння води.

Спочатку шкала Фаренгейта давала можливість грубої оцінки температури. Для більш тонких відліків Фаренгейт тричі послідовно поділяв градуси навпіл, що привело до восьмикратного зменшення одиниці. При цьому температура танення льоду стала рівною 32 градусам, а температура тіла людини – 96 градусам. Температура танення льоду в ті часи вважалася ненадійною, оскільки вже були відомі випадки переохолодження рідин. Температура кипіння води була спочатку величиною похідною і рівною 212 градусам. Фаренгейт провів вивчення надійних фіксованих точок шкали й установив, що температура суміші льоду з водою стабільна за значної варіації зовнішніх умов, а температура кипіння води залежить від барометричного тиску. Шкала Фаренгейта одержала широке поширення. У 1736 р. точки замерзання і кипіння води за фіксованого барометричного тиску були прийняті як основні для всіх шкал.

Близько 1760 р. Ламберт, німецький астроном, оптик і зодчий, дійшов висновку про достатність в абсолютній шкалі однієї фіксованої точки. Другою такою точкою повинен бути абсолютний нуль. Температура танення льоду була обрана рівною 1000 градусів, при цьому температура кипіння води виходила величиною похідною і рівною 1370 градусам. Незважаючи на очевидні достоїнства, практичного застосування шкала Ламберта не одержала.

Після встановлення фіксованих точок шкали природно виникли питання інтерполяції, що привело до ретельних досліджень стекол і термометричних рідин. Спостереження, проведені на термометрах з однакового скла, що заповнювалися водою, олією, спиртами, ртуттю, показали різний хід меніска

рівня рідини за проміжних температур. У цих дослідженнях була виявлена температурна інверсія щільності води при 4 °С.

Одна з перших пропозицій метрологічної основи інтерполяції була зроблена пізанським професором Ренальдіні в 1694 р. Вона полягала в тому, що проміжне значення показання термометра визначалося пропорційним часткам суміші, складеної з киплячої води і води, зливої з льоду, що тане. При очевидних принципових достоїнствах практична реалізація такого методу виявилася пов'язаною з нездоланими труднощами.

Шведський математик і геодезист Цельсій у 1742 р. запропонував розбити у ртутному термометрі діапазон між точками кипіння води і танення льоду на 100 рівних частин. У цій шкалі точці плавлення льоду відповідало 100 градусів, а точці кипіння води – 0. У 1750 р. шкала була «обернена» Стремером – одним зі співробітників і учнів Цельсія. Подібна шкала з нулем при кипінні води і 150 градусами при її замерзанні була запропонована раніше, у 1740 р., французьким академіком Іслем. Значенневу основу такого зверненого уявлення загублено.

До початку ХХ ст. нарівні зі стоградусною шкалою Цельсія була поширена шкала, запропонована в 1730 р. французьким зоологом і фізиком Реомюром для термометрів, заповнених 80 %-вим водяним розчином етилового спирту. У шкалі Реомюра система розподілу на градуси була прийнята такою ж, як і у флорентійському термометрі: один градус відповідав зміні об'єму рідини на одну тисячну частку. За початок відліку Реомюр прийняв температуру льоду, що тане; температура кипіння води відповідала 80 градусам.

На початку ХІХ ст. у пошуках «абсолютного» метрологічного приладу повернулися до ідеї газового термометра. Відкриті на той час закони Гей-Люсака і Шарля дозволяли припускати, що в газових термометрах показання не буде залежати від виду газового заповнення. Однак при подальшому уточненні методів виміру в газах були виявлені істотні індивідуальні відхилення. Ретельні дослідження французького фізика Ренью показали, що коефіцієнти розширення газів залежать від їх щільності і ступеня віддалення за температурою від стану

скраплення. Підвищення температури і зниження тиску наближають гази до ідеального. Так, при 320 °С і нормальному тиску Реньо не вдалося знайти різниці в показаннях газових термометрів, заповнених воднем, повітрям і вуглекислим газом. У тих же умовах сірчистий газ відрізнявся від водню не тільки значенням коефіцієнта, а й мінливістю цієї величини. Реньо встановив, що зі зниженням тиску це розходження стає менш помітним. Таким чином, розподіл температурної шкали не одержав бажаної обґрунтованості аж до кінця ХІХ ст. Проведені на підставі експериментальних даних Реньо розрахунки пружності водяної пари дали температурну шкалу, яка настільки відрізнялася від звичних шкал газових і рідинних термометрів, що вона не одержала поширення.

Порівняльні виміри показали, що в основному діапазоні 0... 100 °С показання водневого термометра систематично нижче, ніж показання термометрів, заповнених іншими газами. За межами фундаментального діапазону показання термометра були тим вище, ніж легше газ. У точках 0 і 100 °С показання всіх термометрів вважалися однаковими.

Одночасно з чисто експериментальними дослідженнями проводилися і теоретичні пошуки непорушної шкали. У цьому відношенні заманливо було скористатися функцією Карно, що не залежить від речовини і є функцією однієї тільки температури.

У 1848 р. Томсон (лорд Кельвін) запропонував вибрати градус температурної шкали таким чином, щоб у його межах ефективність ідеальної теплової машини була однаковою, тобто щоб значення температури приймалося пропорційним значенню ефективності теплової енергії. Надалі він звернув увагу на те, що звична температура досить близько йде за величиною, зворотною функції Карно. Зворотна функція Карно і була запропонована як основа для абсолютної температурної шкали в 1854 р. Пряме здійснення такої шкали за допомогою ідеальної теплової машини, здатної працювати на порівняно малих перепадах у широкому діапазоні температур, практично неможливе. У 1862 р. Томсон разом з англійським фізиком Джоулем

розробив експериментальний метод оцінки відхилення реального газу від ідеального (ефект Джоуля – Томсона). Перші ж дослідження ефекту Джоуля – Томсона на різних газах показали, що значення температур за шкалою повітряного термометра за нормального тиску несуттєво відхиляються від абсолютної термодинамічної температурної шкали, а за шкалою водневого термометра відхилення нехтовно малі.

На підставі досліджень Джоуля і Томсона з урахуванням відомих даних про неідеальність різних газів у 1887 р. Міжнародним комітетом мір і ваг було прийнято рішення про затвердження як температурного еталону водневого термометра постійного об'єму (щільності) з початковим тиском (при 0 °С) 1 м рт. ст. і стоградусним рівномірним за тиском розподілом шкали в проміжку між точками танення льоду і кипіння води за нормального тиску. Таким чином, був створений технічний засіб передачі термодинамічної температурної шкали практичним вимірам. Громіздкість, складність і повільність вимірів привели до необхідності створення проміжного засобу такої передачі у вигляді еталонованих скляних ртутних термометрів. Проведені дослідження показали, що максимальний розкид показань ртутних еталонованих термометрів з верредура різних плавок при 50 °С не перевищує 0,02 К.

У 1906 р. Штоком і Нільсеном був запропонований термометр із використанням пружності пари насичення. У середині ХХ ст. такі термометри широко застосовувалися на транспорті, зокрема автомобільному. Потім їх замінили біметалічні термовібраційні елементи. На сьогодні принцип виміру температури за тиском насиченої пари використовується лише в лабораторній практиці в галузі низьких температур.

У 1827 р. німецький фізик Ом знайшов залежність електричного опору різних провідників від їх температури. Перший термометр опору був виготовлений Сіменсом у 1871 р. для виміру температури в печах. Платинові термометри опору знайшли застосування як прецизійний інструмент після докладних досліджень англійського фізика Каллендара (1886 р.).

Існування металів з настільки слабо вираженою залежністю опору від температури, що нею можна знехтувати (для константану вона приблизно в 100 разів менше, ніж для платини, срібла, міді), дозволяє реалізувати ефективний мостовий інструмент для прецизійних вимірів, включаючи метрологічні. Значним внеском у підвищення чутливості таких приладів стало застосування напівпровідників. Температурний коефіцієнт напівпровідникових елементів на порядок вище, ніж чистих металів. У 1948 р. фірма «Дженерал моторс» (США) випустила першу партію таких приладів, назвавши їх термісторами.

У 1821 р. німецький фізик Зеєбек відкрив термоелектричний ефект і вказав на можливість використання цього ефекту для виміру температури. Практичні виміри на основі термоелектрики були проведені лише наприкінці ХІХ ст. майже одночасно і незалежно один від одного французькими вченими Беккерелем і Ле Шательє в 1887 р., Барусом у 1889 р. Великий проміжок часу між відкриттям ефекту і його застосуванням для виміру температури порозумівається непорозумінням, пов'язаним з помилковими публікаціями Реньо. Авторитетне твердження Реньо викликало недовіру до першого досліду термоелектричного виміру температури, проведеного ще в 1836 р. французьким фізиком Пуйє.

Докладні дослідження дозволили обрати біля десятка термоелектродних матеріалів, що мають практично прямолінійні температурні характеристики. Особлива перевага термопар полягає в можливості виміру практично в точці. Об'єм спаю термопар у багато разів менше резервуара ртутного термометра, тому вони знайшли широке застосування як у промисловій, так і (особливо) у лабораторній дослідницькій практиці. На даний час переважна більшість температурних вимірів проводиться за допомогою термопар.

В другій половині ХІХ ст. застосування ймовірнісно-статистичного підходу дозволило на новій основі одержати багато теоретичних результатів. З них для термометрії важливими виявилися узагальнення законів випромінювання, отриманого Планком, і фундаментальне рівняння Найквіста, що

пов'язує основні параметри шумових явищ. Ці результати поряд з ідеальним газовим термометром могли бути основою для абсолютної термодинамічної температурної шкали. Наступний розвиток ймовірно-статистичного методу привів до виникнення понять про нерівновагу і негативну абсолютну температуру.

Температура є інтенсивним параметром. Інші шість основних метрологічних параметрів – довжина, маса, час, сила світла, кількість електрики, кількість речовини – за своєю природою екстенсивні і мають властивість суперпозиції. Додавання і розподіл основних одиниць, наприклад, кілограма, забезпечує надійну метрологічну основу виміру маси за довільно великих і малих значень вимірюваної величини. Температура такою властивістю суперпозиції не володіє, і це завжди викликало великі труднощі у проведенні вимірів.

Під час досліджень з'ясувалося, що температурні шкали, що були побудовані на тих самих реперних точках, але використовували різні термометричні речовини, давали різні значення температури. Це порозумівається тим, що термометричні властивості речовин по-різному змінюються з температурою, причому всі ці залежності нелінійні. У зв'язку з цим виникла проблема створення температурної шкали, яка не залежала від термометричних властивостей речовин. Така шкала була запропонована в 1848 р. Кельвіном і називалася термодинамічною. В основу побудови термодинамічної шкали Кельвін узяв ідеальний цикл Карно, у якому робота, отримана в цьому циклі, залежить тільки від температур початку і кінця процесу. Таким чином, термодинамічна шкала, запропонована Кельвіном, не залежала від термометричних властивостей, однак для практичного виміру температури вона була незручною: потрібно було або вимірювати кількість теплоти, або при використанні термометрів, заповнених реальними газами, вводити для кожного значення температури різні виправлення.

Як еталонний засіб виміру для області температур від 13,81 до 903,89 К (630,74 °С) застосовують термометр опору, виготовлений із платинового дроту. Для області температур від

630,74 до 1064,43 °С як еталон застосовується платиноводій-платиновий термоелектричний термометр. Для області температур від 1337,58 К (1064,3 °С) до 6300 К застосовується квазі-монохроматичний пірометр.

