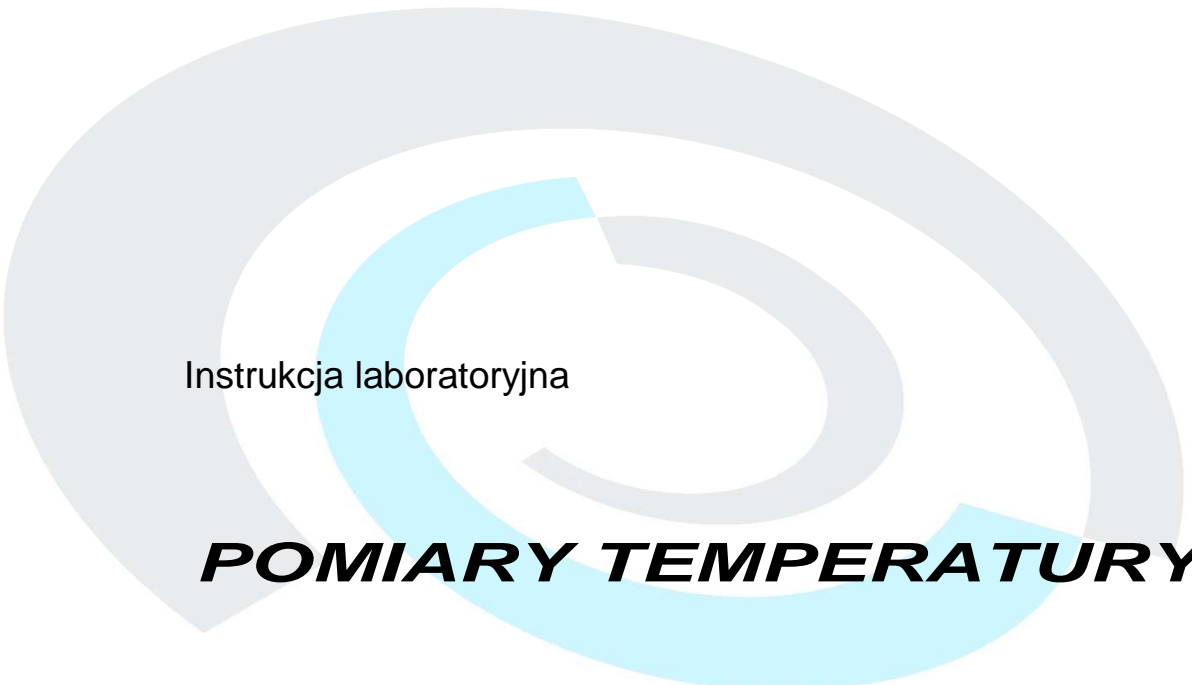


Politechnika Lubelska

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów

i Napędów Lotniczych



Instrukcja laboratoryjna

POMIARY TEMPERATURY

Pomiary temperatury

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami pomiarów temperatury za pomocą różnych termometrów oraz sposobami sprawdzania przyrządów mierzących temperaturę.

II. Podstawy teoretyczne

1. Temperatura, jednostki i skala termometryczna

Temperaturę określa się jako miarę stopnia nagrzania ciał lub miarę średniej energii kinetycznej cząsteczek substancji. Zależność między średnią energią kinetyczną drobin ciała a temperaturą można przedstawić w postaci ogólnego równania:

$$\frac{I \cdot \omega^2}{2} + \frac{m \cdot v^2}{2} + B \cdot T \quad (1)$$

gdzie:

- | | |
|------------------------------|--|
| $\frac{I \cdot \omega^2}{2}$ | - średnia energia kinetyczna ruchu obrotowego drobin, |
| $\frac{m \cdot v^2}{2}$ | - średnia energia kinetyczna ruchu postępowego drobin, |
| B | - współczynnik proporcjonalności, |
| T | - temperatura bezwzględna. |

Średnia energia kinetyczna ruchu obrotowego drobin jest funkcją średniej energii kinetycznej ruchu postępowego tych drobin. Zgodnie z zasadą równego podziału energii na wszystkie stopnie swobody ruchu cząsteczki, stosunek tych obu energii jest wielkością stałą dla określonych cząsteczek:

$$\frac{\frac{I \cdot \omega^2}{2}}{\frac{m \cdot v^2}{2}} = const.$$

Ze względu na to wartość średniej energii kinetycznej ruchu obrotowego $\frac{I \cdot \omega^2}{2}$ można włączyć do stałej (oczywiście nie będzie to już uniwersalna stała gazowa). Po tych przekształceniach równanie (1) można zapisać w postaci:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = BT \quad (2)$$

Ze względu na to, że nie można łatwo zmierzyć średniej energii kinetycznej drobin, pomiarów temperatury dokonuje się pośrednio, wykorzystując jej zależność od mierzalnych wielkości fizycznych (np. długość, objętość, gęstość, właściwości sprężyste, elektryczne, magnetyczne).

Przyporządkowanie określonych wartości liczbowych pewnym temperaturom stanowi podstawę do określenia skali temperatur.

Najbardziej rozpowszechniona jest skala Celsjusza, która przyjmuje, że przy ciśnieniu 1013,25 hPa ($101325 \frac{N}{m^2}$) temperatura topnienia lodu wynosi 0° , a wrzącej wody 100° . Jednostką temperatury według tej skali jest $1^\circ C$.

Przy założeniu, że temperatura topniejącego lodu wynosi 32° , a wrzącej wody 212° , otrzymuje się skalę Fahrenheita, w której jednostką jest $1^\circ F$. Zależność między tymi skalami wyraża się wzorem:

$$t_c = \frac{5}{9}(t_F - 32) \quad (3)$$

gdzie:

- t_c - temperatura wyrażona w skali Celsjusza,
- t_F - temperatura wyrażona w skali Fahrenheita.

Ze względu na mnogość skal empirycznych i ich niejednoznaczność wprowadzono skalę niezależną od właściwości poszczególnych substancji termometrycznych. Została ona oparta o II zasadę termodynamiki i nosi nazwę termodynamicznej lub bezwzględnej skali temperatur. Przy jej opracowywaniu wykorzystano sprawność odwracalnego obiegu Carnota, w którym dwie zmiany stanu przebiegające izotermicznie przy temperaturach T_1 i T_2 ($T_2 > T_1$) są połączone dwoma przemianami adiabatycznymi. Przy temperaturze T_2 zostaje pobrana pewna ilość ciepła Q_2 , którego część zostaje przekształcona w pracę zewnętrzną A . Zgodnie z II zasadą termodynamiki ilość wykonywanej pracy A , będącej częścią pobranego ciepła, zależy jedynie od temperatur T_1 i T_2 . Jeżeli przyporządkujemy pewną, dowolnie określoną wartość temperaturze T_2 , to temperaturę T_1 możemy wyznaczyć z zależności:

$$T_1 = T_2 \left(1 - \frac{A}{Q_2}\right) \quad (4)$$

lub inaczej:

$$T_1 = T_2(1 - \eta) \quad (5)$$

gdzie:

- η - sprawność obiegu Carnota.

Termodynamiczna skala temperatury opierać się może bądź na określonej różnicy temperatur między dwoma stałymi punktami termometrycznymi, bądź na określonej wartości temperatury jednego punktu termometrycznego. Do roku 1954 skala termodynamiczna oparta była na założeniu, że różnica temperatur wrzenia wody i topnienia lodu w warunkach normalnych wynosi 100°, zaś w 1954 r. przyjęto stare propozycje Kelvina i skalę termodynamiczną określono przyjmując za podstawą jeden punkt termometryczny. Punktem tym jest punkt potrójny wody, dla którego przyjęto wartość 273,16 K, przy czym jeden stopień skali termodynamicznej zdefiniowano jako równy - różnicy temperatur między punktem potrójnym wody, a zerem absolutnym [2].

W roku 1967 XIII *Generalna Konferencja Miar i Wag* przyjęła nową definicję i oznaczenia jednostki skali termodynamicznej. Jednostce tej nadano nazwę Kelwin, oznaczenie K i określono ją jako $\frac{1}{273,16}$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody. [2] Jest to podstawowa jednostka temperatury w układzie legalnych jednostek miar SI.

Skala Kelvina powiązana jest ze skalą Celsjusza zależnością:

$$T_K = t_c + 273,15 \quad (6)$$

gdzie:

- T_K - temperatura bezwzględna wyrażona w skali Kelvina,
- t_c - temperatura wyrażona w skali Celsjusza.

Skalę temperatur opartą o określone własności termometryczne ciał nazywają się skalami empirycznymi. Temperatura empiryczna określona jest za pomocą, międzynarodowej praktycznej skali temperatury. Obecnie obowiązująca (od 1968 r.) międzynarodowa praktyczna skala temperatury za temperaturę podstawową przyjmuje temperaturę termodynamiczną o symbolu T , której jednostką jest Kelwin (symbol K). Temperatura Celsjusza (t) zdefiniowana jest wzorem $t = T - T_0$, gdzie $T_0 = 273,15$ K. Jednostką temperatury Celsjusza jest stopień Celsjusza (°C) równy kelwinowi. Różnica temperatury może być wyrażona w kelwinach lub stopniach Celsjusza [2].

Międzynarodowa praktyczna skala temperatury została tak zdefiniowana, aby temperatura mierzona w tej skali była najlepszym przybliżeniem temperatury termodynamicznej pozostającym w granicach aktualnie osiąganey dokładności pomiaru.

Międzynarodowa praktyczna skala temperatury opiera się na wartościach temperatury przypisanych pewnej liczbie tzw. punktów stałych odpowiadających temperaturze punktów potrójnych (stanów równowagi trzech stanów skupienia) wodoru, tlenu i wody, temperaturze krzepnięcia cynku, srebra i złota oraz temperaturze wrzenia wodoru, neonu, tlenu i wody przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym $p_n = 101325$ Pa (z wyjątkiem ciśnienia $p_0 = 33330,6$ Pa

dla temperatury 17,042 K wrzenia wodoru).

W tablicy 1 zestawiono punkty stałe międzynarodowej praktycznej skali temperatury 1968 r.

Tablica 1

Definicyjne punkty stałe

Punkt	Temperatura	
	K	°C
Potrójny wodoru	13,81	-259,34
Równowagi fazy ciekłej i pary wodoru-przy ciśnieniu 33330,6 Pa	17,042	-256,108
Wrzenia wodoru	20,28	-252,87
Wrzenia neonu	27,102	-246,048
Potrójny tlenu	54,361	-218,789
Wrzenia tlenu	90,188	-182,962
Potrójny wody	273,16	0,01
Wrzenia wody	373,15	100
Krzepnięcia cynku	692,73	419,58
Krzepnięcia srebra	1235,08	961,93
Krzepnięcia złota	1337,00	1064,43

Poza punktami potrójnymi oraz punktem 17,042 K podane wartości temperatury odpowiadają ciśnieniu jednej atmosfery fizycznej (101 325 Pa).

