



PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH METOD I TECHNIK POMIARU TEMPERATURY

Temperatura jest jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących stan fizyczny materii. Obok ciśnienia, wartość temperatury jest miarą „jakości” materii. Z tego powodu jest ona wykorzystywana między innymi jako jeden z głównych parametrów kontrolujących poprawności pracy maszyn cieplnych oraz przebiegu poszczególnych etapów procesów technologicznych w przemyśle.

Z reguły każdy pomiar temperatury wymaga indywidualnego rozwiązania i jest zadaniem optymalizacyjnym ze względu na z góry określone warunki przeprowadzenia pomiaru, wykonalność techniczną i koszty.

Poprawne przeprowadzenie pomiaru temperatury wymaga wiadomości z wymiany ciepła, metodach i technikach pomiaru temperatury oraz rodzajach termometrów i ich właściwościach. Poniżej podano podstawowe wiadomości dotyczące termometrii. Zagadnienia wymiany ciepła zostały jedynie uwzględnione w zakresie niezbędnym do określenia błędów pomiaru temperatury.

1.1. TEMPERATURA I SKALA TEMPERATURY

Pojęcie „temperatura” nie jest pojęciem oczywistym i wymaga ścisłej definicji. W literaturze temperatura często jest powiązana z przymiotnikiem, na przykład: temperatura empiryczna, temperatura absolutna, temperatura spiętrzenia (całkowita), temperatura spoczynkowa, temperatura rotacyjna, temperatura wibracyjna, temperatura translacyjna, temperatura elektronowa, temperatura promieniowania, itd.

Od współczesnego inżyniera, żyjącego w epoce atomu, komputerów i lotów kosmicznych, wymaga się, aby swobodnie identyfikował rodzajów temperatur w konkretnych sytuacjach, nawet w przypadku, gdy przy definiowaniu temperatury brakuje przymiotnika. Wymienione rodzaje temperatur zostały zdefiniowane poniżej.

Temperatura empiryczna - jest to wielkość termodynamiczna, charakteryzująca stan równowagi termodynamicznej układu makroskopowego. Jest ona jednakowa dla wszystkich części układu izolowanego, znajdującego się w stanie równowagi termodynamicznej. Prawdziwe jest również twierdzenie: aby dwa układy termiczne jednorodne były w równowadze diatermicznej, potrzeba i wystarcza, by ich temperatury empiryczne były równe. Zależność pozwalającą wyrazić temperaturę empiryczną przez inne parametry nazywa się równaniem stanu. Dla gazu doskonałego może ono mieć postać $\theta = pV/mR$, $\theta = \ln pV/mR$ lub bardziej skomplikowaną. Dla cieczy nie sformułowano praktycznego równania stanu. Równanie Van der Waalsa pozwala jedynie w sposób jakościowy ocenić stan cieczy poniżej punktu krytycznego. Dla ciała stałego równanie stanu wyraża zależność modułu sprężystości w prawie Hooke’a od temperatury i ciśnienia. Na przykład zależność modułu Younga od tych wielkości $E = f(\theta, p)$. Równanie stanu dla promieniowania stanowi prawo Plancka. Postać równania stanu zależy od przyjętej skali temperatury, tj. od wyboru funkcji θ . Gdy ustalimy równanie stanu dla jednego układu, możemy wyznaczyć θ dla tego układu z pomiaru innych parametrów wchodzących do równania stanu.

Temperatura bezwzględna (absolutna) - jest to temperatura wyrażona w skali, której zerem jest temperatura niższa o 273.16 K od temperatury punktu potrójnego wody. Parametry punktu potrójnego substancji (rys.1.2) jednoskładnikowej są niezmiennicze.

Temperatura spoczynkowa - jest to temperatura poruszającego się z prędkością w płynie, mierzona przez obserwatora poruszającego się w płynie z taką samą prędkością i w tym samym kierunku. Obserwator jest nieruchomy w stosunku do płynu. Praktyczny sposób pomiaru temperatury spoczynkowej T pokazano na rys.1.1.