Для діапазону 0,01–0,8 К встановлена температурна шкала термометра магнітної сприйнятливості (ТШТМС), принцип якої базується на залежності магнітної сприйнятливості термометра з цері-магнієвого нітрату від температури.

У діапазоні від 1,5 до 4,2 К застосовується шкала конденсаційного термометра ^4He 1958 р., принцип якої базується на залежності тиску насичених пар ізотопу гелію-4 від температури.

Температурна шкала германієвого термометра електричного опору (ТШГТО) базується на залежності опору германієвого термометра від температури T і встановлена для діапазону температур від 4,2 К до 13,81 К.

Температурна шкала пірометра мікрохвильового випромінювання (ТШПМВ) базується на залежності спектральної щільності енергії випромінювання $L(T)$ чорного тіла від температури T в мікрохвильовому діапазоні випромінювання і встановлена для діапазону від 6300 до 100 000 К.

Для практичних цілей поряд з теоретичною термодинамічною температурною шкалою вводилися шкали, пов'язані з певною системою реперних крапок і засобів реалізації інтерполяції. У 1889 р. Перша міжнародна конференція по мірах і вагах затвердила «Нормальну водневу шкалу». Наступні корективи в редакції температурних шкал вносилися після ретельної попередньої підготовки на міжнародних офіційних зборах, та приймалася Міжнародна практична температурна шкала, позначена скорочено МПТШ.

У широкому діапазоні вимірів газовий термометр тривалий час був єдиним засобом передачі термодинамічної температурної шкали. Про складність роботи з ним можна судити по тому, що цей інструмент вимагає кондиціонованого приміщення площею декілька десятків квадратних метрів. Ця обставина привела до того, що передача шкали охоплена складною

системою реперних точок і засобів інтерполяційної передачі у вигляді термометрів опору і термопар. Природний для метрологів консерватизм став гальмом подальшого розвитку. Якими ж можуть бути очікувані шляхи розвитку метрології?

Дотепер тільки три фундаментальних явища можуть бути покладені в основу передачі. Вони виражені рівняннями Клапейрона, Планка і Найквіста. Значне підвищення культури теплометричних і частотно-спектральних вимірів за допомогою нової апаратури відкриває можливості перерозподілу діапазонів передачі шкали. На підставі закону Стефана – Больцмана (окремий випадок закону Планка) можна провести надійну передачу з похибкою, що несуттєво перевищує 10^{-4} вимірюваної величини абсолютної температури, починаючи з 200 К і вище, без обмеження.

2.1.2 Засоби виміру температури

На сьогодні у різних галузях науки й у промисловості застосовуються десятки різних способів виміру температури. У табл. 2.1 наведені найбільш розповсюджені у промисловості засоби виміру температури і зазначені межі застосування серійних засобів виміру. У дужках зазначені межі застосування засобів виміру для спеціальних цілей. Засіб вимірів температури, призначений для вироблення сигналу у формі, зручній для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, передачі і використання в автоматичних системах управління, називається термометром.

Засіб виміру температури за тепловим електромагнітним випромінюванням називається пірометром. Пірометри застосовуються для безконтактного виміру температури.

Таблиця 2.1 – Межі застосування промислових засобів виміру температури

Тип засобу виміру	Різновид засобу виміру	Межа тривалого застосування, °С	
		нижня	верхня
Термометри розширення	Рідинні скляні термометри	-200	600
	Манометричні термометри	-200 (-272)	1000
Термометри опору	Металічні (провідникові) термометри опору	-260	1100
	Напівпровідникові термометри опору	-272	600
Термоелектричні термометри	Термоелектричні термометри	-200 (-270)	2200 (2800)
Пірометри	Квазімонохроматичні пірометри	700	6000 (100 000)
	Пірометри спектрального відношення	300	2800
	Пірометри повного випромінювання	-50	3500

Термометри розширення. Скляні рідинні термометри. Принцип дії скляних рідинних термометрів базується на розширенні термометричної рідини, вміщеної в термометр, залежно від температури. Скляні термометри за своєю конструкцією бувають кийові і з вкладеною шкалою. Скляний термометр із вкладеною шкалою складається зі скляного резервуара і припаяного до нього скляного капіляра (рис. 2.1). Уздовж капіляра розташована шкала, яка, як правило, наноситься на пластині молочного скла. Резервуар, капіляр і шкала містяться у скляній оболонці, що припаюється до резервуара. Кийові скляні термометри виготовляються з товстостінних капілярів, до яких припаюється резервуар. Шкала термометра наноситься на зовнішній поверхні капіляра. Температура вимірюваного середовища, у яку поміщені резервуар і частина капіляра, визначається за зміною об'єму термометричної рідини, відлічуваною за положенням рівня рідини в капілярі, що відградуєвано

в градусах Цельсія. У зв'язку з тим, що одночасно з розширенням термометричної рідини відбувається також розширення резервуара і капіляра, фактично ми судимо про температуру не за зміною об'єму рідини, а за видимою зміною об'єму термометричної рідини у склі. Тому видиме розширення рідини трохи менше дійсного. У табл. 2.2 наведені деякі термометричні рідини та їх характеристики.



Рис. 2.1 – Ртутний термометр

Серед рідинних термометрів найбільшого поширення одержали ртутні скляні термометри. Хімічно чиста ртуть як термометрична речовина має ряд достоїнств: вона залишається рідиною в широкому інтервалі температур, не змочує скло, легко може бути отримана в чистому вигляді. Однак ртуть має

відносно малий температурний коефіцієнт об'ємного розширення, що вимагає виготовлення термометрів з тонкими капілярами. Нижня межа виміру ртутних термометрів -35°C визначається температурою затвердіння ртуті. Верхня межа виміру $+600^{\circ}\text{C}$ визначається характеристиками міцності скла. У зв'язку з тим, що температура кипіння ртуті за атмосферного тиску значно менше верхньої межі застосування ртутних термометрів, у термометрах, призначених для виміру високих температур, капіляр над ртуттю заповнюється інертним газом, наприклад, азотом. При цьому для виключення утворення пари ртуті в капілярі тиск газу повинен бути тим більше, чим вище верхня межа виміру. Для термометрів з верхньою межею виміру 600°C тиск газу над ртуттю перевищує 3 МПа (30 кгс/см^2).

Таблиця 2.2 – Термометричні рідини

Термометрична рідина	Середня температура, $^{\circ}\text{C}$		Межі застосування, $^{\circ}\text{C}$		Середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення, $10^5, \text{K}^{-1}$	
	затвердіння	кипіння	нижня	верхня	дійсний	видимий
Ртуть	-38,9	356,6	-35	600	18	16
Толуол	-97,2	109,8	-90	200	109	107
Етиловий спирт	-114,5	78,0	-80	70	105	103
Керосин	–	До 325	-60	200	95	93
Петролейний ефір	–	До 70	-120	25	152	150
Пентан	-200	36	-200	20	92	90

Скляні термометри з органічними термометричними рідинами застосовуються в інтервалі температур від -200 до $+200^{\circ}\text{C}$. Однак ці рідини змочують скло і тому вимагають застосування капілярів з відносно великим діаметром каналу.

До достоїнств скляних рідинних термометрів належать висока точність виміру, простота і дешевина. Недоліками скляних термометрів є відносно погана видимість шкали, практична неможливість передачі показань на відстань і, отже, неможливість автоматичної реєстрації показань, а також неможливість ремонту термометрів.

Залежно від галузі застосування за методикою градуювання термометри поділяються на дві групи: термометри, які градуюються при повному зануренні, і термометри, які градуюються при неповному зануренні (як правило, за певної довжини занурення нижньої частини). Термометри першої групи застосовуються, як правило, у лабораторних умовах і дозволяють забезпечити більш високу точність. Глибина їх занурення повинна змінюватися за зміни температури. Термометри другої групи – технічні – застосовуються для виміру температур у промисловості; глибина їх занурення повинна бути постійною. У зв'язку з цим конструктивно технічні термометри виконані таким чином, що діаметр їх нижньої («хвостової») частини істотно менше діаметра їх верхньої частини, у якій розташована шкала. Ці термометри занурюються у вимірюване середовище на глибину нижньої частини. Розходження у градуванні і застосуванні скляних термометрів викликане тим, що при вимірі температури можуть мати місце систематичні похибки, характерні для даного засобу виміру. Однією з них є похибка за рахунок виступаючого стовпчика термометра. Якщо термометр градуювався при повному його зануренні у вимірюване середовище до відлічуваної температурної оцінки, а на практиці він не був занурений до цієї оцінки і частина стовпчика термометричної речовини знаходилася поза вимірюваним середовищем, виступала з неї, то може мати місце похибка за рахунок виступаючого стовпчика. Ця похибка існує, коли температура виступаючої частини стовпчика термометричної рідини і частини, зануреної у вимірюване середовище, була різною, а виходить, буде різним і розширення зануреної і виступаючої частини рідини.

Іншою похибкою, характерною для скляних термометрів розширення, є зсув нульової точки термометра. Цей зсув

спостерігається після нагрівання термометра до температур, близьких до верхньої межі виміру. При наступному охолодженні термометра до 0°C скляний капіляр не відразу набуває тих же розмірів, що він мав до нагрівання. Тому ртуть, об'єм якої став дорівнювати початковому, буде розташована в капілярі, перетин якого ще не зменшився до початкового – трохи нижче оцінки 0°C . Цей зсув нульової точки термометра може досягати в технічних термометрах зі шкалою $0\text{--}600^{\circ}\text{C}$ значення 3°C . У термометрів з меншою верхньою межею виміру цей зсув менше.

На даний час випускаються наступні різновиди скляних термометрів.

1. Технічні ртутні термометри із вкладеною шкалою прями (рис. 2.2, а) і кутові випускаються 11 модифікацій зі шкалами від -90 до $+30$; від -60 до $+50$; від -30 до $+50$; від 0 до 100 ; від 0 до 160 ; від 0 до 200 ; від 0 до 300 ; від 0 до 350 ; від 0 до 450 ; від 0 до 500 і від 0 до 600°C .

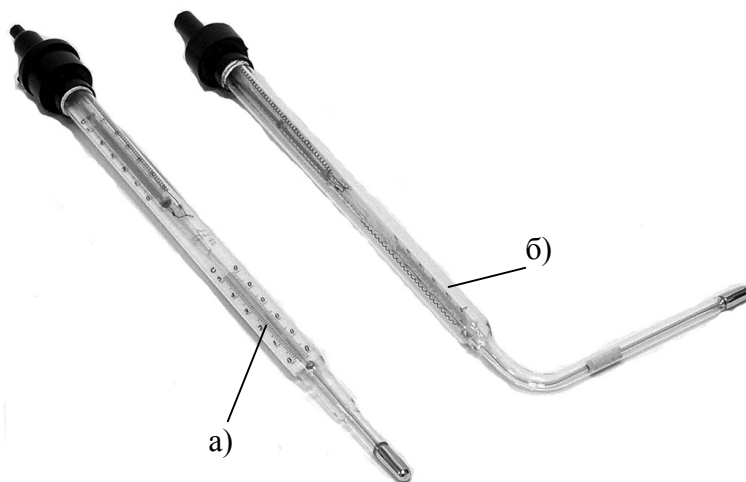


Рис. 2.2 – Технічні скляні електроконтактні термометри:

а – прями; б – кутовий

2. Лабораторні ртутні термометри кийові і з вкладеною шкалою призначені для виміру температур від -30 до $+600^{\circ}\text{C}$. Ці термометри занурюються у вимірюване середовище до відлічуваної температурної оцінки. Термометри підрозділяються на чотири групи. Термометри з ціною розподілу $0,1^{\circ}\text{C}$ мають діапазон виміру 55°C (наприклад, $0-55^{\circ}\text{C}$ чи $200-255^{\circ}\text{C}$) з верхньою межею виміру не більше 305°C . Для великих діапазонів виміру $0-500^{\circ}\text{C}$, $0-600^{\circ}\text{C}$ ціна розподілу шкали 2°C .