Do wyznaczania pośrednich temperatur międzynarodowej skali praktycznej między punktami stałymi stosuje się wtórne punkty stałe oraz odpowiednie przyrządy wzorcowe.

Międzynarodowa praktyczna skala temperatury wykazuje różnice w stosunku do skali termodynamicznej, jednak w zakresie temperatur od -50 do 1000°C nie przekraczają one 1 K.

2. Przyrządy pomiarowe

2.1 Podział przyrządów do pomiaru temperatury

Ze względu na to, że bezpośredni pomiar temperatury badanego ciała jest na ogół niedogodny, najczęściej mierzy się bezpośrednio temperaturę odpowiedniego czujnika temperatury stykającego się z badanym ciałem. W zależności od rodzaju wymiany ciepła między ciałem, którego temperaturę mierzymy a czujnikiem temperatury, można podzielić metody pomiaru temperatury na stykowe i bezstykowe. Wymiana ciepła między czujnikiem temperatury a ciałem może przebiegać na drodze przewodzenia, przejmowania przez konwekcję oraz promieniowania. W metodach stykowych pomiaru temperatury czujnik termometru styka się z ciałem, którego temperaturę się mierzy. W metodach bezstykowych wymiana ciepła między powierzchnią ciała, którego temperaturę mierzymy a czujnikiem odbywa się przez promieniowanie lub sygnały z czujnika temperatury przekazywane są bezstykowo do przyrządu pomiarowego.

Istotne różnice występują między metodami pomiarów temperatury ustalonej i nieustalonej. Pomiar stykowy temperatury ustalonej polega na samorzutnym wyrównywaniu się temperatury dwóch stykających się ze sobą ciał. Aby po zetknięciu czujnika temperatury z badanym ciałem nie nastąpiło istotne obniżenie temperatury ciała, pojemność cieplna czujnika temperatury musi być znacznie mniejsza od pojemności cieplnej ciała, którego temperaturę mierzymy. Szczególnie małą pojemność cieplną muszą posiadać czujniki wykorzystywane do pomiaru temperatur nieustalonych, bowiem im większa pojemność cieplna czujnika, tym większe opóźnienie czasowe temperatury czujnika w stosunku do temperatury ciała mierzonego [4]

W stykowych metodach pomiaru temperatury wykorzystuje się termometry nieelektryczne, elektryczne i wskaźniki temperatury. Zasada działania termometrów nieelektrycznych oparta jest na:

- rozszerzalności ciał stałych, cieczy, gazów pod wpływem zmiany temperatury przy stałym ciśnieniu,
- zmianie ciśnienia cieczy, pary lub gazu pod wpływem zmiany temperatury przy stałej objętości.

Termometry elektryczne mają czujniki:

- termoelektryczne,
- rezystancyjne (metalowe lub półprzewodnikowe).

Działanie stykowych wskaźników temperatury oparte jest na: zmianie kształtu różnych próbek w pobliżu temperatury topnienia (stożki Segera)

- różnicach temperatury topnienia próbek (kołki topnikowe, wskaźniki topnikowe),

- zmiana twardości próbek w zależności od temperatury (kołki hartowane),
- zmiana barwy termoczułego pokrycia ciała pod wpływem temperatury (kredki i farby termometryczne, ciekłe kryształy),
- zmianie luminescencji pokrycia ciała pod wpływem temperatury [4].

Wśród termometrów bezstykowych (pirometrów) podział wynika z cech konstrukcyjnych i zasady działania pirometrów. Poza klasyfikacją znajduje się szereg specjalnych metod pomiaru temperatury np. metody fotograficzne (termografia), interferencyjne, spektroskopowe, akustyczne, termowizyjne itd. W tym opracowaniu umieszczono je wraz ze wskaźnikami temperatury w rubryce „termometry specjalne”. Klasyfikację przyrządów do pomiaru temperatury ze względu na właściwości fizyczne wykorzystane przy ich budowie przedstawia rysunek 1.

2.2. Termometry stykowe

2.2.1. Termometry nieelektryczne

2.2.1.1. Termometry rozszerzalnościowe

Są to termometry wykorzystujące zmianę objętości gazów, cieczy lub ciał stałych w zależności od temperatury.

Najbardziej znanym termometrem rozszerzalnościowym jest termometr cieczowy, wykorzystujący zmianę objętości cieczy termometrycznej wraz ze zmianą temperatury. Składa się on ze zbiorniczka wypełnionego cieczą (czujnik temperatury) oraz połączonej z nim rurki kapilarnej, w której zmiana wysokości słupka cieczy jest funkcją temperatury czujnika. Rurka kapilarna umieszczana jest na tle skali termometrycznej. W zależności od konstrukcji, laboratoryjne i przemysłowe termometry cieczowe dzielą się na termometry pałeczkowe (bagietkowe) i rurkowe. Termometry pałeczkowe wykonane są ze szklanego pręta o średnicy 4 – 6 mm z osiowo umieszczonym kanałem kapilary. Skala jest wytrawiona na powierzchni pręta, a jego krzywizna powiększa obraz kapilary działając jak soczewka i ułatwiając odczyt.

W termometrach rurkowych cienkościenna kapilara wraz ze skalą wykonaną na pasku z młecznego szkła, są umieszczone w cienkościennej rurce szklanej. Podobnie jak w termometrach pałeczkowych krzywizna powierzchni kapilary służy do powiększenia obrazu słupka cieczy. Koniec kapilary jest poszerzony w mały zbiorniczek, którego zadaniem jest zabezpieczenie termometru przed rozsądzeniem w przypadku przekroczenia górnej granicy zakresu pomiarowego. Zaletą termometrów rurkowych jest ich duża odporność na złamania, wadą zaś – możliwość przesunięcia się skali względem kapilary. Budowa termometrów pałeczkowych zapewnia stałość położenia skali, są, one jednak mniej trwałe.

Ciecze stosowane w termometrach rozszerzalnościowych powinny posiadać następujące własności:

- stałość w czasie własności fizycznych i chemicznych,
- stałość cieplnego współczynnika rozszerzalności objętościowej w funkcji temperatury,
- niska temperatura krzepnięcia,
- wysoka temperatura wrzenia.

Najczęściej jako cieczy termometrycznej używa się rtęci, a także pentanu, alkoholu i toluolu. Zakres stosowania termometrów rtęciowych, ograniczony temperaturą wrzenia i krzepnięcia rtęci, można rozszerzyć, jeżeli przestrzeń w kapilarze nad rtęcią wypełnia się gazem o określonym ciśnieniu. Zastosowanie gazu pod ciśnieniem 7 MPa pozwala rozszerzyć zakres pomiarowy do 800°C. [3]

Termometry cieczowe o wypełnieniu innym niż rtęć są mniej dokładne. Wadą ich jest własność zwilżalności ścianki kapilary, co utrudnia odczyt oraz pozostawanie cieczy na ściance kapilary ponad słupkiem w przypadku szybkich zmian temperatury czujnika (powstaje wtedy dodatkowy błąd pomiaru od ubytku cieczy). Ciecze te wymagają także barwienia. Ze względu na gorsze własności cieplne, termometry takie wykazują większą bezwładność wskazań niż termometry rtęciowe [3].

Termometry rtęciowe w zależności od przeznaczenia mogą mieć różne rozwiązania konstrukcyjne.

Do dokładnego pomiaru różnic temperatur, przy różnych temperaturach odniesienia, służy termometr Beckmanna. Maksymalny zakres pomiarowy jest zależny od ustawionej na podziałce termometru temperatury początkowej, którą można zmieniać dowolnie poprzez zmianę napełnienia czujnika termometru cieczą zawartą w odpowiednio zbudowanym górnym zbiorniku zamykającym kapilarę pomiarową. Zbiornik górny ma orientacyjną skalę temperatury odniesienia. Typowy termometr Beckmanna ma czułość 0,01 K, maksymalną różnicę temperatur 5 K w zakresie od -10 do +50°C.

W meteorologii i medycynie znalazły zastosowanie termometry maksymalne i minimalne. W termometrze maksymalnym, nad rtęcią w kapilarze znajduje się pręt ze stali magnetycznej, który po osiągnięciu maksymalnej temperatury czujnika termometru zatrzymuje się w kapilarze, dając możliwość odczytania temperatury maksymalnej. W innym rozwiązaniu takiego termometru, dolna część kapilary ma przewężenie tak ustalone, że w wyniku obniżenia temperatury czujnika następuje przerwanie słupka cieczy, w wyniku czego poziom cieczy w kapilarze nie ulega zmianie przy obniżeniu temperatury. Na takiej zasadzie działa np. termometr lekarski. [3]

Termometry minimalne są to termometry alkoholowe, zbudowane tak, że w cieczy wypełniającej kapilarę znajduje się podłużnie uźebrowany pręt szklany, poruszający

się z pewnym tarciem, który przy opadaniu cieczy pociągany jest w kierunku niższych temperatur i pozostaje w miejscu odpowiadającym najniższej temperaturze. Wewnątrz pręta szklanego znajduje się drut stalowy, który umożliwia jego ustawienie pod meniskiem za pomocą magnesu. Normalnym położeniem dla takiego termometru jest położenie poziome.

Dokładne termometry przeznaczone do pomiarów laboratoryjnych muszą być wzorcowane (sprawdzone) w punktach stałych przez wzorzec temperatur stałych, zaś w punktach pośrednich - przez porównanie z termometrem wzorcowym z czujnikiem rezystorowym platynowym. Błędy łączne podaje się w postaci odchyłek w tzw. metryce wzorcowania [3]. Przy dokładnych pomiarach temperatury termometrami cieczowymi (głównie rtęciowymi) należy uwzględnić szereg błędów pomiarowych. Do najważniejszych należą:

- błąd spowodowany niejednakową średnicą kapilary na całej jej długości, błąd wynikający z niewłaściwego oznaczenia punktów stałych,
- błąd spowodowany zmianą położenia punktu zerowego wywołowany termiczną histerezą szkła,
- błąd powstały wskutek cieplnej bezwładności termometru,
- błąd wynikający z różnicy temperatury między cieczą znajdującą się w czujniku i w kapilarze termometru.