Temperatura spiętrzenia (całkowita) – jest to temperatura płynu poruszającego się z prędkością w , mierzona natychmiast po wyhamowaniu do prędkości $w = 0$. Temperatura spiętrzenia jest mierzona przy założeniu, że objętość badanego płynu stanowi układ adiabatyczno-izentropowy i nie jest w nim wykonywana praca efektywna. Kiedy przez T oznaczymy temperaturę spoczynkową płynu, a przez c_p jego ciepło właściwe, wówczas temperatura spiętrzenia $T_c = T_0$, jest równa

$$T_c = T_0 = T + \frac{w^2}{2 \cdot c_p} \quad (1.1)$$

Z zależności (1.1) wynika, że temperatura spiętrzenia jest większa od temperatury spoczynkowej ($w=0$) o przyrost ΔT wywołany zmianą energii kinetycznej płynu ($m \cdot w^2/2$) w ciepło ($m \cdot c_p \cdot \Delta T$) przy jego wyhamowaniu do prędkości równej zero. Praktyczny sposób pomiaru temperatury spiętrzenia pokazano na rys.1.1.

Przykładowo: powietrze ($c_p \cong 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) o temperaturze spoczynkowej $T = 300 \text{ K}$, poruszające się z prędkością 3600 km/h ma temperaturę spiętrzenia

$$T_c = T_0 = T + \frac{w^2}{2 \cdot c_p} = 300\text{K} + \frac{\left(1000 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 300\text{K} + 500\text{K} = 800\text{K}$$

i taką temperaturę należy podstawić do prawa Newtona

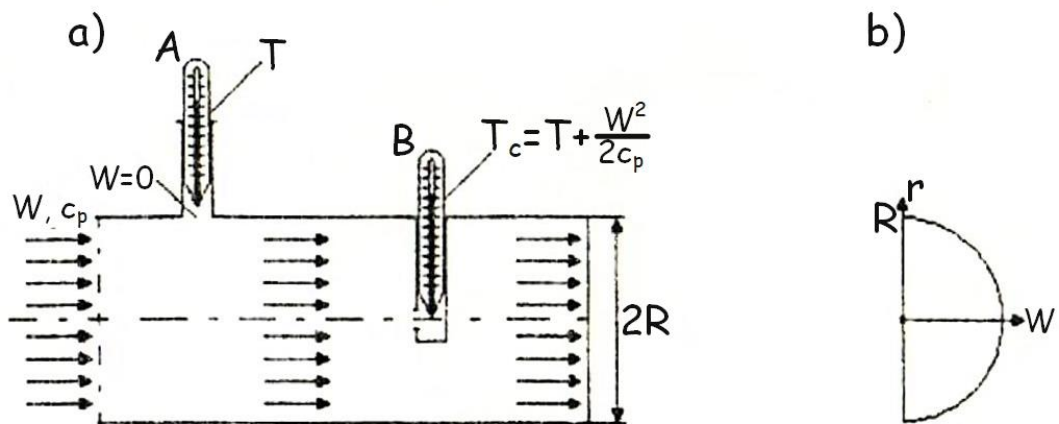
$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_p - T_{sc}) \quad (1.2)$$

w miejsce $T_p = T_c = 800\text{K}$ przy obliczaniu gęstości konwekcyjnego strumienia ciepła \dot{q} , wymienianego między płynem o temperaturze T_p , a ustawioną prostopadle do kierunku przepływu ścianką o temperaturze T_{sc} . Gdyby ścianka była ustawiona równolegle do kierunku przepływu wtedy należy w (1.2) podstawić $T_p = T = 300 \text{ K}$. Dla innych wariantów konfiguracji kierunku przepływu i położenia ścianki temperaturę T_p , oblicza się z zależności (1.1), podstawiając zamiast w wartość jej składowej normalnej w stosunku do powierzchni ścianki.

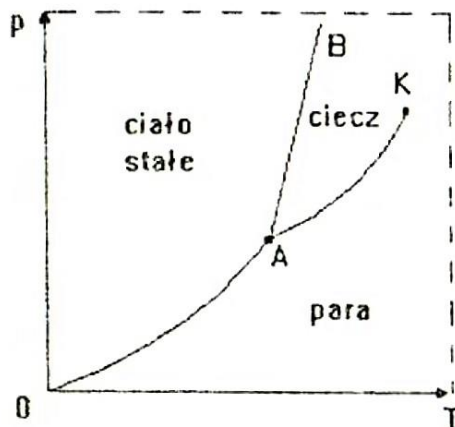
Temperatura promieniowania - wielkość umowna, charakteryzująca całkowitą panchromatyczną intensywność strumienia promieniowania danego ciała. Mierząc całkowitą panchromatyczną intensywność strumienia promieniowania ciała traktujemy je jako ciało czarne. Temperaturę promieniowania danego ciała obliczamy z prawa Stefana - Boltzmana.