3. Рідинні (не ртутні) термометри випускаються кийові, із вкладеною шкалою і з зовнішньою шкальною пластиною на межі виміру від -200 до $+200^{\circ}\text{C}$ з ціною розподілу від $0,2$ до 5°C .

4. Термометри ртутні підвищеної точності і зразкові випускаються з вузькими діапазонами виміру (від 4 до 50°C) і з ціною розподілу від $0,01$ до $0,1^{\circ}\text{C}$.

5. Термометри ртутні електроконтактні випускаються для підтримки постійної температури або сигналізації заданої температури в інтервалі від -30 до $+300^{\circ}\text{C}$. Термометри випускаються з постійним робочим і з рухливим робочим контактами, які можуть бути встановлені на будь-якому значенні температури в межах шкали.

6. Спеціальні термометри; медичні (максимальні), метеорологічні (максимальні, мінімальні, психрометричні, ґрунтові та ін.) та іншого призначення.

Похибки технічних термометрів, що допускаються, не повинні перевищувати розподілу шкали.

Скляні термометри є одним з найточніших засобів виміру температури.

Манометричні термометри. Принцип дії манометричних термометрів базується на залежності тиску термометричної речовини в герметично замкнутому об'ємі від температури. Термосистема манометричного термометра (рис. 2.3) складається з термобалона, капіляра 2 і манометричної пружини, один кінець якої з'єднаний з капіляром, а другий, запаяний кінець пружини, з'єднаний зі стрілкою вимірювального приладу 3.

Манометричні термометри залежно від виду робочої (термометричної) речовини, яка заповнює термосистему, під-розділяються на газові, рідинні і конденсаційні. Манометричні термометри виготовляються для виміру температур від -200 до $+600^{\circ}\text{C}$, конкретні діапазони виміру визначаються заповнювачем термосистеми. Термометри зі спеціальним заповнювачем застосовуються для виміру температур від 100 до 1000°C .

Термобалон термометра занурюється у вимірюване середовище, і робоча речовина, що знаходиться в термобалоні, приймає температуру вимірюваного середовища. При цьому в термосистемі встановлюється тиск, обумовлений температурою вимірюваного середовища. За підвищення температури тиск підвищується, за зменшення температури – знижується. Зміна тиску робочої речовини через гнучкий капіляр передається на вимірний прилад, що є частиною манометричного термометра. Вимірювальний прилад є пружинним манометром, розрахованим на ті діапазони виміру тиску, що мають місце в термосистемах манометричних термометрів.



Рис. 2.3 – Манометричний термометр

Газові манометричні термометри призначені для виміру температури від -200 до $+600^{\circ}\text{C}$. Як робоча речовина в газових термометрах застосовується азот. Залежність тиску газу від температури за постійного об'єму описується лінійним рівнянням:

$$p_t = p_0(1 + \beta t),$$

де p_t і p_0 – тиск газу за температур t і 0°C ;

β – температурний коефіцієнт розширення газу,

$\beta = 1/273$, чи $0,00366 \text{ K}^{-1}$.

Рівняння шкали газового манометричного термометра буде також лінійним:

$$p_k - p_n = p_n \frac{\beta(t_k - t_n)}{1 + \beta t_n},$$

де p_n і p_k – тиск газу за температур, що відповідають початку t_n і кінцю t_k шкали термометра.

У зв'язку з тим, що за зміни температури за рахунок теплового розширення змінюється об'єм термобалона, а також змінюється з тиском внутрішній об'єм манометричної пружини, об'єм термосистеми не постійний. Тому реальне рівняння шкали трохи відрізняється від лінійного. Однак це відхилення незначне і можна вважати, що шкали газових манометричних термометрів є рівномірними. Діапазон зміни робочого тиску в термосистемі може бути збільшений шляхом збільшення початкового тиску азоту в термосистемі. Це дозволяє уніфікувати манометричні пружини, а також зменшує барометричну похибку манометричного термометра. Пружинні манометри вимірюють надлишковий тиск, і тому зміна барометричного тиску може викликати зміну їх показань. Якщо вимірюваний тиск

буде значним, то коливання барометричного тиску практично не будуть впливати на показання приладу.

Зміна температури навколишнього повітря буде впливати на розширення робочої речовини в капілярі і манометричній пружині, що буде викликати зміну тиску в термосистемі і відповідну зміну показань термометра. Для зменшення цього впливу прагнуть зменшити відношення внутрішнього об'єму пружини і капіляра до об'єму термобалона. Для цього збільшують довжину термобалона чи його діаметр. Довжина термобалона газового манометричного термометра не повинна перевищувати 400 мм, а діаметр термобалона обирається з ряду 5, 8, 10, 12, 16, 20, 25 і 30 мм (ГОСТ 8624-80). Довжина капіляра може складати від 0,6 до 60 м. Для зменшення температурної погрішності в деяких вимірювальних приладах усередині встановлюють термокомпенсатори. Спеціально виготовлені газові манометричні термометри можуть застосовуватися і для виміру температур більш низьких, чим 0°C . Наприклад, водневий газовий термометр може застосовуватися до -250°C , а гелієвий – до -267°C .

Рідинні манометричні термометри призначені для виміру температури від -150 до $+300^{\circ}\text{C}$. Як робочу речовину, що заповнює термосистему, застосовують ртуть, пропилловий спирт, метаксилол та інші рідини. Робоча речовина рідинних манометричних термометрів практично нестислива. Тому зміна об'єму робочої рідини в термобалоні за зміни температури на величину, що відповідає діапазону виміру, викликає таке збільшення тиску в термосистемі, за якого манометрична пружина змінить свій внутрішній об'єм на величину зміни об'єму рідини. Тиск, за якого це буде мати місце, залежить від твердості пружини і для різних манометричних пружин може бути різним.

У рідинних манометричних термометрах похибка, викликана зміною барометричного тиску, як правило, відсутня, тому що тиск у системі значний. Похибка, викликана зміною температури навколишнього середовища, має місце й у рідинних манометричних термометрах. Для її зменшення застосовують ті ж способи, що й у газових манометричних термометрах:

зменшують відносний об'єм рідини, що знаходиться за температури навколишнього середовища, зменшуючи внутрішній об'єм термокапіляра і пружини, чи усередину вимірювального приладу вбудовують спеціальні термокомпенсатори похибки.

У рідинних манометричних термометрах може мати місце гідростатична похибка, що виникає за різних рівнів розташування термобалона і вимірювального приладу. Для зниження можливих гідростатичних похибок довжину капіляра зменшують до 10 м. Відстані, що допускаються, по висоті між термобалоном і вимірювальним приладом вказуються в інструкціях до приладів.

Конденсаційні манометричні термометри призначені для виміру температур від -50 до $+300$ °С. Термобалон термометра приблизно на $3/4$ заповнений низькокиплячою рідиною, а інша частина заповнена насиченою парою цієї рідини. Кількість рідини в термобалоні повинна бути такою, щоб за максимальної температури не вся рідина переходила в пару. Як робочу рідину застосовують фреон-22, пропилен, хлористий метил, ацетон і етилбензол. Капіляр і манометрична пружина заповнюються, як правило, іншою рідиною. Тиск у термосистемі конденсаційного манометричного термометра буде дорівнювати тиску насиченої пари робочої рідини, обумовленому у свою чергу температурою, за якої знаходиться робоча рідина, тобто температурою вимірюваного середовища з помещеним у неї термобалоном. Ця залежність тиску насичення пари від температури має нелінійний вид, вона однозначна, коли вимірювана температура не перевищує критичну.

У зв'язку з тим, що тиск у термосистемі залежить тільки від вимірюваної температури, на показання термометра не буде впливати температура навколишнього середовища. Практично невелика похибка буде мати місце за рахунок механізму передачі усередині манометра, але сам принцип виміру забезпечує незалежність від температури навколишнього середовища. Гідростатична похибка викликається різницею висот розташування термобалона і вимірювального приладу, причому ця похибка буде залежати від показань приладу: на початку шкали вона

буде більше, а наприкінці – менше. Довжина капіляра для зменшення цієї похибки не перевищує 25 м. Барометрична похибка у конденсаційних манометричних термометрів може мати місце на початковій ділянці шкали, коли тиск у термосистемі невеликий. В інших випадках вплив тиску буде нехтовно малим. Спеціально виготовлені конденсаційні манометричні термометри застосовуються для виміру наднизьких температур. Конденсаційні термометри, заповнені гелієм, використовуються для виміру температур від 0,8 К.

Манометричні термометри відрізняються простотою пристрою, можливістю дистанційної передачі показань і автоматичного запису. Однією з важливих переваг є можливість їх використання в пожежо- і вибухонебезпечних приміщеннях. До недоліків відносяться труднощі ремонту при розгерметизації системи, обмежена відстань дистанційної передачі показань і в багатьох випадках великі розміри термобалона. Газові і рідинні манометричні термометри мають клас точності 1; 1,5 і 2,5, конденсаційні – 1,5; 2,5 і 4.

Термоелектричні термометри. Застосування термоелектричних термометрів для виміру температури базується на залежності термоелектрорушійної сили термопари від температури. Термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС) виникає в ланцюзі, складеному з двох різнорідних провідників за нерівності температур у місцях з'єднання цих провідників (рис. 2.4). Сучасна фізика пояснює термоелектричні явища в такий спосіб. З одного боку, унаслідок розходження рівнів Фермі в різних металах при їх зіткненні виникає контактна різниця потенціалів. З іншого боку, концентрація вільних електронів у металі залежить від температури. За наявності різниці температур у провіднику виникає дифузія електронів, що приводить до утворення електричного поля. Таким чином, термоелектрорушійна сила складається із суми стрибків потенціалу в контактах (спаях) термопари і суми змін потенціалу, викликаних дифузією електронів, і залежить від роду провідників та їх температури.

Якщо в ланцюзі (рис. 2.4) температури місць з'єднання провідників a і b будуть однакові й рівні t , то й різниці потенціалів будуть рівні за значенням, але мати різні знаки:

$$e_{ab}(t) = -e_{ba}(t),$$

а сумарна термо-ЕРС і струм у ланцюзі будуть дорівнювати нулю:

$$E_{ab}(t, t) = e_{ab}(t) - e_{ba}(t) = 0.$$

Якщо $t \neq t_0$, то сумарна термо-ЕРС не дорівнює нулю:

$$E_{ab}(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0) \neq 0,$$

тому що різниці потенціалів для тих самих провідників за різних температур не рівні: $e_{ab}(t) = e_{ba}(t_0)$. Результуюча термо-ЕРС залежить для даних провідників a і b від температур t і t_0 . Щоб одержати однозначну залежність термо-ЕРС від вимірюваної температури t , необхідно іншу температуру t_0 підтримувати постійною.

Для виміру термо-ЕРС у ланцюг термоелектричного термометра включають вимірювальний прилад, причому його включення вводить у ланцюг принаймні ще один, третій провідник.