Pierwsze dwa błędy można skorygować poprzez wzorcowanie termometrów, natomiast aby wykluczyć pozostałe, należy wprowadzić odpowiednie poprawki. Poprawkę uwzględniającą różnicę między temperaturą mierzoną a średnią temperaturą cieczy w kapilarze oblicza się według wzoru:

$$\Delta t = \beta * h * (t_w - t_s) \text{ [K]} \quad (7)$$

gdzie:

- | | |
|---------|---|
| β | - średni pozorny cieplny współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy w szkłe termometru [K^{-1}], |
| h | - wysokość wystającego słupka cieczy termometrycznej mierzona w stopniach skali termometru, |
| t_w | - temperatura wskazywana [$^{\circ}C$], |
| t_s | - średnia temperatura wystającej części słupka cieczy termometrycznej [$^{\circ}C$]. |

Rzeczywistą wartość temperatury oblicza się według wzoru:

$$t_r = t_w \pm \Delta t \text{ [}^{\circ}C\text{]} \quad (8)$$

gdzie:

- | | |
|------------|---|
| t_w | - temperatura wskazywana przez termometr [$^{\circ}C$], |
| Δt | - poprawka [K]. |

Do grupy termometrów rozszerzalnościowych należą także termometry wykorzystujące zjawisko rozszerzalności liniowej ciał stałych. Czujnikiem temperatury jest w tego typu termometrach ciało stałe, charakteryzujące się dużym cieplnym współczynnikiem rozszerzalności liniowej (objętościowej).

Przykładem takiego termometru jest termometr dylatacyjny. Wykorzystuje on różnicę cieplnej rozszerzalności liniowej dwóch różnych materiałów. Czujniki termometrów dylatacyjnych są wykonane najczęściej w postaci rury z materiału o dużym współczynniku rozszerzalności liniowej (materiał czynny) z umieszczonym w niej osiowo prętem wykonanym z materiału o małym współczynniku rozszerzalności liniowej (materiał bierny) [2]. Układ pomiarowy jest połączony z wolnym końcem pręta, którego przemieszczenia są zależne od temperatury. Pary materiałów stosowanych w konstrukcji termometrów dylatacyjnych powinny charakteryzować się możliwie dużą różnicą cieplnych współczynników rozszerzalności liniowej, możliwie wysoką dopuszczalną temperaturą pracy oraz dużą odpornością na korozję i utlenianie [2]. Termometry dylatacyjne są rzadko stosowane, gdyż nie są zbyt dokładne (rzędu 1 - 2%). Maksymalne temperatury pomiaru dochodzą do 1 000°C.

Różnicę wartości cieplnych współczynników rozszerzalności liniowej dwóch metali, wykorzystano przy pomiarze temperatury za pomocą, termometru bimetalowego. Bimetal jest to zestaw dwóch metali sztywno ze sobą połączonych, wykonywany najczęściej w postaci taśmy. Podczas zmiany temperatury następuje ugięcie bimetalu w jedną lub w drugą stronę, ze względu na różne wartości współczynników rozszerzalności liniowej obu metali.

Czujniki bimetalowe najczęściej wykonuje się jako taśmy płaskie, spirale i sprężyny śrubowe. Są one połączone z układem pomiarowym wolnym końcem, drugi koniec umocowany jest sztywno w obudowie termometru. Zakres wskazań termometrów bimetalowych dochodzi do 400°C, zaś dokładność wynosi przeciętnie od 1 do 2% (przy niższych temperaturach od -0,5% do $\pm 1,5\%$). Termometry tego typu są często stosowane zamiast technicznych termometrów cieczowych szklanych, w porównaniu z którymi są trwalsze, mniej podatne na uszkodzenia lecz nieco droższe.

2.2.1.2 Termometry manometryczne

Zasada działania tych termometrów polega na wykorzystaniu zjawiska zmiany ciśnienia ze zmianą temperatury ciała termometrycznego, którym jest zwykle ciecz lub układ para-ciecz. Ze względu na rodzaj ciała termometrycznego, termometry ciśnieniowe mogą być parowe i gazowe. Zasada działania termometrów manometrycznych cieczowych polega na wykorzystaniu zmiany objętości cieczy termometrycznej wraz z temperaturą przy czym całe wnętrze układu pomiarowego jest wypełnione cieczą termometryczną. Termometr zbudowany jest z czujnika, którym jest zbiornik cieczy termometrycznej, kapilary i elementu sprężystego zmieniającego swą objętość i ulegającego odkształceniu pod wpływem zmian

objętości cieczy termometrycznej. Ze względu na nieściśliwość cieczy termometrycznej, zmiany jej objętości są proporcjonalne do zmian temperatury mierzonej i skala termometru jest prawie liniowa.[2]

Na wskazania termometru mogą wpływać następujące czynniki:

- zmiana temperatury otoczenia,
- różnica poziomów umieszczenia miernika i czujnika,
- zmiana ciśnienia atmosferycznego.

Zmiany temperatury otoczenia kapilary i elementu sprężystego powodują błąd wskazań. Jako temperaturę odmierzania przyjmuje się na ogół $+20^{\circ}\text{C}$. W termometrach rtęciowych błąd powodowany przez zmiany temperatury kapilary wynosi orientacyjnie $\pm 0,1 - 0,2\%$ na 1 m długości kapilary i $\pm 10\text{K}$ różnicy temperatury. Układy bez kompensacji tego błędu stosuje się na ogół przy kapilarach krótszych niż 20m. Samoczynna kompensacją błędu temperaturowego można uzyskać następującymi sposobami [2]:

1. kompensacja pełna poprzez zastosowanie drugiego identycznego układu kapilary i elementu sprężystego bez czujnika,
2. kompensacja częściowa poprzez zastosowanie bimetalowego elementu pośredniczącego między elementem sprężystym a wskazówką,
3. kompensacja częściowa przez zastosowanie kapilary z wewnętrznym rdzeniem inwarowym o stałej objętości niezależnej od temperatury,
4. kompensacja pełna przez zastosowanie kapilary z rdzeniem i bimetalowego łącznika,
5. kompensacja pełna uzyskana za pomocą odpowiednio dobranego łącznika bimetalowego kompensującego wpływ zmian temperatury otoczenia na cały układ.

Dodatkowe błędy powoduje różnica poziomów umieszczenia miernika i czujnika termometru manometrycznego cieczowego, ze względu na występowanie ciśnienia hydrostatycznego słupa cieczy termometrycznej. Gdy czujnik jest umieszczony wyżej niż miernik, wskazania będą za wysokie, gdy niżej - za niskie. Błąd ten jest największy dla rtęci (ze względu na duży ciężar właściwy), a można go wyeliminować nastawiając położenie zerowe wskazówki miernika po jego zainstalowaniu.

Drugą grupę termometrów manometrycznych stanowią termometry parowe. Konstrukcyjnie są one identyczne z termometrami manometrycznymi cieczowymi, a różnią się tylko wypełnieniem. Czujnik jest wypełniony częściowo cieczą, a częściowo jej parą. nasyconą. Ciśnienie pary nasyconej cieczy termometrycznej zależy od temperatury w miejscu występowania obu faz (ciekłej i gazowej), a więc warunkiem jego poprawnego działania jest, aby w czujniku występowały obie fazy, zaś w kapilarze i elemencie sprężystym tylko jedna z nich. Termometry

ciśnieniowe parowe mogą być stosowane do pomiaru temperatur:

- powyżej temperatury otoczenia (kapilara i element sprężysty są wypełnione cieczą zaś czujnik jest wystarczająco duży aby pomieścić zmiany objętości cieczy),
- poniżej temperatury otoczenia (kapilara i element sprężysty są wypełnione parą czujnik może mieć nieco mniejszą objętość),
- powyżej lub poniżej temperatury otoczenia (duża objętość czujnika ze względu na konieczność pomieszczenia cieczy z kapilary i elementu sprężystego przy najwyższych temperaturach)
- otoczenia oraz powyżej lub poniżej tej temperatury (ciecz termometryczna i jej para nasycona znajdują się tylko w czujniku i przekazują impuls ciśnienia poprzez ciecz pośredniczącą o niskim ciśnieniu par, która wypełnia całkowicie kapilarę, element sprężysty i dodatkowy mieszek pośredniczący).

Jako ciecze termometryczne stosuje się: eter, alkohol etylowy i metylowy, propan, pentan, benzen, toluol, ksyloł, chlorometyl, chloroetyl, chloroform. Zakres stosowalności termometrów parowych wynosi $-50 - 350^{\circ}\text{C}$, zaś przeciętna dokładność 1 - 2%. Termometry te nie wymagają stosowania układów kompensacyjnych. Na ich wskazania może mieć wpływ różnica umieszczenia czujnika i miernika, ale tylko w przypadku, gdy kapilara wypełniona jest cieczą. Dodatkowe błędy mogą powodować zmiany ciśnienia atmosferycznego, gdyż wpływają one na element sprężysty. Termometry manometryczne parowe są nieco tańsze od cieczowych i stosowane są tam, gdzie występują znaczne wahania temperatury otoczenia oraz tam, gdzie zależy nam na dużej dokładności pomiaru w pobliżu górnego krańca zakresu pomiarowego.

Termometry ciśnieniowe gazowe wykorzystują zmiany ciśnienia gazu wraz ze zmianą temperatury. Są najczęściej wypełnione azotem lub helem i stosowane w zakresie od -200 do 500°C . Termometry te reagują na zmiany temperatury otoczenia, lecz nie stosuje się układów kompensacji. Nie mają zastosowania w pomiarach technicznych [3].

2.2.2 Termometry elektryczne

2.2.2.1 Termometry oporowe (rezystancyjne)

W termometrach oporowych wykorzystuje się zjawisko zmiany oporności właściwej przewodników i półprzewodników w zależności od temperatury. Ogólną zależność zmiany rezystancji materiału ze zmianą temperatury przedstawia wzór:

$$R_t = R_o[1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2 + \gamma(t - t_0)^3 + \dots] \quad (9)$$

gdzie:

- R_t - rezystancja czujnika w temperaturze t ,
 R_o - rezystancja czujnika w temperaturze odniesienia t_0 ,

α, β, γ - współczynniki stałe.

W szerokim zakresie pomiarowym można, z dobrą dokładnością, korzystać ze wzoru:

$$R_t = R_o[1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2] \quad (10)$$

W ograniczonym zakresie temperatur ma zastosowanie wzór:

$$R_t = R_o[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (11)$$

gdzie:

α - cieplny współczynnik zmiany rezystancji z temperaturą.

Wartość współczynnika α charakteryzuje przydatność danego materiału jako czujnika termometru oporowego. Materiały stosowane na rezystory termometryczne powinny mieć następujące własności:

- możliwie duży cieplny współczynnik zmian rezystancji, co zapewnia dużą zmienność rezystancji z temperaturą,
- możliwie dużą rezystywność, co zapewnia małe wymiary czujnika, stabilność w czasie własności fizycznych,
- łatwość obróbki,
- odporność na korozję,
- powtarzalność własności fizycznych materiału wyjściowego,
- ciągłość zależności rezystancji od temperatury bez występowania histerezy.