Temperatura elektronowa i sieci - w stanie równowagi termodynamicznej są one takie same, natomiast są one różne w stanach nierównowagowych. Taka sytuacja zachodzi, gdy stała czasowa dojścia do równowagi podukładu elektronowego ciała jest dużo mniejsza od stałej czasowej ustalania się równowagi pomiędzy elektronami a siecią. W praktyce tego typu efekty obserwuje się w metalach i półprzewodnikach poddanych impulsowym zmianom warunku brzegowego (np. strzał z lasera w powierzchnię).

Temperatura rotacyjna, wibracyjna, translacyjna - są to umowne temperatury związane z poszczególnymi stopniami swobody cząstki, np. w układzie gazowym.



Rys.1.1 Rysunek ilustrujący: a) sposób pomiaru temperatury spoczynkowej (termometr A) i spiętrzenia (termometr B) płynu; b) rozkład prędkości płynu w funkcji promienia.



| Substancja | Punkt potrójny A | | Punkt potrójny B | |
|------------------|------------------|--------|------------------|--------|
| | p[MPa] | T[K] | p[MPa] | T[K] |
| CO ₂ | 0,518 | 216,65 | 7,38 | 304,15 |
| H ₂ O | 610,7 | 273,16 | 22,13 | 647,30 |

Rys.1.2 Wykres stanu układów jednoskładnikowych: OA - krzywa sublimacji; AK - krzywa wrzenia; AB - krzywa topnienia; A - punki potrójny (równowaga fazy stałej, ciekiej i gazowej); K - punki krytyczny (koniec równowagi ciecz - para).

Obserwacje zmian objętości gazów i cieczy pod wpływem temperatury były podstawą pierwszych definicji skali temperatury. Następnym krokiem w tym kierunku było przyjęcie, na mocy Uchwały Międzynarodowego Komitetu Miar i Wąg w Paryżu, wodoru jako ciała termometrycznego. Zmiany ciśnienia wodoru przy stałej objętości były podstawą do określenia nowej skali temperatury. Przedziałem podstawowym tej skali był przedział między temperaturą równowagi układu „woda - lód” i układu „woda - para wodna” w temperaturze wrzenia, przy ciśnieniu jednej atmosfery fizycznej. Przedział między temperaturowymi punktami stałymi („woda-lód”, „woda - para”) podzielono na 100 równych części, przypisując pierwszej z nich wartość liczbową równą 0. Skalę tą nazwano skalą Celsjusza. Taki stan trwał do 1948 roku. Następnie kolejne uchwały międzynarodowych organizacji, jakimi są Generalna Konferencja Miar i Wąg oraz Międzynarodowy Komitet Miar i Wąg, ustaliły zasady najnowszej skali temperatury, nazwanej Międzynarodową Praktyczną Skalą Temperatury z 1968 roku, w skrócie MPST-68. Następnie skala ta została rozszerzona w zakresie od 630,74°C do 1064,43°C co doprowadziło do utworzenia rozszerzonej praktycznej stali temperatury (EPT-76). IPTS-68 i EPT-76

zostały zastąpione przez Międzynarodową Skalę Temperatury z 1990 roku, zwaną również ITS-90. Różnice pomiędzy wartościami ITS-90 i ITS-68 nie mają praktycznego wpływu na pomiary przemysłowe.

Skalę ITS – 90 definiuje się poprzez szereg punktów stałych temperatury (tabela 1.1.) które definiują podstawowe standardy oraz dają szereg równań interpolacyjnych umożliwiających obliczanie temperatury między punktami stałymi. Powyżej temperatury topnienia srebra do pomiaru temperatury stosuje się prawo Plancka. ITS-90 charakteryzuje się reprezentowaniem skali termodynamicznej z niepewnością pomiaru ± 2 mK dla zakresu od 1 K do 273 K, wzrastającą do ± 7 mK przy 900 K. Jednostką ITS – 90 jest kelwin (symbol K). Jeden kelwin jest zdefiniowany jako $1/273,16$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

ITS – 90 definiuje również skalę Celsjusza na podstawie skali termodynamicznej, przy czym między temperaturą wyrażoną w stopniach Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$), a temperaturą termodynamiczną w kelwinach istnieje relacja

$$t[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273.15 \quad (1.3)$$

Oznacza to, że położenie punktu 0°C nie uległo zmianie, tj. odpowiada jak poprzednio punktowi równowagi wody w stanie ciekłym i stałym. W skali Celsjusza temperatura punktu potrójnego wody wynosi $0,01^{\circ}\text{C}$.