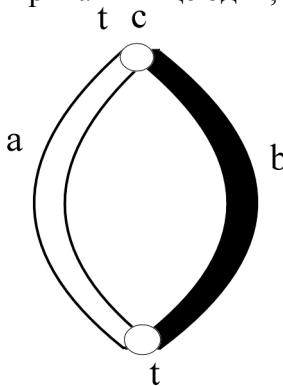


Рис. 2.4 – Термоелектричний ланцюг

Для того щоб з'ясувати, як впливає включення в ланцюг термоелектричного термометра третього провідника, розглянемо ланцюг, складений із трьох різних провідників a , b , c (рис. 2.5,а). Термо-ЕРС такого ланцюга за рівності температур усіх місць з'єднання буде:

$$E_{abc}(t) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t) + e_{ca}(t) = 0;$$

$$E_{abc}(t)$$

чи

$$e_{ab}(t) = -e_{bc}(t) - e_{ca}(t).$$

Розглянемо термоелектричний ланцюг із трьох провідників, коли температура місць приєднання третього провідника c не дорівнює вимірюваній температурі (рис. 2.5, б):

$$E_{abc}(t, t_0) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0).$$

З цього випливає, що

$$e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0) = -e_{ab}(t_0).$$

Тоді можна записати:

$$E(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0),$$

тобто термо-ЕРС ланцюга, складеного з трьох різнорідних провідників, не відрізняється від термо-ЕРС ланцюга, складеного з двох провідників, якщо температури місць приєднання третього провідника рівні. З закономірностей включення третього провідника можна зробити наступні висновки: включення одного, двох чи декількох провідників у ланцюг термоелектричного термометра не викликає перекручування термо-ЕРС термометра, якщо місця приєднання кожного з цих провідників будуть

мати однакову температуру; робочий кінець термоелектричного термометра можна виготовляти шляхом зварювання або пайки, якщо температура у всіх точках спаю буде однакою.

На підставі особливостей включення третього провідника в ланцюг термоелектричного термометра можуть бути використані два варіанти включення вимірювального приладу ВП у ланцюг термоелектричного термометра: у розрив електрода (рис. 2.5, а) і в розрив спаю (рис. 2.5, б).

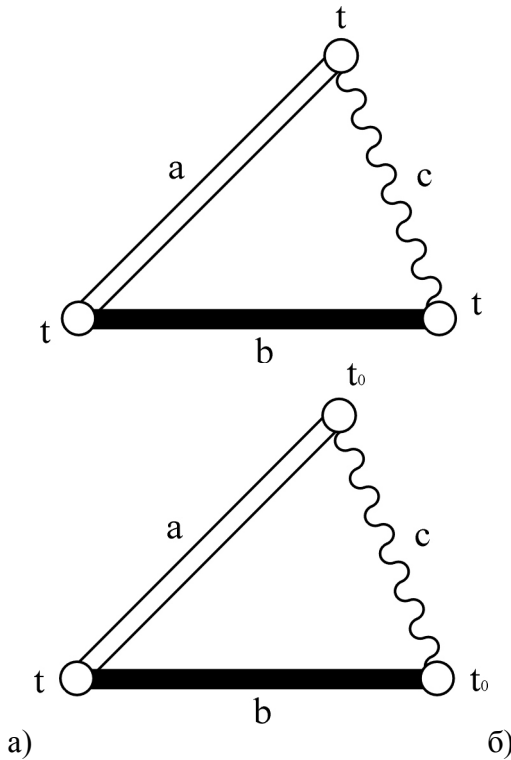


Рис. 2.5 – Включення третього провідника в ланцюг термопари

У першому випадку вимірювана температура (температура робочого кінця) буде t , температура вільних кінців,

підтримувана постійною, t_0 і температури місць приєднання третього провідника з вимірювальним приладом t_1' і t_1'' . Щоб не було перекручування термо-ЕРС, що розвивається, температури t_1' і t_1'' повинні бути рівні, $t_1'=t_1''$, а температура вільних кінців $t_0=\text{const}$. В другому випадку третій провідник з вимірювальним приладом включається в розрив вільних кінців, тому місця приєднання третього провідника одночасно є вільними кінцями термоелектричного термометра. Ці температури повинні бути однакові як кінці третього провідника і постійні як вільні кінці. Якщо виконані ці умови, то включення вимірювального приладу не спотворює термо-ЕРС термометра.

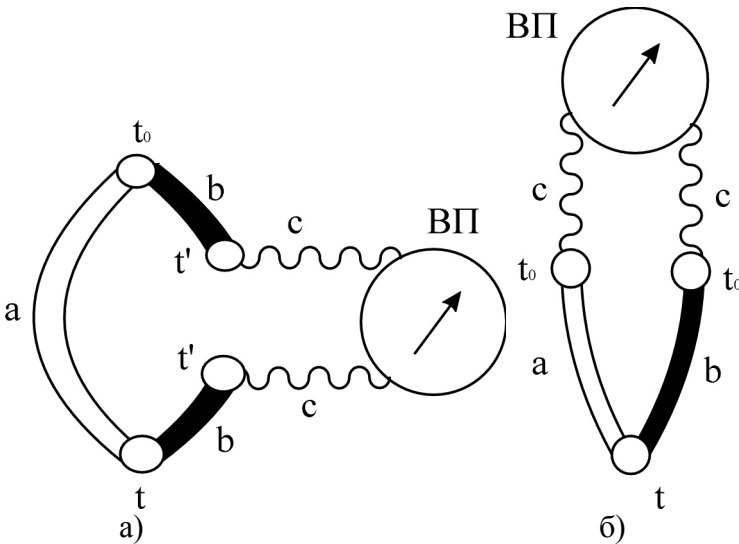


Рис. 2.6 – Включення вимірювального приладу в ланцюг термоелектричного термометра

Для виміру температури термоелектричним термометром необхідно вимірити термо-ЕРС, що розвивається термометром, і температуру вільних кінців. Якщо температура вільних кінців термометра при вимірі температури дорівнює 0°C , то

вимірювана температура визначається відразу з градуювальної характеристики (таблиць, графіків) (рис. 2.7), що встановлює залежність термо-ЕРС від температури робочого спаю.

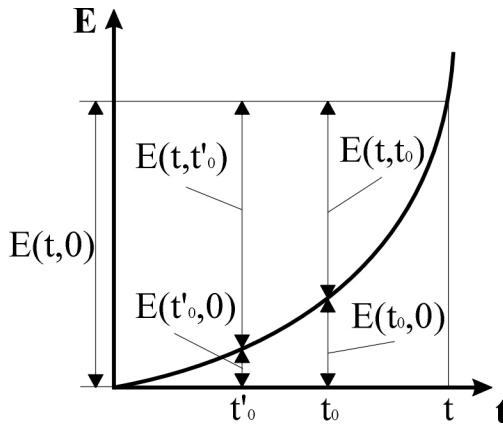


Рис. 2.7 – Уведення виправлення на температуру вільних кінців термоелектричного термометра

Градуювальні характеристики термоелектричних термометрів визначені, як правило, за температури вільних кінців, рівній 0°C . Якщо температура вільних кінців на практиці відрізняється від 0°C , але залишається постійною, то для визначення температури робочого кінця за градуювальною характеристикою необхідно знати не тільки термо-ЕРС, що розвивається термометром, а й температуру вільних кінців t_0 . Щоб увести виправлення на температуру вільних кінців t_0 , якщо $t_0 \neq 0$, необхідно до термо-ЕРС, що розвивається термоелектричним термометром $E(t, t_0)$, додати $E(t_0, 0)$, щоб одержати значення термо-ЕРС $E(t, 0)$:

$$E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 0).$$

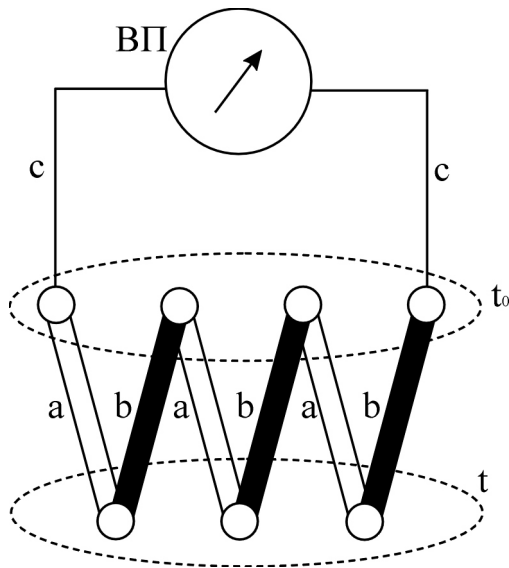


Рис. 2.8 – Термобатарея

Таку термо-ЕРС $E(t,0)$ розвиває термоелектричний термометр за температури робочого спаю t і температури вільних кінців 0°C , тобто за умов градуювання.

Якщо в процесі виміру температура вільних кінців приймає якесь нове значення t_0 , то термо-ЕРС, що розвивається термометром, буде $E(t, t_0)$ (рис. 2.7) і величина виправлення на температуру вільних кінців буде $E(t_0,0)$, а термо-ЕРС, що відповідає умовам градуювання:

$$E(t,t_0') + E(t_0',0) = E(t,0).$$

Значення виправлення на температуру вільних кінців термоелектричного термометра залежить від градуювальної характеристики термометра, обумовленої матеріалами провідників, з яких виготовлений термоелектричний термометр. Незалежно від способу уведення виправлення (розрахункового чи автоматичного) методика уведення виправлення залишається незмінною: визначається розрахунковим шляхом чи автоматично у схемі

виходить значення $E(t_0,0)$, яке потім сумується з термо-ЕРС термопари. Сумарна термо-ЕРС $E(t,0)$ відповідає градуувальному значенню. Для рішення окремих задач вимірів температури застосовуються різні способи з'єднання термоелектричних термометрів. Найбільш розповсюджені з них – термобатарей і диференціальна термопара. Для збільшення коефіцієнта перетворення термоелектричного термометра застосовують послідовне включення декількох термопар (термобатарей) (рис. 2.8). При цьому термо-ЕРС, що розвивається термопарами, сумується, тобто термо-ЕРС термобатарей, що складається з n термопар, у n раз більше термо-ЕРС окремої термопари. Таке включення застосовують для вимірів за малих різниць температур робочого t і вільного t_0 кінців. Однак, як правило, температури в різних точках розташування робочих і вільних кінців не зовсім однакові, внаслідок неоднорідності температурних полів. Тому термобатарея, збільшуючи термо-ЕРС термометра, дозволяє зменшити похибку виміру термо-ЕРС, але не підвищує істотно точності виміру температури.

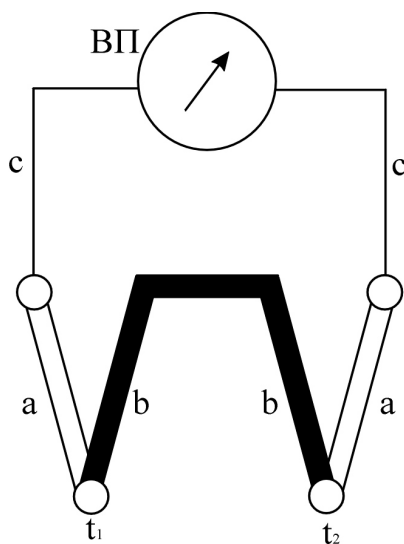


Рис. 2.9 – Диференціальний термоелектричний термометр

У деяких випадках виникає необхідність виміру різниці температур у двох точках. Для цього розташовують робочий спай термопари в одній із точок, а вільні кінці – в іншій точці (рис. 2.9). У цьому випадку термо-ЕРС, що розвивається термометром, буде визначатися температурами робочого спаю t_1 і вільних кінців t_2 :

$$E(t_1, t_2) = e(t_1) - e(t_2).$$

Якщо в інтервалі температур $t_1 - t_2$ залежність термо-ЕРС від температури може бути апроксимована лінійною залежністю, то рівняння прийме вид:

$$E(t_1, t_2) = k (t_1 - t_2).$$

Така лінійна апроксимація звичайно справедлива для будь-якої термопари за різниці температур, що не перевищує 20–25 °С.