Spośród czystych metali, na czujniki termometryczne najczęściej stosuje się platynę, nikiel i miedź zaś do pomiaru bardzo niskich temperatur niektóre stopy fosforobrazowe. Często wykonuje się także czujniki półprzewodnikowe, które zwykle stanowią mieszaniny tlenków (siarczków, krzemianów) takich metali jak: nikiel, kobalt, miedź, uran, żelazo, cynk, tytan, aluminium lub magnez. Czasem stosuje się również związki węgla.

Zaletą termistorów w stosunku do rezystorów metalowych jest możliwość uzyskania dużych czułości pomiaru (nawet do 0,001 K) i mała bezwładność cieplna. Wadą jest możliwość starzenia się materiału termistorowego, szczególnie przy przekroczeniu dopuszczalnej temperatury pomiaru, co prowadzi do zmiany własności fizycznych oraz konieczność zabezpieczenia przed samopodgrzewaniem się termistora powodującym duży błąd pomiaru [3].

Pomiarów temperatury za pomocą czujników oporowych można dokonywać przy użyciu każdego układu przeznaczonego do pomiarów rezystancji. Najczęściej stosowana jest metoda mostkowa z mostkiem Wheatstone'a zrównoważonym lub niezrównoważonym oraz układy mostkowe o automatycznej regulacji stanu równowagi. Do bardziej dokładnych pomiarów może być stosowana metoda kompensacyjna pomiaru rezystancji, zaś do mniej dokładnych - przyrządy ilorazowe o bezpośrednim odczycie. Układy ilorazowe są najczęściej stosowanymi w przemyśle

układami pomiarowymi termometrów rezystancyjnych. W układach tych opór rezystora termometrycznego jest mierzony za pomocą miernika ilorazowego (inaczej - miernika o cewkach skrzyżowanych lub logometru) wyskalowanego w stopniach temperatury. Wskazania mierników ilorazowych nie zależą w szerokim zakresie $\pm 10\%$ od zmian napięcia zasilającego, co umożliwia włączenie ich przez transformator i prostownik bezpośrednio do sieci elektrycznej bez potrzeby stabilizacji napięcia. Dostępne w handlu mierniki ilorazowe są klasy 1 lub 1,5 [4]. Zasada pomiaru rezystancji za pomocą miernika ilorazowego polega na tym, że przy zmianie temperatury zmienia się również opór rezystora termometrycznego R_t przy nie zmienionym oporze R_s włączonym w wewnętrzny układ miernika. Fakt ten pociąga za sobą zmianę stosunku natężeń prądów I_1 i I_2 płynących przez sztywno ze sobą związane cewki C_1 i C_2 obracające się w polu magnesu trwałego. Z cewkami połączona jest wskazówka, której wychylenie jest tylko funkcją ilorazu natężeń prądów płynących przez cewki, czyli jest funkcją tylko temperatury [4]. Zasadę pomiaru rezystancji w układzie ilorazowym przedstawia rysunek 2.

Przy dokładnych pomiarach temperatury za pomocą czujników rezystancyjnych stosuje się układy pomiarowe w postaci mostkowej. Równoważenie mostka może odbywać się ręcznie lub automatycznie, przy czym układy mostkowe równoważone ręcznie stosuje się prawie wyłącznie przy pomiarach laboratoryjnych, zaś układy równoważone samoczynnie - zarówno przy pomiarach laboratoryjnych, jak i przemysłowych. Dokładność układów mostkowych zrównoważonych wynosi średnio $\pm 0,1\%$. W pomiarach laboratoryjnych stosowane są mostki Wheatstone'a o dokładnościach $\pm 0,005-0,05\%$ [4]. Zrównoważone układy mostkowe zestawiane są najczęściej w postaci mostka Wheatstone'a. Schemat takiego mostka równoważonego ręcznie pokazuje rysunek 3. Mostek ten składa się z rezystora termometrycznego R_t oporów R_1, R_2, R_3 o stałej rezystancji potencjometru r oraz galwanometru G (lub innego typu wskaźnika zera). Równowagę mostka osiąga się poprzez przesuwanie suwaka na potencjometrze: wartość rezystancji potencjometru dobiera się tak, aby można było uzyskać równowagę mostka dla obydwu skrajnych wartości. R_t odpowiadających zakresowi mierniczemu termometru rezystancyjnego [4].

W warunkach równowagi mostka jest:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_t + R_w + R_p + r_4}{R_3 + r_3} \quad (12)$$

przy czym:

$$r = r_3 + r_4 \quad (13)$$

Po przekształceniu otrzymuje się:

$$R_t = \frac{R_2(R_3+r_3)}{R_1} - (R_w + R_p + r_4) \quad (14)$$

gdzie:

- R_p - rezystancja przewodów łączeniowych,
- R_w - rezystancja opornika wyrównawczego.

Ponieważ każdej wartości rezystancji rezystora termometrycznego R odpowiada ściśle określone położenie suwaka potencjometru więc można potencjometr wyskalować w stopniach temperatury. Zaletą mostków zrównoważonych jest niezależność ich wskazań od wartości napięcia zasilającego pod warunkiem takiego jego doboru, aby prąd płynący przez rezystor termometryczny nie powodował niedopuszczalnego błędu pomiarowego od samo podgrzania [4]. Układ zrównoważonego mostka dwuprzewodowego może być stosowany tylko wtedy, kiedy opór przewodów łączeniowych jest stały. Jeżeli opór ten zmienia się pod wpływem zmian temperatury, to wtedy stosuje się układ zrównoważonego symetrycznego lub niesymetrycznego mostka trójprzewodowego. W mostkach tego typu, przy założeniu, że rezystancja przewodów łączeniowych są równe, następuje kompensacja zmian ich rezystancji pod wpływem temperatury i wynik pomiaru niezależna jest od bezwzględnej wartości oporu przewodów łączeniowych [4].

Układy mostkowe równoważone samoczynnie są wykonywane jako odmiana samoczynnych kompensatorów napięciowych. Są one najczęściej zasilane napięciem stałym, lecz buduje się również takie układy zasilane prądem zmiennym (wymagają one jednak starannego ekranowania przewodów łączeniowych).

Układy mostkowe niezrównoważone są to najczęściej mostki Wheatstone'a stosowane do pomiarów zarówno statycznych jak i dynamicznych ze względu na zależność wskazań układu od stałości napięcia zasilającego stosowane są one w pomiarach laboratoryjnych, rzadziej w pomiarach przemysłowych.

Najszerzej rozpowszechnione są układy mostkowe zasilane napięciem przemiennym, które noszą nazwę mostków tensometrycznych i wykonywane są zazwyczaj jako przyrządy uniwersalne, umożliwiające pomiar różnych wielkości nieelektrycznych za pomocą czujników rezystancyjnych, indukcyjnych transformatorowych. Dokładności uzyskiwane za pomocą mostków tensometrycznych są rzędu 0,5 - 1,5%.

2.2.2.2 Termometry termoelektryczne

Termometry termoelektryczne nazywane inaczej termoparami, wykorzystują dwa zjawiska fizyczne: Peltiera i Thomsona. Efekt Peltiera polega na występowaniu napięcia stykowego w miejscu zetknięcia się dwóch różnych metali, zaś efekt Thomsona - na powstawaniu różnicy potencjałów w jednorodnym przewodzie metalowym, którego końce znajdują się w różnych temperaturach. Nałożenie się tych dwóch zjawisk daje efekt termoelektryczny.

Aby można było wykorzystać w praktyce obwód dwóch metali A i B do pomiaru temperatury, należy włączyć miernik mierzący występującą siłę termoelektryczną lub proporcjonalne do niej napięcie. Włączenie miernika jest równoznaczne z wprowadzeniem do obwodu trzeciego metalu C, z którego wykonywane są przewody łączące miernik z obwodem oraz obwód wewnętrzny miernika. Zgodnie z prawem trzeciego metalu, wprowadzenie do obwodu metali A i B trzeciego metalu C nie wpływa na wartość wypadkowej siły termoelektrycznej pod warunkiem, że oba końce przewodu z metalu C znajdują się w takiej samej temperaturze. Miejsce włączenia trzeciego metalu C jest dowolne. [2]

Przy pomiarach temperatury za pomocą termopar korzysta się również z prawa kolejnych temperatur, które brzmi:

- siła termoelektryczna obwodu o temperaturze spoiny pomiarowej t_1 i temperaturze spoiny odniesienia t_3 równa jest różnicy siły termoelektrycznej tego obwodu przy temperaturze odniesienia t_2 i siły termoelektrycznej tego obwodu o temperaturze spoiny pomiarowej t_3 i temperaturze spoiny odniesienia t_2 . [2]
- połączone na jednym końcu dwa różne materiały: metale czyste, stopy metali lub niemetały, tworzą termoelement. Miejsce łączenia nazywa się spoiną pomiarową zaś pozostałe końce - końcami wolnymi. Przewody termoelementu nazywane są termoelektrodami. [2]

Na termoelementy należy wybierać zestawy materiałów, które w szeregu termoelektrycznym znajdują się możliwie daleko od siebie, aby powstająca wskutek różnicy temperatur siła termoelektryczna była możliwie duża. Materiały stosowane w termoelementach powinny wykazywać następujące cechy:

- wysoką temperaturę topnienia,
- wysoką dopuszczalną temperaturę pracy ciągłej,
- dużą odporność na wpływy atmosferyczne,
- stałość w czasie własności fizycznych,
- dużą powtarzalność własności przy produkcji,
- możliwie małą rezystywność,
- możliwie mały cieplny współczynnik zmiany rezystancji,
- ciągłą i liniową zależność siły termoelektrycznej od temperatury.

Stosowane w praktyce zestawy materiałów na termoelementy stanowią pewien kompromis pomiędzy poszczególnymi wymaganiami [2]. Schemat najprostszego termometru termoelektrycznego przedstawia rysunek 4. Spoina mierząca P_1 termoelementu wykonanego z przewodów A i B znajduje się w przestrzeni o temperaturze T . Pozostałe końce termoelektrod połączone są w punktach P_2 i P_3 z przewodami C łączącymi termoelement z miliwoltomierzem. Punkty połączeń przewodów P_2 i P_3 znajdują się w przestrzeni o znanej temperaturze T_0 .

Przewody termoelementu muszą być izolowane od siebie oraz od przewodzących prąd elektryczny ciał, których temperaturę mierzymy. Przy pomiarach temperatury płynów termoelementy są często chronione przez odpowiednie osłony metalowe lub ceramiczne. W ten sposób powstaje z termoelementu czujnik termoelektryczny, obejmujący przewody elektryczne, izolację, rurę ochronną i ewentualnie głowicę lub złączkę do podłączenia przewodów przedłużających, kompensacyjnych lub łączących czujnik z przyrządem pomiarowym. Przewód termoelementu, przez który płynie prąd w kierunku spoiny o niższej temperaturze nazywany jest przewodem (biegunem) dodatnim. Przewód, przez który płynie prąd w kierunku spoiny o wyższej temperaturze nazywany jest przewodem ujemnym.