Odtworzenie temperatury pomiędzy punktami stałymi dla ITS-90 (tabela 1.1) przeprowadza się z następujący sposób:

1. w zakresie od 0,65 K do 5 K przy pomocy zależności temperatura-ciśnienie dla par ^3He i ^4He ;
2. w zakresie od 3 K do 24,5561 K (punkt potrójny neonu) wykorzystywany jest termometr gazowy wypełniony helem (^3He lub ^4He) o stałej objętości. Kalibracja odbywa się w trzech zdefiniowanych punktach stałych według procedury dedykowanej temu termometrowi.
3. w zakresie od 13,8033 K (punkt potrójny wodoru) do $961,78^{\circ}\text{C}$ (punkt zamarzania srebra) standardowym instrumentem do pomiaru temperatury jest rezystancyjny termometr platynowy. Kalibracja odbywa się w zdefiniowanych punktach stałych według procedury dedykowanej temu termometrowi. W celu poprawnej kalibracji platynowy czujnik rezystancyjny musi być wykonany z czystej, pozbawionej naprężeń i wygrzanej platyny. Dla zakresu od 13,8033 K do 273,16 K (punkt potrójny wody) kalibrację wykonuje się przez następujące punkty potrójne: wodoru (13,8033 K), neonu (24,5561 K), tlenu (54,3584 K), argonu (83,8058 K), rtęci (234,3156 K) oraz wody (273,16 K). Dodatkowo do kalibracji wykorzystuje się pomiar termometrem gazowym dla temperatur 17 K i 20,3 K. Dla zakresu 0°C to $961,78^{\circ}\text{C}$ kalibrację wykonuje się dla punktu potrójnego wody oraz punktów zamarzania cyny ($231,928^{\circ}\text{C}$), cynku ($419,527^{\circ}\text{C}$), aluminium ($660,323^{\circ}\text{C}$) i srebra ($961,78^{\circ}\text{C}$).
4. Powyżej punktu zamarzania/topnienia srebra temperatura definiowana jest zgodnie z prawem Plancka. W celu definicji temperatury korzysta się z zależności:

$$\frac{L_{\lambda}(T)}{L_{\lambda}(T_x)} = \frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_{Au}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

gdzie T_x oznacza temperaturę zamarzania srebra Ag, złota Au lub miedzi Cu. $L_{\lambda}(T)$ i $L_{\lambda}(T_x)$ oznaczają odpowiednio monochromatyczne gęstości strumienia promieniowania emitowanego przez ciało czarne w temperaturze T i w temperaturze T_x krzepnięcia (Ag, Au lub Cu), a stała $c_2 = 14388 \mu\text{m}\cdot\text{K}$.

W praktyce przemysłowej można spotkać termometry wyskalowane w stopniach Celsjusza, Kelwina, Farenheita i Rankina, w tablicy 1.2 zestawiono podstawowe dane dotyczące tych skal temperatury w stosunku do skali Celsjusza.

W 2000 roku wprowadzono dodatkową skalę temperatur do pomiaru w bardzo niskich temperaturach (PLTS-2000) w zakresie od 0 K do 1 K. W praktyce dla pomiarów inżynierskich stosuje się definicję skali temperatury zgodną z ITS – 90.