Будова термоелектричних термометрів і застосовувані матеріали. Два будь-яких різнорідних провідники можуть утворити термоелектричний термометр. Як же вибрати, які з провідників можуть бути використані для виготовлення термоелектричних термометрів і з яких провідників доцільніше виготовляти термоелектричні термометри? До матеріалів, використовуваних для виготовлення термоелектричних термометрів, пред'являється цілий ряд вимог: жаростійкість, жароміцність, хімічна стійкість, відтворюваність, стабільність, однозначність і лінійність градуувальної характеристики і ряд інших. Серед них є обов'язкові і бажані вимоги. До числа обов'язкових вимог належать стабільність градуувальної характеристики і (для стандартних термометрів) відтворюваність у необхідних кількостях матеріалів, що мають цілком певні термоелектричні властивості. Всі інші вимоги є бажаними. Наприклад, можуть бути дуже жароміцні матеріали, відтворені з однозначною і лінійною градуувальною характеристикою і високим коефіцієнтом перетворення. Але якщо градуувальна характеристика цих

матеріалів нестабільна, то вимірювати таким термометром не можна. З іншого боку, матеріали, що мають низький коефіцієнт перетворення, нелінійну градувальну характеристику, але стабільну характеристику, використовуються для термоелектричних термометрів.

Відповідно до стандартів будуть застосовуватися наступні стандартні термоелектричні термометри.

Мідь-копелеві та мідь-міднонікелеві типу Т (близькі до мідь-константанових) термоелектричні термометри застосовуються головним чином для виміру низьких температур у промисловості і лабораторній практиці. Застосування цих термометрів для температур менше $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ускладнюється істотним зменшенням коефіцієнта перетворення зі зменшенням температури. За температуру понад $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ починається інтенсивне окислювання міді, що обмежує застосування термометрів цих типів.

Залізо-міднонікелеві, близькі до залізо-константанових термоелектричних термометрів типу J, застосовуються в широкому діапазоні температур від -200 до $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а короткочасно – і до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони мають досить великий коефіцієнт перетворення (близько $55\text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$). Верхня межа виміру обмежена окислюванням заліза та міднонікелевого сплаву.

Таблиця 2.3 – Стандартні термоелектричні термометри

Тип термопари термоелектричного термометра	Позначення	Робочий діапазон тривалого режиму роботи, $^{\circ}\text{C}$	Максимальна температура короткочасного режиму роботи, $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4
Мідь-копелева	–	$-200 \div +100$	–
Мідь-міднонікелева	T	$-200 \div +400$	–
Залізо-міднонікелева	J	$-200 \div +700$	900
Хромель-копелева	(ХК)	$-50 \div +600$	800
Нікельхром-міднонікелева	E	$-100 \div +700$	900

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
Нікельхром- нікельалюмінієва (хромель-алюмелева)	К (ХА)	-200 ÷ +1000	1300
Платинородій (10 %)- платинова	S (ПП)	0 ÷ +1300	1600
Платинородій (30 %)- платиноро-дієва (6 %)	В(ПР)	300 ÷ 1600	1800
Вольфрамрений (5 %)- вольфрам- ренієва (20 %)	(ВР)	0 ÷ 2200	2500

Хромель-копелеві термоелектричні термометри мають найбільший коефіцієнт перетворення з усіх стандартних термометрів (близько 70–90 мкВ/°С). Для термометрів з термоелектродами діаметром менше 1 мм верхня межа тривалого застосування менше 600 °С і складає, наприклад, для термоелектродів діаметром 0,2–0,3 мм тільки 400°С. Верхня межа застосування визначається стабільністю характеристик копелевого термоелектрода.

Нікельхром-міднонікелеві (тип Е), близькі до хромель-константанових і нікельхром-нікельалюмінієвих (тип К) термометрів, які раніше називались хромель-алюмелевими, застосовуються для виміру температури різних середовищ у широкому інтервалі температур. Термоелектрод з нікельалюмінієвого дроту менш стійкий до окислювання, ніж нікельхромовий. Верхні межі застосування залежать від діаметра термоелектродів. Для термоелектродів діаметром 3–5 мм верхня межа тривалого застосування нікельхром-нікельалюмінієвих термометрів складає 1000 °С, а для діаметра 0,2–0,3 мм – не більше 600 °С. Для нікельхром-міднонікелевої термопари він не перевищує 700 °С.

Усі перераховані вище термоелектричні термометри з благородних матеріалів добре стоять в інертній і відбудовній атмосфері, в окисній атмосфері їх термін служби обмежений.

Крім того, термоелектричні термометри хромель-копелеві та нікельхром-нікельалюмінієві (хромель-алюмелеві) відрізняються досить високою стабільністю градувальної характеристики за високої інтенсивності іонізуючих випромінювань.

Платинородій-платинові термоелектричні термометри (тип S) можуть довгостроково працювати в інтервалі температур від 0 до 1300 °С, а короткочасно – до 1600 °С. Позитивний термоелектрод являє собою сплав, що складається на 10 % з родію і на 90 % із платини, негативний термоелектрод складається з чистої платини. Ці термометри зберігають стабільність градувальної характеристики в окисному і нейтральному середовищах. У відбудовній атмосфері платинородій-платинові термометри працювати не можуть, тому що відбувається істотна зміна термо-ЕРС термометра. Так само несприятливо впливає на платинородій-платинові термометри контакт із вуглецем, парами металів, з'єднаннями вуглецю і кремнію, а також низкою інших матеріалів, що забруднюють термоелектроди. Слід зазначити, що градувальна характеристика типу S не збігається з градувальною характеристикою ПП, що застосовувалася раніше.

Платинородій-платинородієві термоелектричні термометри (тип В) застосовуються довгостроково в інтервалі температур від 300 до 1600°С, короткочасно – до 1800 °С. Позитивний електрод – сплав з 30 % родію і 70 % платини, а негативний – з 6 % родію і 94 % платини. Ці термометри відрізняються більшою стабільністю градувальної характеристики, ніж платинородій-платинові, але вони також погано працюють у відбудовному середовищі. У зв'язку з тим що термо-ЕРС, що розвивається платинородій-платинородієвими термометрами в інтервалі температур 0–100 °С, незначна, при технічних вимірах їх можна застосовувати без термостатування вільних кінців. Наприклад, якщо температура вільних кінців 70 °С і виправлення на неї не вводиться, то за температури робочого спаю 1600 °С це викликає похибку близько 2,1 °С. Градувальна характеристика типу В також не збігається з градувальною характеристикою ПР.

Вольфрамрений-вольфрамрениєві термоелектричні термометри призначені для тривалого виміру температур від 0 до 2200 °С і короткочасно до 2500°С в вакуумі, у нейтральному і відбудовному середовищах. Позитивний термоелектрод – сплав з 95% вольфраму і 5% ренію, негативний – сплав з 80% вольфраму і 20% ренію.

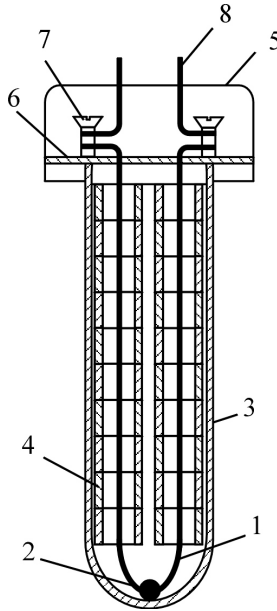


Рис. 2.10 – Будова термоелектричного термометра

Для зручності застосування термоелектричний термометр спеціальним чином армується. При цьому переслідуються наступні цілі: електрична ізоляція термоелектродів, захист термоелектродів від шкідливого впливу вимірюваного і навколишнього середовищ; захист термоелектродів і затисків виводів термоелектродів від забруднень і механічних ушкоджень; надання термоелектричному термометру необхідної механічної міцності; забезпечення зручності монтажу на технологічному устаткуванні та зручності підключення сполучних проводів. На рис. 2.10 показана будова термоелектричного термометра.

Термоелектроди 1 розташовані так, що їх спай 2 стосується захисного чохла 3. На термоелектроди одягнуті ізоляційні намиста 4. На кінці захисного чохла кріпиться головка термометра 5. У головці розташована колодка 6 із затискачами 7 для термоелектродів і сполучних проводів 8.

Робочий спай термоелектричного термометра найчастіше виготовляється шляхом зварювання, в окремих випадках застосовують пайку.

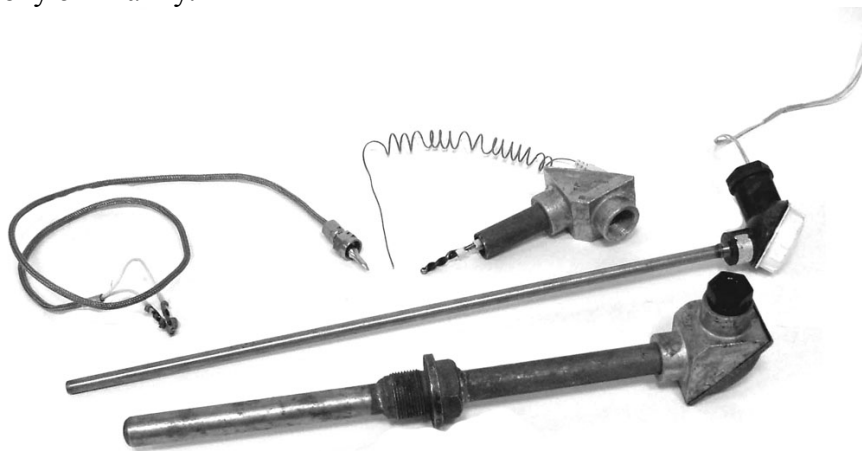


Рис. 2.11 – Зовнішній вигляд деяких термоелектричних термометрів

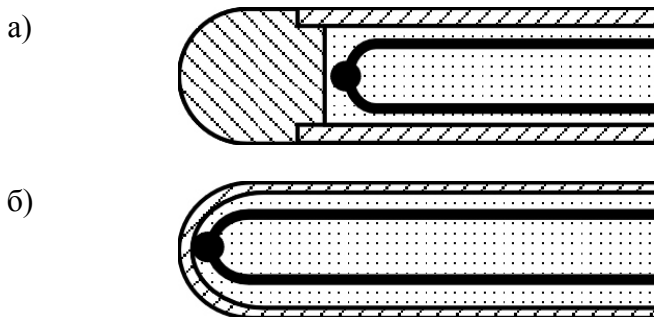


Рис. 2.12 – Будова термометрів кабельного типу:

а) з ізольованим спаєм, б – з неізольованим спаєм

Для захисту термоелектродів від впливу вимірюваного середовища їх поміщають у захисний чохол з газонепроникних матеріалів, що витримують необхідні високі температури і тиски середовища. Захисні чохла виготовляють найчастіше з різних марок сталі для температур до 1000 °С. За більш високих температур застосовуються спеціальні чохла з тугоплавких з'єднань. Ці чохла виготовляються з діборида цирконію з молібденом для виміру температури сталі, чавуну і відбудовного газового середовища до 2200 °С. Для виміру розплавленого скла й окисного газового середовища до 1700 °С застосовуються чохла з дісиліцида молібдену. Більшість конструкцій захисної арматури термоелектричних термометрів на даний час уніфіковані. Вони відрізняються в основному конструкцією захисних чохлів, розрахованих на різні тиски, і конструкцією штуцерів. Головка до захисних чохлів для багатьох модифікацій та сама.