W nazwie i skrócie nazwy termoelementu (np. *NiCr - Ni Al*) podaje się na pierwszym miejscu materiał przewodu dodatniego. Jeżeli ze względu na wymaganą dokładność, występujące zmiany temperatury odniesienia są zbyt duże należy tę temperaturę stabilizować lub zastosować samoczynną korekcję wpływu jej zmian.

W pomiarach laboratoryjnych stosuje się często dla spoin odniesienia temperaturę $Q^{\circ}C$ utrzymywaną w naczyniu Dewara (termos szklany) przez drobno potłuczony lód zalany wodą z dokładnością $\pm 0,1$ K przy zastosowaniu wody wodociągowej, a z dokładnością $+ 0.01$ K lub nawet $\pm 0,001$ K przy zastosowaniu wody destylowanej i lodu z wody destylowanej. Wadą tej metody jest konieczność uzupełniania lodu i odlewania wody przy długo trwających pomiarach [4]

Przy mniejszych wymaganiach co do dokładności temperatury odniesienia stosuje się elektryczne termostaty i kompensatory temperatury spoin odniesienia termoelementów.

Przy pomiarach temperatury za pomocą termoelementów występuje szereg błędów, które podzielić można na dwie grupy. Do jednej grupy można zaliczyć błędy wynikające z zaburzenia pola temperatury przez czujnik oraz związane z bezwładnością cieplną czujnika. Do drugiej grupy błędów należą błędy w obwodzie pomiarowym o naturze elektrycznej. Są one związane ze zmianą charakterystyki czujnika, niedokładnością wzorcowania czujnika, niedokładnością ustalenia temperatury odniesienia, błędami wskazań miernika, niedokładnością izolacji. [4]

Zmianę charakterystyki termometru w czasie jego użytkowania w stosunku do charakterystyki uzyskanej w czasie wzorcowania, może powodować rekrytalizacja oraz zjawiska dyfuzyjne w przewodach termoelementu. Duży wpływ na własności termoelektryczne termoelementu mają własności fizyczno-chemiczne drutów termoelektrod w warstwie powierzchniowej w pobliżu spiny termoelementu. W tym właśnie miejscu pod wpływem wysokiej temperatury występują zjawiska utleniania i dyfuzji prowadzące do usuwania niektórych pierwiastków i zmieniające skład chemiczny termoelektrod. Z tej przyczyny wzrastają ziarna i zmienia się sieć krystaliczna, co powoduje zmniejszenie liczby swobodnych elektronów i obniżenie napięcia termoelektrycznego. Jeżeli termoelektrody znajdują się w obszarach niezotermicznych, to niekorzystny wpływ na ich charakterystyki termometryczne ma niedostateczna jednorodność drutów termoelektrod wynikająca z technologii ich produkcji. Usuwanie tych niejednorodności polega na starzeniu drutów w temperaturze 400 – 600°C i równomiernym wyżarzaniu.

Następną przyczyną błędów występujących przy pomiarze temperatury za pomocą termoelementów jest niewłaściwie wykonana izolacja elektryczna elektrod między sobą. Gdy można przyjąć, że zwarcie między termoelektrodami występuje tylko w jednym miejscu, względny błąd pomiaru ocenia się według wzoru:

$$\delta = \frac{R_1(e - e_i)}{e(R_i + R_1)} \quad (15)$$

gdzie:

- e - napięcie termoelektryczne termoelementu przy temp. spiny mierzącej T i temp. odniesienia T_0 ,
- e_i - napięcie termoelektryczne w miejscu zwarcia przy temp. T_i ,
- R_1 - rezystancja termoelementu między spoiną mierzącą a miejscem zwarcia termoelektrod,
- R_i - rezystancja izolacji w miejscu zwarcia.

Błąd ten jest tym większy, im mniejsza jest średnica termoelektrod. Natomiast przy dużych średnicach i małych rezystancjach termoelektrod R jest pomijalny [4].

Dodatkowe błędy pomiaru wywołują różnice temperatury odniesienia termoelementu podczas pomiarów i przy wzorcowaniu. Wielkość tych błędów jest zależna od rodzaju ustalenia temperatury odniesienia w warunkach pomiaru i wzorcowania.

Przy szacowaniu błędu pomiaru dla całego termoelementu należy uwzględnić także błędy miernika elektrycznego (miliwoltomierza), którego wskazania zależą bezpośrednio od natężenia przepływu prądu elektrycznego, a pośrednio od rezystancji zewnętrznej i wewnętrznej (termoelementu i przewodów łączących). Wszystkie te rezystancje mogą zmieniać się w czasie pomiarów. Aby zmniejszyć wpływ zewnętrznej rezystancji na pomiary napięcia termoelektrycznego, stosuje się wewnętrzne rezystancje miliwoltomierzy R_m wielokrotnie większe od rezystancji zewnętrznej R_z , wynoszące kilkaset omów.

2.2.2.3 Termometry magnetyczne

Są to takie termometry, w których czujnik działa na zasadzie zmiany własności magnetycznych ze zmianą temperatury. Do tego typu termometrów należą przyrządy działające na zasadzie zmiany przewodności magnetycznej soli paramagnetycznych np. glinianu żelazowo-amonowego lub siarczanu żelazowo-amonowego. Zgodnie z prawem Curie, przewodność magnetyczna niektórych paramagnetyków zmienia się wraz ze zmianą temperatury według wzoru:

$$A = \frac{C}{T} \quad (16)$$

gdzie:

- C - stała Curie charakterystyczna dla danego materiału paramagnetycznego,
- T - temperatura bezwzględna [K].

Substancje paramagnetyczne, które charakteryzuje niska temperatura Curie, mogą być wykorzystane do pomiaru najniższych temperatur (nawet poniżej 4 K). Układ pomiarowy i oprzyrządowanie pomocnicze są dość rozbudowane, a wyniki pomiarów otrzymywane w skali temperatur Curie muszą być transponowane do termodynamicznej skali temperatur.

Do termometrów magnetycznych należą również przyrządy działające na zasadzie zmiany przenikalności magnetycznej i strat wskutek prądów wirowych. Są one stosowane przede wszystkim do pomiaru temperatury elementów i urządzeń wirujących, gdyż nie wymagają bezpośredniego styku między badanym elementem i czujnikiem pomiarowym [3].

2.2.2.4 Termometry dielektryczne pojemnościowe

Ponieważ przenikalność elektryczna pewnych materiałów dielektrycznych i półprzewodników jest zależna od temperatury, więc kondensator z dielektrykiem z takiego materiału może być używany jako czujnik temperatury, gdyż w zależności od niej zmienia swą pojemność. Materiałem stosowanym jako dielektryk może być np. tytanian o nazwie handlowej "Thermacon", którego przenikalność elektryczna zmienia się prawie liniowo ze zmianą temperatury w zakresie temperatur -40°C do 160°C . Dielektryki ceramiczne mogą być używane do pomiarów temperatur w zakresie $-100 - 1000^{\circ}\text{C}$.

Pomiar zmiany pojemności przeprowadza się metodą mostkową różnicową lub metodą rezonansową. Tego typu termometry wymagają skomplikowanej aparatury pomocniczej i są stosowane w specjalnych pomiarach temperatury. [3]

2.2.2.5 Termometry oparte na zjawisku szumów cieplnych w przewodnikach

W przewodniku znajdującym się w temperaturze powyżej zera absolutnego, elektrony znajdują się w ciągłym, bezwładnym ruchu, który powoduje powstawanie między końcami przewodnika zmiennej różnicy potencjałów o charakterze szumów przypadkowych. Napięcie szumów cieplnych wzrasta ze wzrostem temperatury.

Termometry działające na zasadzie pomiaru napięcia szumów cieplnych można stosować w zakresie temperatur od 100 K do 1700 K. Dokładność pomiaru rzędu 0,1% wymaga starannego doboru elementów układu elektronicznego, natomiast osiągnięcie dokładności rzędu 1% nie nastręcza specjalnych trudności technicznych i układowych. Czujnik temperatury nie wymaga indywidualnego skalowania, nie jest istotny wybór metalu czujnika (rezystory węglowe nie nadają się do tego celu z powodu niejednorodności ich struktury wewnętrznej). Zjawisko histerezy cieplnej wpływa w sposób istotny na wynik pomiaru, natomiast pewne kłopoty techniczne powodują szумы własne układu pomiarowego i istnienie pojemności szkodliwych. Termometry tego typu znalazły zastosowanie przy specjalnych pomiarach temperatury [3].

2.3 Termometry bezstykowe

Termometry bezstykowe czyli pirometry umożliwiają pomiar temperatury powierzchni ciał wykorzystując ich promieniowanie temperaturowe. Zakres promieniowania temperaturowego mającego największe znaczenie w pirometrii zawiera się w granicach od ok. 0,4 do 20 μm , a więc leży w zakresie promieniowania widzialnego i podczerwonego.

W zależności od wykorzystywanego zakresu długości fal wysyłanego promieniowania temperaturowego, pirometry można podzielić na pirometry całkowitego promieniowania (radiacyjne), pirometry wykorzystujące pewne pasmo wysyłanego promieniowania (najczęściej fotoelektryczne) oraz pirometry monochromatyczne, pracujące przy jednej długości fali. Istnieją również pirometry, w których pomiar temperatury odbywa się przez porównanie natężenia promieniowania wysyłanego w dwóch różnych długościach fal - są to pirometry dwubarwne.

Duże znaczenie w pirometrii ma pojęcie ciała doskonale czarnego - jest to mianowicie takie ciało, które pochłania całkowicie padające na nie promieniowanie. Dla ciała doskonale czarnego rozkład energii wypromieniowanej w funkcji długości fali wyraża się zależnością zwaną prawem Plancka:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (17)$$

gdzie:

$E_{0\lambda}$ - monochromatyczne natężenie promieniowania ciała doskonale

czarnego w $\frac{W}{m^2\mu m}$,

λ - długość fali w μm ,

T - temperatura bezwzględna ciała promieniującego w [K],

$c_1 = 3,7415 * 10^{-6} \frac{W}{m^2}$

$c_2 = 14388\mu m * K$

Dla małych wartości T prawo Plancka można zastąpić prawem promieniowania Wiena:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (18)$$

W zakresie temperatur spotykanych w pirometrii, błąd wynikający z zastąpienia prawa Plancka prawem Wiena jest pomijalnie mały. Względną wartość tego błędu oblicza się z zależności:

$$\frac{\Delta E_{0\lambda}}{E_{0\lambda}} = \frac{\Delta E_{0\lambda P1} - E_{0\lambda, W}}{E_{0\lambda, P1}} \quad (19)$$

gdzie:

- $E_{0\lambda P1}$ - monochromatyczne natężenie promieniowania obliczone według wzoru Plancka,
- $E_{0\lambda, W}$ - monochromatyczne natężenie promieniowania obliczone według wzoru Wiena.

Stosunek monochromatycznego natężenia promieniowania E_λ , w danej długości fali λ dla ciała nie czarnego do monochromatycznego natężenia promieniowania $E_{0\lambda}$ przy tej samej długości fali dla ciała czarnego znajdującego się w tej samej temperaturze nazywa się emisyjnością monochromatyczną ε_λ :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0\lambda}} \quad (20)$$

Jeżeli dla pewnego ciała przy dowolnej długości fali λ spełniony jest warunek: $\varepsilon_\lambda = \text{const}$ to ciało takie nazywa się ciałem szarym.

Znajomość emisyjności całkowitej ε i emisyjności monochromatycznej ε_λ przy $\lambda = 0,65 \mu m$ dla poszczególnych materiałów jest konieczne przy pirometrycznym pomiarze ich temperatury, gdyż umożliwia to obliczenie poprawek do wskazań pirometrów.

Przy pomiarach temperatury za pomocą pirometrów korzysta się również z prawa Stefana-Boltzmann'a, pozwalającego ustalić ilość energii wymienianej między dwoma ciałami. Ilość energii wymienianej przez promieniowanie między dwoma ciałami doskonale czarnymi zależy jedynie od wartości temperatury na ich powierzchniach. Na tym właśnie fakcie oparto zasadę działania pirometrów całkowitego promieniowania (radiacyjnych). Promieniowanie cieplne wysyłane przez ciało, którego temperaturę chcemy zmierzyć jest skupiane na detektorze

promieniowania. Pomiar sprowadza się do pomiaru różnicy temperatur detektora i otoczenia.

Dla ciał szarych pirometr całkowitego promieniowania będzie wskazywał temperaturę niższą od rzeczywistej (nie można tu zastosować poprawki korekcyjnej, gdyż emisyjność ε ciała szarego jest jego cechą indywidualną. W praktyce przy pomiarze temperatury ciał nie czarnych za pomocą pirometrów radiacyjnych, aby uniknąć błędów należy postępować inaczej. Pierwszy sposób, polega na stworzeniu warunków, w których własności ciała badanego, przez odpowiednie skierowanie pirometru lub odpowiednie ukształtowanie powierzchni, zbliżają się do własności ciała doskonale czarnego. Na przykład mierząc temperaturę danego ośrodka zanurza się w nim zasklepioną rurę pośredniczącą która w pewnych warunkach stanowi model ciała doskonale czarnego.

Drugi sposób polega na rezygnacji z pomiaru rzeczywistej wartości temperatury danego ciała. Dla procesu produkcyjnego powtarzającego się w jednakowych warunkach dokonuje się jednoczesnego pomiaru temperatury pirometrem radiacyjnym i innym dokładniejszym przyrządem. Wiadomo wtedy jaką pozorną wartość temperatury powinien wskazywać pirometr radiacyjny, aby rzeczywista temperatura miała określoną wymaganą wartość. Sposób ten jest często stosowany w praktyce przemysłowej, gdyż dla prawidłowego przebiegu określonego procesu produkcyjnego wystarcza ściśle powtarzanie się raz ustalonych warunków.

Trzeci sposób, polega na wprowadzeniu poprawek do wskazań, na podstawie wskazań innego układu pomiarowego. Jest to możliwe wtedy, gdy pirometr ma urządzenie umożliwiające zmianę wskazań, np. dodatkową, przesłone regulacyjną. Wskazania pirometru są wówczas prawidłowe w tym zakresie temperatur, w którym ε jest stałe [2].

Pirometr optyczny całkowitego promieniowania z detektorem termoelektrycznym może być używany do pomiaru temperatury powyżej 800°C, a przy zastosowaniu termoelementu wielokrotnego można obniżyć dolny zakres pomiarowy do 100°C i poniżej. Zwykle wykonuje się te pirometry jako przyrządy dwuzakresowe. Błąd pomiaru temperatury ciał czarnych dla zakresu temperatur od 800°C do 1400°C zawiera się w granicach $\pm 1.5^\circ\text{C}$, dla zakresu do 2000°C około $\pm 25^\circ\text{C}$. Błąd ten może jeszcze wzrosnąć wskutek:

niedoskonałości czerni ciała, którego temperaturę mierzymy,

- błędu przyrządu wskazującego,
- niedoskonałej przezroczystości ośrodka otaczającego ciało badane.

Czas pomiaru wynosi od 1 do 10s i można go zmniejszyć stosując odpowiednie konstrukcje [3].

Następną grupę pirometrów stanowią pirometry fotoelektryczne. Zasada ich działania polega na pomiarze sygnału elektrycznego wytwarzanego w fotoelementach, na których skupia się promieniowanie temperaturowe wysyłane przez badane ciało. Pirometry o bardzo wąskim paśmie wykorzystywanego promieniowania można zaliczyć do pirometrów monochromatycznych, pozostałe zaś można nazywać pirometrami pasmowymi. Jako detektory promieniowania mogą być używane fotoelementy przewodzące takie jak, np. fotorezystory, fotodiody, fotoelementy emisyjne oraz fotoogniwa [3].

Pirometry fotoelektryczne są stosowane do pomiaru temperatur w zakresie od 100°C do 4 000°C. Błąd pomiaru temperatury dla ciała doskonale czarnego wynosi co najmniej $\pm 0,2\%$.

Zgodnie z. prawem Plancka - wzór (17) - można stwierdzić istnienie ścisłej zależności między temperaturą ciała T i natężeniem promieniowania przy określonej długości fali λ . W praktyce pomiarowej wykorzystuje się światło żółte o długości fali $\lambda = 65 \mu m$. Na rysunku 5 przedstawiono schemat ideowy jednego z rozwiązań pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem. Pomiar temperatury za pomocą takiego pirometru polega na porównaniu luminacji ciała badanego i włókna żarówki pirometru w wybranej długości fali zapewnionej przez odpowiednio dobrany filtr. Odczytu dokonuje się wtedy, gdy obraz włókna żarówki pirometru obserwowany przez filtr zanika na tle badanego obiektu. Regulacji luminacji drucika dokonuje się poprzez regulację prądu w obwodzie włókna żarówki. Przyrząd do pomiaru wartości prądu w obwodzie jest wyskalowany w jednostkach temperatury [3].

Pirometry z zanikającym włóknem budowane są jako jedno- dwu- lub trzystakresowe. Zakresy pomiarowe są zawarte z zakresie temperatur od 750°C do 3 000°C. Są one skalowane dla ciała doskonale czarnego. Dla ciała szarego można je również stosować, wprowadzając poprawkę uwzględniającą zdolność emisji danego. ciała [3]. Temperaturę rzeczywistą T_r (wyższą niż wskazywana przez pirometr z zanikającym włóknem) ciała szarego można obliczyć według wzoru:

$$T_r = \frac{1}{\frac{1}{T_w} + \frac{\log \varepsilon_{\lambda_e}}{9500}} \quad (21)$$

gdzie:

- T_w - temperatura luminacyjna wskazywana przez pirometr,
- ε_{λ_e} - emisyjność monochromatyczna badanego ciała przy stosowanej efektywnej długości fali λ_e .

Istnieje również sposób pomiaru rzeczywistej temperatury powierzchni metalowych poprzez pomiar pirometrem monochromatycznym ich temperatury luminacyjnej w świetle spolaryzowanym. Ponieważ w wyższych temperaturach powierzchnie metalowe wysyłają przy kątach do normalnej rzędu $\frac{\pi}{5}$ silnie spolaryzowane promieniowanie, więc mają własności bliskie własnościom ciała doskonale czarnego. Przy pomiarze temperatury, przed soczewką pirometru

umieszcza się filtr polaryzacyjny, a pirometr powinien być wyskalowany wraz z filtrem. Tak zmierzona temperatura jest bardzo bliska wartości rzeczywistej [2].

Zależność barwy ciała wysyłającego promieniowanie od temperatury wykorzystano w pirometrach dwubarwnych. Zasada ich działania polega na pomiarze temperatury ciał wysyłających promieniowanie temperaturowe na podstawie stosunku wartości natężenia promieniowania wysyłanego przez te ciała przy dwóch różnych długościach fal.

W pirometrze dwubarwnym promieniowanie cieplne widzialne wysyłane przez ciało przechodzi przez soczewkę i filtr czerwono-zielony. Położenie filtra ustawia się tak, aby uzyskać w okularze barwę szarą. Aby ułatwić właściwą ocenę barwy szarej w polu widzenia obserwatora znajduje się dodatkowa plamka szara wytworzona przez żarówkę i filtr zielono czerwony. Filtrem szarym równoważy się luminacje plamki świetlnej i obszaru obiektu badanego. Położenie tego filtra wyznacza temperaturę luminacyjną ciała badanego. Przed rozpoczęciem pomiaru należy ustawić, za pomocą rezystora, określoną dla danego pirometru wartość prądu żarzenia żarówki [3].

Temperatura wskazywana przez pirometr dwubarwny różni się od temperatury rzeczywistej badanego ciała w przypadku, gdy $\varepsilon_{\lambda_1} \neq \varepsilon_{\lambda_2}$ (ε_{λ} - emisyjność przy długości fali λ). Różnice te są jednak niewielkie i można przyjąć, że piometry dwubarwne skalowane dla ciał szarych dają prawidłowe wskazania temperatury.

Piometry tego typu są stosowane tam, gdzie ze względu na pochłanianie promieniowania przez gazy, pary i dymy, stosowanie innych piometrów jest niemożliwe oraz przy pomiarach temperatury ciał szarych o zmiennej emisyjności. W pomiarach laboratoryjnych piometry dwubarwne dają dla ciał szarych dokładniejsze wyniki niż inne piometry [2].

2.4 Termometry specjalne

Do tej grupy termometrów należą m.in. przyrządy umożliwiające tylko stwierdzenie czy osiągnięto lub przekroczono określoną wartość temperatury, bez jej dokładnego pomiaru. Często są one również nazywane wskaźnikami temperatury. Do najczęściej stosowanych wskaźników należą stożki parametryczne zwane stożkami Segera. Są to trójścienne ostrosłupy ścięte wykonane z tak dobrego materiału, że przy ogrzaniu do określonej temperatury zwanej temperaturą zgięcia stożka, uginają się dotykając wierzchołka podstawki. Stożki są numerowane zależnie od ich temperatury zgięcia i mogą być używane do pomiaru temperatur w zakresie od 600 do 2 000°C. Najczęściej wykorzystuje się je w przemyśle ceramicznym do wyznaczania temperatury wypalania wyrobów ceramicznych i w energetyce do określania temperatury topliwości popiołu.