Термометри опору і методи виміру опору. Принцип дії термометрів опору базується на здатності різних матеріалів (у першу чергу металів) змінювати свій електричний опір зі зміною температури. Параметр, що характеризує зміну електричного опору з температурою, називають температурним коефіцієнтом електричного опору. Для матеріалів, у яких температурний коефіцієнт не залежить від температури, він може бути визначений як

$$\alpha = (R_t - R_0) / (R_0 t),$$

де R_t і R_0 – опір за температури t і 0°C .

Для матеріалів, у яких температурний коефіцієнт залежить від температури, він може бути визначений тільки для кожного значення температури як

$$\alpha = (1 / R_0)(dR_t / dt).$$

Температурний коефіцієнт виражається в $^\circ\text{C}^{-1}$ чи K^{-1} . Для більшості чистих металів температурний коефіцієнт знаходиться

в межах 0,0035–0,0065 K⁻¹. У сплавів цей коефіцієнт істотно менше й у деяких випадках наближається до нуля (для манганіну складає 2 x 10⁻⁵ K⁻¹). Для напівпровідникових матеріалів температурний коефіцієнт негативний і на порядок більше, ніж у металів (0,01–0,15 K⁻¹).

Термометри опору з чистих металів, як правило, виготовляють шляхом спеціального намотування тонкого дроту на каркас з ізоляційного матеріалу. Для запобігання ушкодженням дріт разом з каркасом поміщають у захисну оболонку. На даний час застосовуються й інші конструкції термометрів опору.

Матеріали, застосовувані для виготовлення технічних термометрів опору, повинні відповідати тим же обов'язковим вимогам, що пред'являються до матеріалів, які йдуть на виготовлення термоелектричних термометрів. По-перше, це вимога стабільності градуовальної характеристики і, по-друге, вимога відтворюваності. Якщо не виконується хоча б одна з цих вимог, матеріал не може бути використаний для серійного виготовлення технічних термометрів. Всі інші вимоги: висока чутливість, лінійність градуовальної характеристики, великий питомий опір та ін. – є не обов'язковими, а бажаними. На сьогодні для виготовлення термометрів опору застосовуються наступні метали: мідь, платина і нікель. Мідь є дешевим матеріалом, що може бути високої чистоти. Вона може бути отримана у вигляді тонких дротів у різній ізоляції. Опір міді змінюється з температурою практично лінійно:

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t),$$

де R_t і R_0 – опір термометра за температури t і 0°C;

α – температурний коефіцієнт опору мідного дроту, $\alpha = 4,28 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

У зв'язку з окислюваністю міді вона використовується для виміру температур не вище 200 °C. До числа недоліків міді слід віднести малопитомий опір: $\rho = 0,17 \times 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Питомий опір впливає на габарити термометра опору: чим менше питомий

опір, тим більше потрібно дроту, щоб намотати такий же опір, тим більше габарити термометра.

Мідні термометри опору можуть застосовуватися для тривалого виміру температури від -200 до $+200$ °С. Вони випускаються II і III класів. Номінальні опори при 0°C складають 10, 50 і 100 Ом.

Межа основної похибки, що допускається, обирається з ряду 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 і 20 С. Для термометрів II класу він, як правило, складає 0,3 чи $0,5$ °С, а для III класу 1 чи 2°C .

На теперешній час випускаються нікелеві термометри опору на інтервал температур від -60 до $+180$ °С. Вони випускаються III класу. Номінальні опори при 0°C складають 50 і 100 Ом. Нікель володіє високим температурним коефіцієнтом, що сягає $\alpha = 6,75 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, і великим питомим опором $\rho = 1,28 \times 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, що дозволяє одержувати досить малогабаритні термометри з великим коефіцієнтом перетворення. Номінальне відношення R_{100}/R_0 для слабо легovanого нікелю встановлено $1,617 \pm 0,004$.

Чиста платина є одним з найбільш розповсюджених металів, застосовуваних для виготовлення термометрів опору. Платина відповідає обов'язковим вимогам, пропонованим до матеріалів для виготовлення термометрів опору. Платинові термоперетворювачі опору застосовуються для виміру температур від -260 до $+1100$ °С. Опір платини має складну нелінійну залежність від температури.

Платинові термометри опору можуть мати наступні опори при 0°C : 1, 5, 10, 50, 100 і 500 Ом. Цим термоперетворювачам опору привласнені наступні умовні позначки номінальної статичної характеристики перетворення: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П і 500П (термометри з опором $R_0 = 46$ Ом позначаються гр. 21). Одним з недоліків платини є її забруднення у відбудовному середовищі парами металів, окислами вуглецю та інших речовин. Особливо сильно це виявляється за високих температур.

Крім металів для виготовлення термометрів опору, застосовують також напівпровідникові матеріали: германій, окиси

міді, марганцю, кобальту, магнію, титана та їх суміші. Більшість напівпровідникових матеріалів має великий негативний температурний коефіцієнт опору і також дуже великий питомий опір. Тому можна виготовляти дуже малі за розмірами чутливі елементи термоперетворювачів опору, що мають значний коефіцієнт перетворення. Залежність опору напівпровідникового термоперетворювача (терморезистора) від температури може бути описана виразом:

$$R_t = R_0 \exp\left(B \frac{T_0 - T}{T_0 T}\right).$$

Значення R_0 визначається опором термометра за температури T_0 [як правило, $T_0=293$ К (20°C)], а значення B залежить від матеріалу напівпровідника, з якого виготовляється термометр. У зв'язку з тим, що технологія одержання напівпровідникових термоперетворювачів опору не дозволяє виготовляти їх з ідентичними характеристиками (вони не відповідають цілком вимозі відтворюваності), усі напівпровідникові термоперетворювачі опору мають індивідуальні градувальні характеристики. Особливо великого поширення одержали германієві терморезистори для виміру температур від 1,5 К і вище. Для інтервалу від 4,2 до 13,81 К вони застосовуються для відтворення температурної шкали. Германієві терморезистори, застосовувані для технічних вимірів, мають межу похибок, що допускаються, $\pm (0,05-0,1)$ К. Для виміру температур від -100 до $+300$ $^\circ\text{C}$ застосовуються окисні напівпровідникові матеріали. Коефіцієнти перетворення напівпровідникових терморезисторів можуть бути на кілька порядків вище, ніж у термометрів опору з чутливим елементом з металевого дроту. Однак необхідність індивідуального градування (або визначення значень A і B) істотно обмежує можливість широкого застосування напівпровідникових терморезисторів для виміру температури.

Напівпровідникові терморезистори знаходять широке застосування в системах температурної сигналізації. Це викликано тим, що вони мають здатність змінювати свій опір за досягнення певної температури стрибкоподібно в кілька разів, що викликає відповідне збільшення струму і спрацьовування системи сигналізації (релейний ефект).

Чутливий елемент металевого термометра опору складається, як правило, з дроту або стрічки, намотаної на каркас зі скла, кварцу, кераміки, слюди чи пластмаси. Від чутливого елемента йдуть виводи до затисків головки термометра, до яких приєднуються проводи, що йдуть потім до вимірювального приладу. Варіант пристрою термометра опору приведений на рис. 2.13. Чутливий елемент термометра опору виконується у вигляді спіралі з дроту, поміщеної в чотирьохканальний керамічний каркас. Для захисту від механічних ушкоджень і шкідливого впливу вимірюваного чи навколишнього середовища чутливий елемент поміщений у захисну оболонку, ущільнену керамічною втулкою. Виводи чутливого елемента проходять через ізоляційну керамічну трубу. Усе це знаходиться в захисному чохлі 1, установленому на об'єкті виміру за допомогою різьбового штуцера 3. На кінці захисного чохла розташовується сполучна головка термометра. У головці знаходиться ізоляційна колодка 2 із гвинтами для кріплення виводів термометра і підключення сполучних проводів. Головка закривається кришкою. Сполучні проводи виводяться через штуцер. Для зменшення впливу зовнішніх електричних і магнітних полів чутливі елементи термометрів опору роблять з безіндуктивним намотуванням.

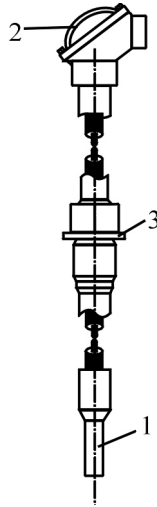


Рис. 2.13 – Будова термометра опору

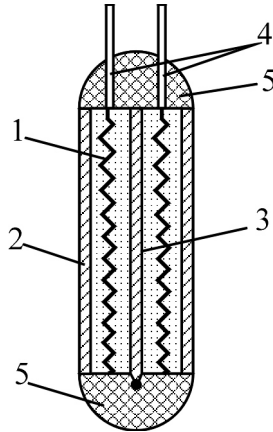


Рис. 2.14 – Чутливий елемент платинового термометра опору

Чутливий елемент мідного термометра опору складається з мідного ізолюваного дроту діаметром 0,1 мм, намотаного в кілька шарів на циліндричний каркас з пластмаси або металу. Шари дроту скріплюються між собою і каркасом лаком. До обох кінців дроту припаюються мідні виводи діаметром

1–1,5 мм. Чутливий елемент поміщають у захисну оболонку. Крім каркасних випускаються безкаркасні чутливі елементи мідних термометрів опору. Чутливий елемент виготовляється з ізолюваного дроту діаметром 0,08 мм безіндуктивним безкаркасним намотуванням. Окремі шари скріплені лаком, і потім весь чутливий елемент обернутий фторопластовою плівкою. Чутливий елемент поміщають у тонкостінну захисну металеву оболонку, яка засипається керамічним порошком і герметизується.

Чутливий елемент платинових термометрів складається з двох чи чотирьох платинових спіралей, розташованих у капілярних каналах керамічного каркаса 2 (рис. 2.14). Канали каркаса заповнюються керамічним порошком 3, що служить ізолятором і створює підпружування спіралей. До кінців спіралей припаяні виводи 4 із платинового або іридієво-родієвого дроту. Чутливий елемент у керамічному каркасі герметизується спеціальною глазур'ю 5. Така конструкція забезпечує гарну герметичність через малу газопроникність кераміки каркаса і глазури. Закріплення спіралі тільки у двох точках забезпечує незначну механічну напругу. Чутливі елементи виявляються внаслідок щільного засипання простору між спіралями і каркасом керамічним порошком досить міцними і вібростійкими. Вони можуть застосовуватися в інтервалі температур від -260 до $+1000^{\circ}\text{C}$. Спеціально для низькотемпературних вимірів розроблені конструкції мініатюрних платинових термометрів опору.

В експлуатації застосовуються чутливі елементи платинових термометрів опору зі слюдяним каркасом, на якому намотаний спеціальним чином неізолюваний платиновий дріт. У лабораторній практиці застосовуються платинові термометри опору з каркасом з кварцу або спеціального скла також з неізолюваним платиновим дротом. Труднощі покриття платини ізоляційними лаками та емалями не давали можливості одержувати платиновий дріт в ізоляції, що істотно утрудняло розробку малогабаритних і надійних платинових термометрів опору.

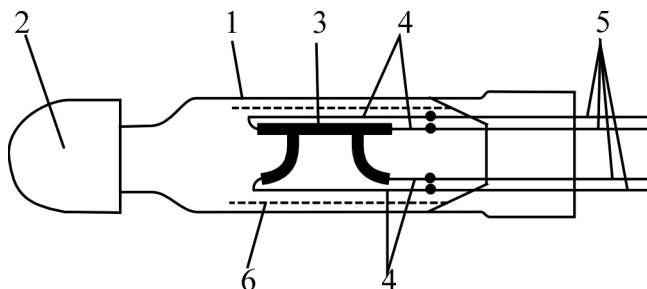


Рис. 2.15 – Чутливий елемент германієвого термометра опору

Германієві термометри опору для низькотемпературних вимірів являють собою мідну луджену гільзу (рис. 2.15), що заповнена газоподібним гелієм і закрита герметичною пробкою 2. Усередині гільзи знаходиться монокристал германія 3, легований сурмою. До кристала приварені чотири золотих провідники 4, до яких припаяні платинові виводи 5. Кристал ізольований плівкою 6. Такі термометри застосовуються для виміру температур від 1,5 до 50 К.

У лабораторній практиці іноді зустрічаються платинові термометри закордонного виробництва, які являють собою платиновий дріт або стрічку, запаяну у скло. Такі термометри можуть надійно працювати до 500–600 °С. За більш високих температур скло стає електропровідним і, крім того, температурні напруги можуть істотно спотворити результати виміру.

Пірометри. Усі розглянуті вище термометри для виміру температури (термометри розширення, термоелектричні й опору) передбачають безпосередній контакт між чутливим елементом термометра і вимірюваним тілом чи середовищем. Тому такі методи виміру температури іноді називаються контактними. Верхня межа застосування контактних методів обмежується значеннями 1800–2200 °С. Однак у ряді випадків у промисловості і при дослідженнях виникає необхідність вимірювати більш високі температури. Крім того, часто неприпустимий безпосередній контакт термометра з вимірюваним тілом чи середовищем. У цих випадках застосовуються безконтактні

засоби виміру температури, що вимірюють температуру тіла чи середовища за тепловим випромінюванням. Такі засоби виміру називаються пірометрами. Пірометри, що серійно випускаються, застосовуються для виміру температур від 20 до 6000 °С.

Безконтактні методи виміру теоретично не мають верхньої межі виміру і можливості їх використання визначаються відповідністю спектрів випромінювання вимірюваних тіл чи середовищ і спектральних характеристик пірометрів. Якщо для яких-небудь умов можуть бути використані і контактні, і безконтактні методи виміру, то, як правило, перевагу слід віддати контактним, тому що вони дозволяють забезпечити більш високу точність виміру.

Усі тіла випромінюють електромагнітні хвилі різної довжини λ чи частоти ν . Електромагнітне випромінювання, порушене тепловим рухом молекул, називають тепловим випромінюванням. Це випромінювання має місце за температур до 4000 °С як результат коливального або обертального руху молекул. За більш високих температур випромінювання викликається в основному процесами дисоціації та іонізації.

Якщо випромінювання якого-небудь тіла падає на інше, непрозоре для цього випромінювання тіло, то воно поглинається на поверхні і перетворюється на теплоту. Взагалі процеси поглинання і випромінювання взаємно оборотні. Промені, що падають ззовні на поверхню тіла, можуть цілком або частково відбиватися від поверхні, поглинатися тілом, проходити через тіло.

Існує велике число різних методів виміру температури тіл за випромінюванням, але для виміру високих температур у реальних технологічних процесах застосовуються наступні типи пірометрів: квазімонохроматичний, повного випромінювання і спектрального відношення. У ряді випадків у зв'язку з технічними труднощами реалізації методу повного випромінювання застосовуються пірометри часткового випромінювання.

Залежно від методу виміру, пірометри поділяються на квазімонохроматичні, спектрального відношення (чи спектрального розподілу), повного (чи часткового) випромінювання.

У назві пірометра може вказуватися тип приймача випромінювання, наприклад фотоелектричний (фотоелемент, фоторезистор, фотодіод тощо) чи термоелектричний (термобатарея). Іноді в назві пірометра вказується спосіб порівняння випромінювання об'єкта виміру з випромінюванням еталонного джерела, наприклад пірометр зі зникаючою ниткою або пірометр з оптичним клином.

Квазімонохроматичний пірометр зі зникаючою ниткою. На рис. 2.16 представлена принципова схема оптичного пірометра. Випромінювання від об'єкта виміру 1 проходить через об'єктив 2 і фокусується в площині 3. У цій же площині розташована нитка пірометричної лампи 4. Зображення об'єкта виміру і нитки пірометричної лампи може бути розглянуто спостерігачем 6 (пірометристом) через окуляр 5. Між ниткою пірометричної лампи й окуляром розташовується червоний світлофільтр 7. Між об'єктивом і ниткою пірометричної лампи може вводитися поглинаюче скло 8. Для зміни розжарення нитки застосовується реостат 9, який змінює струм, що проходить через нитку пірометричної лампи від джерела живлення 10. Значення струму вимірюється приладом 11, відградуйованим у значеннях яскравісної температури.

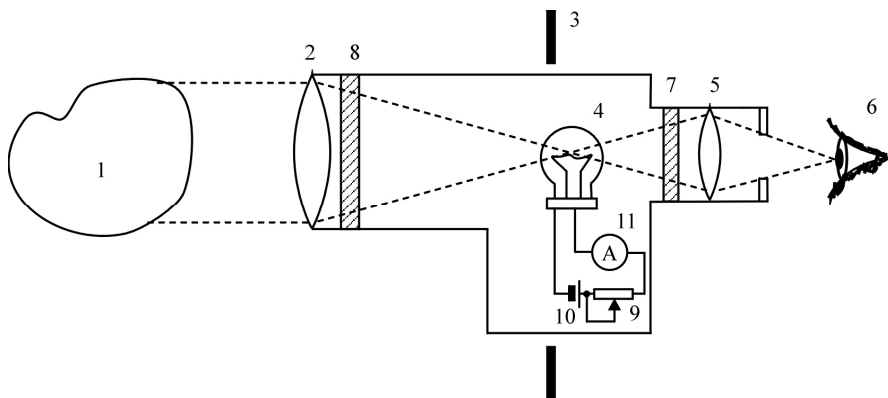
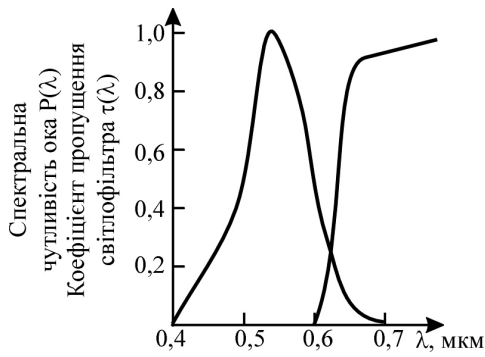


Рис. 2.16 – Принципова схема квазімонохроматичного пірометра

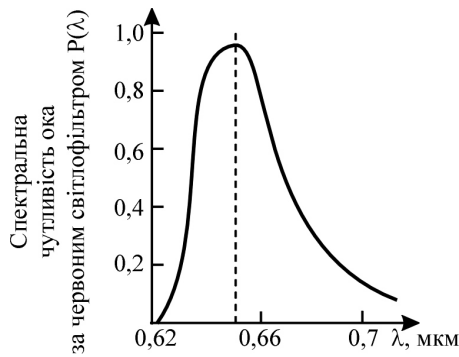
Перед початком вимірів проводиться настроювання оптичної системи (об'єktiv-окуляр) таким чином, щоб зображення об'єкта виміру і нитка пірометричної лампи знаходилися в одній площині. Це досягається переміщенням об'єктива. Крім того, необхідно, щоб нитка пірометричної лампи на зображенні об'єкта виміру була видна спостерігачу чітко, різко. Це досягається переміщенням окуляра.

Квазімонохроматичний пірометр передбачає вимір температури по спектральній енергетичній яскравості тіла, тобто по випромінюванню за певної довжини хвилі. Для монохроматизації (виділення певної довжини хвилі) випромінювання в пірометрі встановлюється червоний світлофільтр. На рис. 2.17, а представлені спектральні характеристики людського ока $P(\lambda)$ і червоного світлофільтра і показано, що через червоний світлофільтр людське око сприймає випромінювання у вузькій ділянці спектра з ефективною довжиною хвилі $\lambda_{\text{эф}} = 0,65$ мкм (рис. 2.17, б). Принципово в пірометрі може бути застосований будь-який світлофільтр (синій, зелений), який виділяє вузьку смугу довжин хвиль. Червоний світлофільтр зручний тим, що має різку границю пропущення поблизу краю видимого оком спектра. Крім того, якщо порівняти спектральні енергетичні яскравості в червоному і синьому світлі, то за температур 800 – 1000 К вони розрізняються на шість-сім порядків. Тому з червоним фільтром можна вимірювати більш низькі температури, а виходить, можна понизити нижню межу виміру пірометра.

Процес виміру зводиться до зміни розжарення нитки пірометричної лампи, а виходить, і її яскравості доти, поки око спостерігача не перестане розрізняти нитку пірометричної лампи на тлі об'єкта виміру: нитка «зникає» на тлі об'єкта виміру. У цей момент роблять відлік значення температури, тому що спектральна енергетична яскравість реального тіла (об'єкта виміру) і спектральна енергетична яскравість нитки пірометричної лампи рівні.



а)



б)

Рис. 2.17 – Спектральні характеристики:

а) людського ока $P(\lambda)$ і червоного світлофільтра $\tau(\lambda)$; б) випромінювання, сприйманого оком через червоний світлофільтр

Пірометр градується за випромінюванням абсолютно чорного тіла, тому можна вважати, що при «зникненні» нитки пірометричної лампи на тлі об'єкта виміру наступила рівність спектральної енергетичної яскравості реального тіла і спектральної енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла. Хоча сама нитка пірометричної лампи не є абсолютно чорним тілом, але в процесі градування випромінювання нитки за певних значень струму розжарення зіставлено з випромінюванням абсолютно чорного тіла за його відповідних температур. Тому відомо, що

при даному розжаренні нитки спектральна енергетична яскравість її випромінювання відповідає випромінюванню абсолютно чорного тіла за певної температури. Струм розжарення в пірометрі не може бути більше певного значення, яке відповідає яскравішій температурі близько 1500 °С. Для можливості виміру більш високих температур у пірометрі між об'єктивом і пірометричною лампою встановлюється поглинаюче скло 8. Це скло ослабляє випромінювання від об'єкта виміру. Ступінь ослаблення енергетичної яскравості об'єкта виміру визначається коефіцієнтом пропущення τ_λ поглинаючого скла. Звідси можна записати:

$$1/T' - 1/T = l/C_2 \ln \tau_\lambda = A,$$

де T' – температура за шкалою пірометра з поглинаючим склом, К;

T – температура за шкалою пірометра без поглинаючого скла, К;

A – пірометричний коефіцієнт ослаблення, K^{-1} .

Квазімонохроматичні пірометри випускаються з різними верхніми межами виміру до 5000 °С з використанням поглинаючих стекол з різними коефіцієнтами пропущення.

Розглянутий варіант квазімонохроматичного пірометра передбачає порівняння спектральних енергетичних яскравостей реального і чорного тіл (чи нитки пірометра, відградуваної по випромінюванню чорного тіла) людським оком.