Innym rodzajem wskaźników temperatury są farby termometryczne. Zmieniają one swoją barwę w sposób ciągły lub nieciągły, wraz ze zmianami temperatury. Istnieją farby zmieniające barwę jednokrotnie, inne zmieniają ją dwu-, trzy-, a nawet czterokrotnie, odpowiednio w dwóch, trzech lub czterech różnych temperaturach. Ponadto termofarby dzielą się na odwracalne, które po ochłodzeniu wracają do barwy pierwotnej oraz nieodwracalne - trwale zmieniające barwę.

Farby zmieniające barwę w sposób ciągły są produkowane do mierzenia temperatury od ok. 120 do 400°C, zaś o wyraźnie określonych punktach zmiany barwy w zakresie od 40 do 1 350°C. Na przedmiot, którego temperaturę chcemy określić, nakłada się termofarby za pomocą pędzla lub natryskowo [2]. Za pomocą farb termometrycznych można określić temperaturę ruchomych części maszyn i silników, elementów znajdujących się pod napięciem, a także rurociągów, żeber chłodniczych, itd. W celu ustalenia się koloru termofarby musi być ona poddana działaniu temperatury przez określony czas, którego długość określa producent farby (zwykle czas ten wynosi 30 minut).

Do szybkiego określenia temperatury stosuje się termokredki. W tym przypadku pociera się kredką badane ciało lub jego część i po upływie 2 sekund występuje barwa charakteryzująca daną temperaturę. Termokredki są produkowane do pomiaru temperatury w granicach od 65 do 600°C co 50°C [3].

Podobne zastosowanie jak termofarby mają wskaźniki topnikowe, będące odpowiednio dobranymi związkami chemicznymi o różnych temperaturach topnienia. Są one wytwarzane w postaci kredek lub szybko schnących cieczy. W temperaturze niższej niż temperatura topnienia wskaźnika, znak wykonany kredką lub płynem jest matowy, zaś po osiągnięciu temperatury topnienia i ponownym ostudzeniu staje się gładki, ze śladami stopienia. Wskaźniki takie są produkowane dla temperatur od 50 do 1 400°C ze stopniowaniem co 5 do 30 K. Dokładność ich wskazań dochodzi do $\pm 1\%$ [2].

Do grupy termometrów specjalnych zalicza się także przyrządy mierzące temperatury metoda termografii i termowizji. Jest to jedna z najnowszych metod pomiaru pól temperatur ciał stałych, która znalazła zastosowanie w technice, medycynie, geologii itp. Urządzenia termograficzne zamieniają emitowane przez ciało promieniowanie podczerwone na impulsy elektryczne, które po odpowiednim wzmocnieniu i przetworzeniu zamieniane są w obraz widzialny. W omawianej metodzie nie istnieje potrzeba stosowania dodatkowego źródła ciepła opromieniowującego badany przedmiot, tak jak ma to miejsce, przy wykonywaniu fotografii w podczerwieni tradycyjnymi metodami.

Na ekranie kineskopu otrzymuje się obraz badanego ciała, przy czym obszary o różnej emisyjności różnią się od siebie barwą (na monitorze czarno-białym obszary o wzmożonej emisyjności są białe, obszary o średniej emisyjności są szare, a barwa obszarów o małej emisyjności zdąża do koloru czarnego). Jeżeli obserwowana powierzchnia ma jednakową emisyjność, to obserwowany obraz

odwzorowuje w wierny sposób rozkład pola temperatur. W przeciwnym wypadku ($\epsilon \neq \text{const.}$), należy stosować dla poszczególnych fragmentów obrazu współczynniki poprawkowe [1].

W technice termograficznej stosuje się dwa typy detektorów promieniowania. W pierwszym, tak zwanym detektorze termicznym, promieniowanie podczerwone absorbowane jest w mikrowarstwie, w której następuje wzrost temperatury – zmiany temperatury przetwarzane są na sygnały elektryczne (termopary, termistory).

W detektorach drugiego typu umieszczone są fotodetektory (elementy półprzewodnikowe), w których sygnały elektryczne są wynikiem takich zjawisk jak fotoprzewodnictwo, efekt fotowoltoniczny lub fotomagnetoelektryczny [1].

Urządzenia termowizyjne pozwalają wyznaczyć rozkład izoterm z dokładnością do 0,2K.

W inżynierii sanitarnej urządzenia termowizyjne mogą być stosowane w następujących przypadkach:

- do pomiaru rozkładu temperatur na powierzchni przegród budowlanych stanowiącego podstawę do oceny izolacyjności cieplnej przegród,
- do oceny stanu izolacji cieplnej rurociągów ciepłowniczych, parowych itd. (występuje tu szereg czynników utrudniających pomiary, np. wysokie temperatury zewnętrzne, duża wilgotność, nasłonecznienie, śnieg, wysoka trawa itp.),
- do poszukiwania miejsc nieszczelności podziemnych sieci ciepłych,
- w badaniach laboratoryjnych.

Do metod specjalnych pomiaru temperatury należą również metody metalograficzne, kalorymetryczne i inne, których szczegółowo nie omówiono, ze względu na to, że są one rzadko stosowane w pomiarach technicznych.

2.4 Wzorcowanie i sprawdzanie termometrów

Wzorcowaniem termometru nazywa się zespół czynności prowadzących do określania zależności wielkości termometrycznej od temperatury. Przy wzorcowaniu termometrów wykorzystuje się zwykle stałe punkty termometryczne międzynarodowej skali temperatur oraz punkty pomocnicze [3].

Sprawdzaniem termometru nazywa się zespół czynności związanych z ustaleniem poprawności jego wskazań w stosunku do wymagań technicznych dokładności pomiaru temperatury. Przy sprawdzaniu termometru wzorcowego, którym musi być termometr atestowany, mający zaświadczenie cechowania odpowiedniego urzędu, zawierające odchyłki wskazań od wartości rzeczywistych temperatur. Odchyłki te muszą zezwalać na dokonanie pomiaru temperatury z błędem nie większym niż $\pm 0,1^\circ\text{C}$ w zakresie temperatur od 0 do 100°C i $\pm 0,2\%$ w zakresach: -30 do 0°C i 100 do 300°C [3].

Tak jak wszystkie przyrządy pomiarowe, termometry powinny być okresowo sprawdzane. Sprawdzenia należy również dokonywać przed ważniejszymi pomiarami. Podczas sprawdzania termometrów należy zapewnić warunki jednoznaczności pomiaru dla termometru wzorcowego i badanego, tzn. temperatury czujników obu termometrów powinny być jednakowe, warunki wymiany ciepła w otoczeniu obu termometrów powinny być takie same, a sam sposób prowadzenia pomiaru powinien wykluczać powstanie błędów fałszujących wskazania termometrów.

Wzorcowanie lub sprawdzanie termometrów przeprowadza się różnymi metodami w zależności od zakresu temperatury i wymaganej dokładności. Sprawdzanie termometrów w zakresie od -170°C do 630°C przeprowadza się umieszczając badany i wzorcowy lub kontrolny czujnik temperatury w ciekłej kąpeli termostatu. Wypełnieniem termostatu może być:

- w zakresie od -170°C do 0°C - pentan,
- w zakresie od -100°C do 0°C - alkohol metylowy,
- w zakresie od -80°C do 20°C - aceton,
- w zakresie od 0°C do 99°C - woda,
- w zakresie od 20°C do 250°C - oleje mineralne i si likonowe,
- w zakresie od 180°C do 630°C - mieszanina soli zawierająca 55.2% KNO_3 i 44,8% NaNO_2 (wagowo),
- w zakresie od 250°C do 630°C - stopiona cyna.

Konstrukcja termostatu jest ściśle zależna od zakresu temperatury. Do obniżenia temperatury cieczy w termostacie stosuje się: ciekły azot, suchy lód, urządzenia chłodnicze, wodę wodociągową.

Pomiary są przeprowadzane przy powoli podwyższanej lub obniżanej temperaturze kąpeli [4].

W zakresie temperatury od 300°C do 1100°C sprawdzania termometrów dokonuje się poprzez umieszczenie termometru badanego i wzorcowego lub kontrolnego w otworach bloku metalowego nagrzewanego w piecu rurowym. Do 500°C stosuje się bloki z aluminium lub miedzi, do 750°C - bloki z brązu aluminium, do 800°C - bloki z czystego niklu, a do 1100°C - bloki ze stali żaroodpornych. Pola temperatury w takich blokach są mniej równomierne niż w cieczach termostatów, należy więc termometr badany i wzorcowy umieszczać symetrycznie do osi bloku [4].

Przy temperaturze wyższej od 1100°C umieszcza się termoelementy bezpośrednio w ceramicznej rurze pieca, a równość mierzonej temperatury uzyskuje się przez połączenie spoiną drutem platynowym lub zespawanie ze spoiną termoelementu wzorcowego [4].

Wyznaczenie charakterystyki termoelementu metodą porównawczą stosuje się do termoelementów $P_{tR_h}-P_t$ w taki sposób, że łączy się jednoimienne swobodne końce termoelementu badanego i wzorcowego, a następnie wyznacza się poprawkę dla termoelementu badanego przez pomiar napięcia termoelektrycznego

w różnych temperaturach.

Wyznaczanie charakterystyki termoelementu metodą topnienia drutu stosuje się do badania termoelementów $P_t R_h - P_t$ w punktach topnienia złota, palladu, platyny. W tym celu między elektrody badanego termoelementu należy spawać drut o tej samej lub podobnej średnicy wykonany z odpowiednio czystego metalu. Temperatura pieca powinna być o ok. 5 K niższa od temperatury spawanego drutu do czasu, gdy po włożeniu do pieca badany termoelement osiągnie tę temperaturę. Podczas topnienia drutu napięcie termoelektryczne termoelementu nie zmienia się a po stopieniu drutu znika [4].

W normalnej praktyce laboratoryjnej rzadko stosuje się wzorcowanie lub sprawdzanie termometrów za pomocą odtwarzania punktów stałych lub wtórnych punktów stałych międzynarodowej praktycznej skali temperatury. Jednak często odtwarza się temperaturę topnienia lodu z wody destylowanej, która jest punktem wtórnym tej skali, jako temperaturę odniesienia dla „zimnych” końców termoelementu. Temperaturę (TC czyli $273,15^{\circ}\text{C}$) uzyskuje się przez utworzenie mieszaniny lodu otrzymanego z wody destylowanej z wodą destylowaną w naczyniu Dewara (termosie szklanym). Do tego naczynia wrzuca się lód potłuczony na drobne kawałki (max 10mm), które zalewa się wodą do wysokości 10 – 20 mm poniżej poziomu lodu tak, aby powierzchnia lodu zbiegła. W miarę topnienia lodu usuwa się nadmiar wody. W ten sposób można odtworzyć temperaturę topnienia lodu z dokładnością $\pm 0,001$ K, a stosując wodę wodociągową - $\pm 0,1$ K [4].