На даний час існує велика група автоматичних пірометрів, які називаються фотоелектричними. У зв'язку з тим що псевдотемпература, показувана пірометром, визначається в першу чергу методом, а не засобом виміру, у ГОСТ 13417-76 немає засобів виміру за назвою «фотоелектричний пірометр», тому в назві будь-якого пірометра повинен обов'язково вказуватися метод виміру, наприклад квазімонохроматичний фотоелектричний пірометр чи фотоелектричний пірометр часткового випромінювання, чи фотоелектричний пірометр спектрального

відношення, де зазначено, за яким методом здійснюється вимір. У фотоелектричних пірметрах як світлочутливий елемент застосовуються фотоелементи, фотодіоди, фототранзистори і фотопомножувачі. Залежно від функції, виконуваної світлочутливим елементом, усі фотоелектричні пірметри можна розділити на дві групи: в одній фотоелемент порівнює світлові потоки від двох джерел випромінювання і працює в режимі нуль-приладу, а інший фотоелемент виробляє сигнал, який однозначно залежить від світлового потоку, а виходить, від температури вимірюваного тіла. У першому випадку будова приладу виявляється більш складною, але зате його показання не залежать від характеристик фотоелемента й електронної схеми та їх зміни в часі. В другому випадку будова приладу простіше, але його показання можуть істотно мінятися в процесі експлуатації.

Розглянемо принципову схему квазімонохроматичного фотоелектричного пірметра типу ФЕП-4 (рис. 2.18).

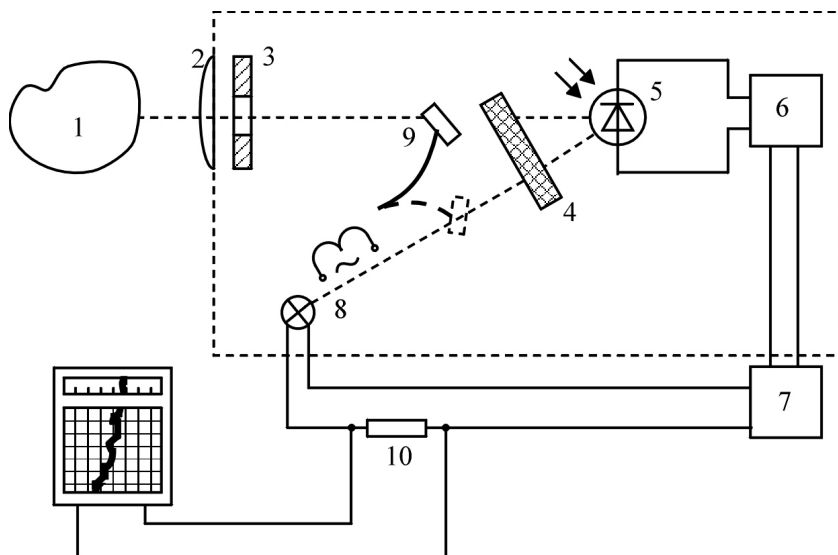


Рис. 2.18 – Принципова схема квазімонохроматичного фотоелектричного пірметра

Відмінною рисою цього пірометра є те, що спектральні характеристики фотоелемента і червоного світлофільтра дозволяють одержати ефективну довжину хвилі (за якої пірометр сприймає випромінювання), близьку чи практично рівну ефективній довжині хвилі квазімонохроматичного пірометра зі зникаючою ниткою (рис. 2.16). Тому яскравісна температура, відлічена за ФЕП, і яскравісна температура, визначена за пірометром зі зникаючою ниткою, будуть близькі або для пірометра з нижньою межею виміру 800 °С практично рівні.

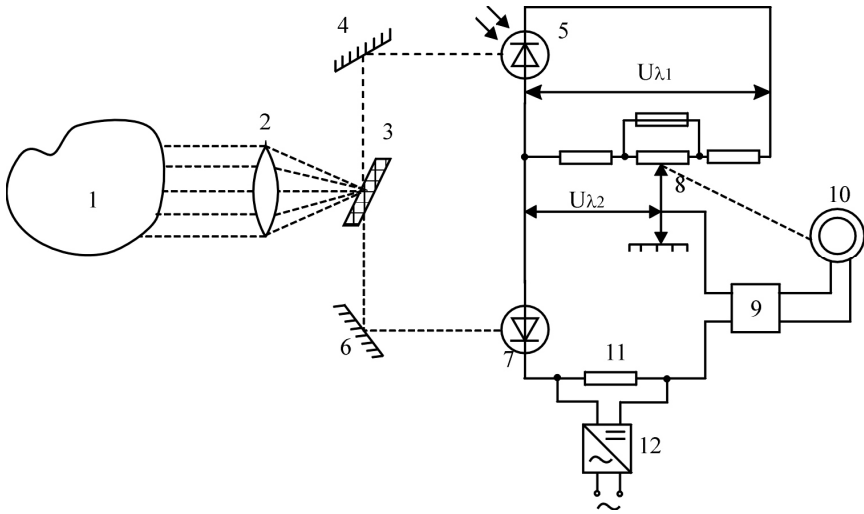


Рис. 2.19 – Принципова схема пірометра спектрального відношення

Випромінювання вимірюваного тіла 1 через об'єктив 2 і діафрагму 3 направляється через червоний світлофільтр 4 на фотоелемент 5. На цей же фотоелемент надходить випромінювання від випромінювача порівняння 8. Фотострум, що виникає у фотоелементі, підсилюється в підсилювачі 6 і надходить на силовий блок 7, який змінює струм живлення випромінювача порівняння (лампи зворотного зв'язку) 8.

Світлові потоки від вимірюваного тіла і випромінювача порівняння надходять на фотоелемент не одночасно, а по черзі.

Для цього у схемі передбачений електромагнітний вібратор 9 із заслінкою, що відкриває світловий потік то від вимірюваного тіла, то від випромінювача порівняння. Якщо світлові потоки від вимірюваного тіла і випромінювачі порівняння не рівні, то й імпульси фотострумів у відповідні моменти часу будуть також не рівні. У цьому випадку підсилювач 6 і блок 7 будуть змінювати струм живлення випромінювача 8 доти, поки фотоструми у фотоелементі в обидва напівперіоди не будуть рівні. За рівності фотострумів в обидва напівперіоди зміни струму живлення випромінювача не відбувається. Таким чином, струм живлення випромінювача порівняння однозначно визначається світловим потоком від вимірюваного тіла, що у свою чергу залежить від температури вимірюваного тіла. Струм живлення випромінювача порівняння вимірюється автоматичним потенціометром за спаданням напруги на зразковому резисторі 10.

Пірометри ФЕП градууються за випромінюванням абсолютно чорного тіла, тому температура, відлічена на автоматичному потенціометрі, при вимірі реальних тіл буде яскравішою температурою цього реального тіла. Перехід до дійсної температури може бути здійснений за виразом:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_u} = \left[\ln(\epsilon_{\lambda T} / \epsilon_{\lambda 2T}) \right] / \left[C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right];$$

слід мати на увазі, що в пірометрах з діапазоном виміру 800–4000 °С ефективна довжина хвилі 0,65 мкм та їх показання порівняні з показаннями візуальних квазімонохроматичних пірометрів. У пірометрах ФЕП з нижньою межею виміру нижче 800 °С ефективна довжина хвилі лежить в інтервалі 0,9–1,1 мкм, тому їх показання трохи відрізняються від показань візуальних пірометрів.

Пірометри типу ФЕП широко застосовуються для безупинного виміру температури в прокатному виробництві. Час установлення показань приладу складає близько 1 с, основна похибка 1% за верхньої межі виміру до 2000°С або 1,5% за

верхньої межі більше 2000 °С. Переважна більшість закордонних фотоелектричних пірометрів працюють як пірометри часткового випромінювання з робочим діапазоном довжин хвиль шириною від 0,2 до 2 мкм.

Пірометри спектрального відношення для промислових вимірів температури, як правило, випускаються автоматичними. Тому їх вірніше називати фотоелектричними пірометрами спектрального відношення. Залежно від спектральних характеристик фотоелементів, вони сприймають випромінювання у видимій чи в інфрачервоній області спектра. Існує велике число різних за принципом побудови схем пірометрів спектрального відношення, кожна з яких має свої позитивні і негативні властивості. Розглянемо одну зі схем фотоелектричного пірометра спектрального відношення (рис. 2.20). Випромінювання від вимірюваного тіла 1 надходить в об'єктив 2 пірометра і потім на фільтр із фосфіду індію 3, на якому світловий потік частково відбивається і через дзеркало 4 направляється на кремнієвий фотоелемент 5, на якому під впливом світла виникає фото-ЕРС U_{λ_1} . Інша частина світлового потоку частково пропускається фільтром 3 і через дзеркало 6 направляється на фотоелемент 7, на якому виникає фото-ЕРС U_{λ_2} . Ефективна довжина хвилі відбитого фільтром 3 випромінювання $\lambda_1 = 0,888$ мкм, а довжина хвилі випромінювання, що пройшло через фільтр 3, $\lambda_2 = 1,034$ мкм. Вихідна напруга U_{λ} фотоелемента 7 врівноважується частиною вихідної напруги фотоелемента 5 на реохорді 8 компенсатора напруг. Положення движка реохорда 8 пропорційно відношенню $U_{\lambda_2} / U_{\lambda_1}$, тобто пропорційно відношенню спектральних енергетичних яскравостей $B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}} / B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}}$ яке визначається колірною температурою $T_{\text{ц}}$ вимірюваного тіла. Якщо U_{λ_2} не урівноважено на реохорді 8, то на вхід підсилювача 9 буде надходити сигнал, що буде обертати реверсивний двигун 10, який переміщає движок реохорда 8 до настання зрівноважування. У ланцюг фотоелемента 7 додатково подається опорна напруга до резистора 11 від стабілізатора напруги 12.

Колірні пірометри випускаються на межу виміру від 200 до 2800°C з піддіапазонами по 200–800 °С. Межа основної похибки колірних пірометрів не перевищує 1 % верхньої межі виміру кожного піддіапазону.

На даний час одержав поширення так званий *пірометр істинної температури ПІТ-1*, який являє собою пірометр спектрального відношення, що здійснює автоматичне введення виправлень, які обчислюються на основі інформації, що зберігається в пам'яті приладу. Пірометр розрахований на діапазон виміру 800–2000 °С. Похибка виміру істинної температури внаслідок зміни коефіцієнта теплового випромінювання вимірюваного тіла від 0,3 до 1 не перевищує ± 1 %.

Пірометри повного випромінювання є найбільш простими за будовою. Комплект пірометра складається з первинного перетворювача (телескопа) і вторинного приладу. Як чутливий елемент, що сприймає випромінювання, застосовуються найчастіше термобатарей з декількох термоелектричних термометрів або спеціальних термозалежних резисторів – болометрів. Для концентрації випромінювання на спаях термобатарей чи на чутливому елементі болометра застосовують рефракторні (з лінзою, що збирає) чи рефлекторні (з увігнутим дзеркалом) оптичні системи. Для того, щоб одержати однозначну залежність термо-ЕРС термобатарей (чи опору болометра) від потоку випромінювання, необхідно підтримувати вільні кінці термобатарей (чи корпус болометра) за постійної температури.

Принципова схема рефракторного пірометра з термобатарейою наведена на рис. 2.20, а, а рефлекторного пірометра – на рис. 2.20, б. Випромінювання від вимірюваного тіла 1 надходить на об'єктив (лінзу) телескопа 2 (рис. 2.20, а) і через діафрагму 3 фокусується на гарячих спаях термобатарей 4, укладеної в спеціальну колбу. Паралельно до термобатарей включений мідний резистор 5, призначений для автоматичної компенсації зміни температури корпусу пірометра, за якої знаходяться вільні кінці термобатарей. Термо-ЕРС надходить на вимірювальний прилад 9. Для візування телескопа на об'єкт виміру служать окуляр 6 і діафрагма 7, через які спостерігач 8 здійснює візування.

Розділ 2. Датчики первинної інформації про стан технологічних параметрів	57
2.1 Способи та пристрої для виміру температури	58
2.1.1 Історія розвитку термометрії.....	58
2.1.2 Засоби виміру температури	70