Odtworzenie temperatury wrzenia wody przy ciśnieniu bliskim atmosferycznemu realizuje się za pomocą aparatu zwanego hipsometrem.

Zamiast temperatury wrzącej wody mierzy się w tym urządzeniu temperaturę skraplania pary wodnej, na którą nie wpływają zanieczyszczenia wody. Woda znajduje się w dolnej części zbiornika i pod wpływem ogrzewania przez grzejnik elektryczny - paruje. Termometr umieszczony w tym aparacie jest omywany prawie na całej długości przez parę nasyconą z wody destylowanej. Dokładność odtworzenia temperatury wrzenia wody w tym urządzeniu wynosi $\pm 0,05$ K. Jeżeli wystarcza dokładność $\pm 0,1$ K, można sprawdzany czujnik zanurzać bezpośrednio we wrzącej wodzie destylowanej.

Odtworzenie temperatury krzepnięcia metali realizuje się w elektrycznym piecu rurowym ustawionym pionowo, o długości min. 600 mm i prześwicie ok. 65 mm. Metal stapiany jest w tyglu grafitowym. Czujnik temperatury musi być zanurzony w metalu tak głęboko, aby można było pominąć błędy wynikające z wymiany ciepła przez nie zanurzoną część czujnika. Przy wzorcowaniu termoelementów o średnicach 0,5 – 1 mm tygiel musi mieć min. 160 mm długości i średnicę wewnętrzną 35 mm. Przy wzorcowaniu czujników termometrów rezystancyjnych wymiary tygla w każdym kierunku powinny być odpowiednio większe [4].

Podgrzany czujnik temperatury należy powoli zanurzać do metalu podgrzanego ok. 10 K powyżej punktu krzepnięcia. Chłodzenie ciekłego metalu powinno przebiegać z szybkością 0,1 - 0,2 K/min. Podczas chłodzenia należy wykonywać pomiary temperatury w równych odstępach czasu, np co 30 lub 60 sekund. Wyniki pomiarów są wiarygodne, gdy podczas krzepnięcia metalu temperatura nie zmienia się przynajmniej przez 5 minut [4].

Wzorcowania termometru optycznego dokonuje się przez pomiar nim temperatury ciała doskonale czarnego, której wartość jest określona. Do sprawdzania pirometrów częściowego promieniowania często używana jest specjalna lampa wolframowa, z paskiem wolframu o określonych wymiarach, żarzoną prądem elektrycznym. Temperatura żarzenia jest określona przez wzorcowanie i podana w funkcji natężenia prądu żarzenia. Określając piometrem sprawdzanym temperaturę zaznaczonego miejsca na pasku wolframowym można sprawdzić jego wskazania [3].

3. Metody prowadzenia pomiarów temperatury

Pomiar temperatury jest pomiarem trudnym. Dokładność wykonania pomiaru zależy m.in. od wyboru właściwego w danych warunkach rodzaju termometru i jego dokładności oraz od sposobu prowadzenia pomiaru.

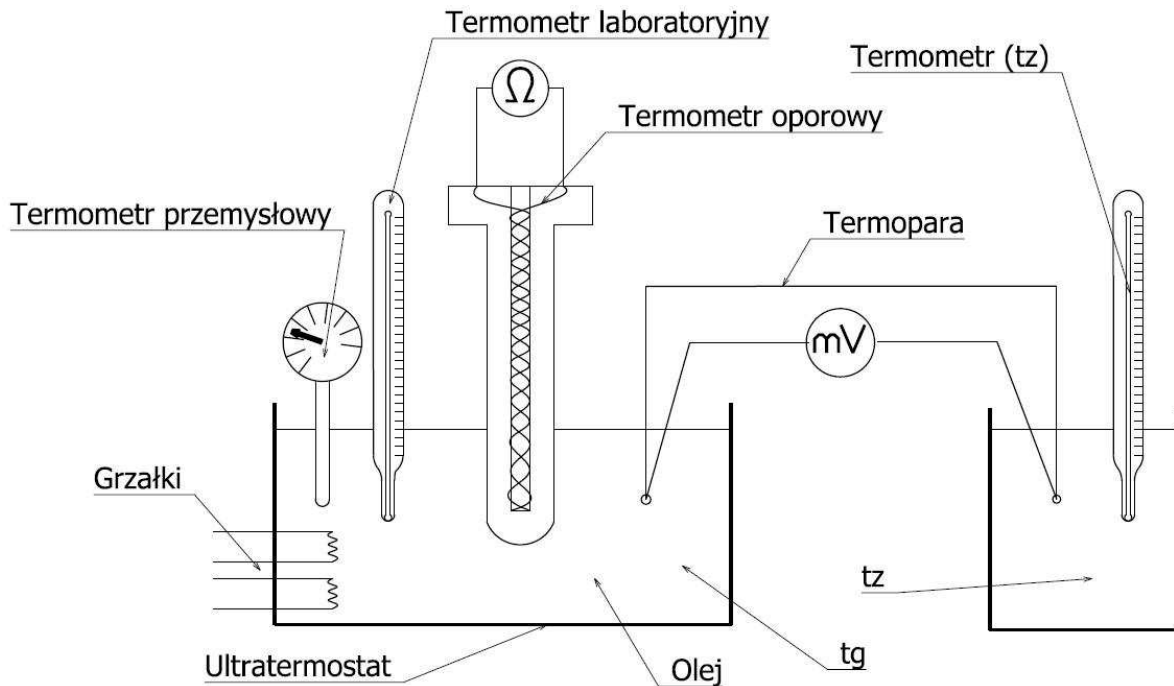
Pomiary temperatur można podzielić na dwie grupy:

- pomiar temperatury metodą bezpośredniego pomiaru zmieniających się właściwości fizycznych badanego ciała (np. pomiar pirometrami),
- pomiar temperatury przez wprowadzenie do badanego ośrodka ciała termometrycznego, którego zmieniająca się z temperaturą wybrana własność fizyczna umożliwia określenie temperatury ciała termometrycznego będącej jednocześnie odwzorowaniem temperatury ośrodka.

Przy umieszczeniu termometru należy pamiętać, że jest on źródłem zaburzeń istniejącego pola temperatury i zaburzenia te należy zminimalizować. Jednocześnie należy dążyć do tego, aby temperatura ciała termometrycznego była jak najbardziej zbliżona do temperatury badanego ośrodka. Szczególnie ważne jest poprawne umieszczenie termometru i właściwe przeprowadzenie pomiaru, w przeciwnym bowiem wypadku nawet zastosowanie najlepszych metod pomiarowych i najdoskonalszej aparatury nie zapewni oczekiwanej dokładności pomiaru [3].

///. Wykonanie ćwiczenia

1. Schemat układu pomiarowego



2. Przeprowadzenie pomiaru

Przed przystąpieniem do pomiaru należy włączyć ultratermostat, włożyć badane termometry w przeznaczone na nie otwory w wieku, włączyć termometr oporowy i sprawdzić, czy w termosie znajduje się wystarczająca ilość wody i lodu, umieścić w termosie zimny koniec termopary.

Wykonujemy pomiar trzech różnych temperatur, ustalonych za pomocą ultratermostatu. Po ustaleniu się temperatury w zbiorniku, odczytuje się kolejno temperatury wskazywane przez wszystkie termometry: dwa termometry techniczne, termometr laboratoryjny, manometryczny, oporowy i termoparę. Należy odczytać również temperaturę zimnego końca termopary, temperaturę otoczenia t_0 , wysokość wystającego słupka cieczy termometrycznej w termometrze laboratoryjnym - (w stopniach skali termometru) oraz klasy i zakresy wszystkich termometrów.

3. Opracowanie wyników

Dla termometru laboratoryjnego wyznaczamy poprawkę na wystający słupek cieczy termometrycznej według wzoru (7), przyjmując $t_s = t_0$ i $p = 0,00016K^{-1}$ a następnie temperaturę rzeczywistą t_r według wzoru (8). Sprawdzamy, czy pozostałe termometry mieszczą się w swoich klasach tzn. czy spełniona jest nierówność:

$$t_r - t_w < \sigma * (t_k - t_p) * 10^{-2}$$

gdzie:

σ - klasa przyrządu,
 $(t_k - t_p)$ - zakres przyrządu.

Przy wyznaczaniu temperatury za pomocą termometru rezystancyjnego korzystamy ze wzoru (11) przyjmując temperaturę odniesienia równą $0^\circ C$,

$\alpha = 0,00392 \frac{1}{^\circ C}$, $R_0 = 100\Omega$, lub ze wzoru:

$$T = 29,1695 + 2,32685R + 0,001128R^2$$

gdzie:

T - temperatura bezwzględna czujnika [K],
 R - rezystancja czujnika [Ω].

4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać krótki opis przeprowadzonego ćwiczenia, zestawienie uzyskanych wyników pomiaru temperatury oraz sprawdzenie, czy termometry mieszczą się w swoich klasach.

IV. Przykładowe pytania

1. Zdefiniować pojęcia temperatury i jej jednostkę w układzie jednostek miar SI.
2. Scharakteryzować skale wykorzystywane przy pomiarze temperatury.
3. Opisać międzynarodową praktyczną skalę temperatury i zdefiniować 5 punktów stałych wykorzystywanych przy jej odtwarzaniu (bez podawania wartości temperatur).
4. Podać podział przyrządów wykorzystywanych do pomiarów temperatury.
5. Scharakteryzować rodzaje termometrów stykowych.
6. Scharakteryzować błędy występujące przy pomiarach temperatury termometrami stykowymi.
7. Scharakteryzować czujniki termometrów elektrycznych.
8. Scharakteryzować kompensacyjną metodę pomiaru temperatury termometrami elektrycznymi.
9. Omówić działanie pirometru z zanikającym włóknem.
10. Scharakteryzować metody sprawdzania termometrów.

Literatura:

- [1] L. Kołodziejczyk, S. Mańkowski, M. Rubik „Pomiary w inżynierii sanitarnej” Arkady, Warszawa 1980,
- [2] L. Michalski, K. Eckersdorf „Pomiary temperatury” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969,
- [3] M. Mieszkowski „Pomiary cieplne i energetyczne” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1981,
- [4] S. Wiśniewski „Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.