Tablica 1.1 Definicyjne punkty stałe Międzynarodowej Skali Temperatury ITS-90.

| Lp. | Rodzaje punktu (stan równowagi) | Temperatura [K] | Temperatura [°C] |
|-----|---|-----------------|--------------------|
| 1. | Vapour-pressure point of helium | 3 to 5 | -270,15 to -268,19 |
| 2. | Punkt potrójny wodoru | 13,81 | -259,34 |
| 3. | Punkt równowagi fazy ciekłej i pary wodór przy 33330.6 Pa | 17,042 | -256,108 |
| 4. | Punkt potrójny neonu | 24,5561 | -248,5939 |
| 5. | Punkt potrójny tlenu | 54,3584 | -218,7916 |
| 6. | Punkt potrójny argonu | 83,8058 | -189,3442 |
| 7. | Punkt potrójny rtęci | 234,3156 | -38,8344 |
| 8. | Punkt potrójny wody | 273,16 | 0,01 |
| 9. | Punkt topnienia galu | 302,9146 | 29,7646 |
| 10. | Punkt zamarzania indu | 429,7485 | 156,5985 |
| 11. | Punkt zamarzania cyny | 505,078 | 231,928 |
| 12. | Punkt zamarzania cynku | 692,667 | 419,527 |
| 13. | Punkt zamarzania aluminium | 933,473 | 660,323 |
| 14. | Punkt zamarzania srebra | 123,94 | 961,78 |
| 15. | Punkt zamarzania złota | 1337,33 | 1064,18 |
| 16. | Punkt zamarzania miedzi | 1357,77 | 1084,62 |

*) przy ciśnieniu $p_n = 101325$ Pa;

Tablica 1.2 Podstawowe dane dotyczące skal temperatury.

| Rodzaj punktu termometrycznego | Skala Celsjusza | Skala Kelwina | Skala Farenheita | Skala Rankina |
|---|---|---------------|------------------|---------------|
| Zero bezwzględne | 273,15°C | 0 K | -459,67°F | 0°R |
| Punkt krzepnięcia wody ($p_n = 101325$ Pa) | 0°C | 273,15 K | 32°F | 491,67°R |
| Punkt wrzenia wody ($p_n = 101325$ Pa) | 100°C | 373,15 K | 212°F | 671,67°R |
| Wzory translacyjne: | $T[K] = t[°C] + 273,15$ $t[°C] = \frac{5}{9}(t[°F] - 32)$ $t[°C] = t[°R] - 459,6$ | | | |

1.2. UWAGI OGÓLNE O METODACH I TECHNIKACH POMIARU TEMPERATURY

Metody pomiaru temperatury ciał stałych, cieczy i gazów można podzielić na stykowe i bezstykowe.

Stykowe metody pomiaru temperatury charakteryzują się tym, że czujnik bezpośrednio styka się z badanym ośrodkiem, którego temperaturę należy określić (ciało stałe, ciecz, gaz).

Bezstykowe metody pomiaru temperatury charakteryzują się tym, że ośrodek, którego temperaturę należy określić nie styka się z czujnikiem temperatury, a czujnik reaguje na wartość intensywności promieniowania temperaturowego emitowanego przez badany ośrodek. Wartość tego promieniowania jest zależna od temperatury ośrodka.

Inny podział metod pomiaru temperatury opiera się na wyróżnieniu rodzaju efektu podlegającego zmianie ze zmianą temperatury i związanego z czujnikiem temperatury lub badanym ośrodkiem. Na przykład, jeżeli temperaturę mierzy się termoelementem (czujnik) to napięcie termoelektryczne czujnika jest zależne od temperatury. Jeżeli temperaturę mierzy się termistorem to wraz z temperaturą zmienia się jego rezystancja.

Kolejny podział metod pomiaru dokonujemy ze względu na ruch ciała, którego temperaturę określamy (ciało w ruchu lub w spoczynku). Możemy także dzielić metod pomiaru na dotyczące ustalonej w czasie temperatury i w stanie nieustalonym.

Możliwości różnych, najpopularniejszych metod pomiaru temperatury powierzchni ciał stałych, z uwzględnieniem przedstawionego powyżej podziału, zebrano i zestawiono w tablicy 1.3, w tablicy 1.4 przedstawiono podstawowe czujniki stosowane najczęściej do pomiaru temperatury, zasadę ich działania oraz zakres stosowalności.

Metoda związana z wykorzystaniem efektu termoelektrycznego. Polega na pomiarze siły termoelektrycznej STE (napięcia termoelektrycznego), która powstaje między dwoma różnymi metalami, ze spoinami w różnej temperaturze. Różnicowa STE zmienia się wraz ze zmianą temperatury obu spoin.

Metoda związana z wykorzystaniem zmiany rezystancji elektrycznej materiału w funkcji temperatury. Polega na pomiarze rezystancji elektrycznej czujnika temperatury, umieszczonego w miejscu (punkt, powierzchnia, objętość),

którego temperaturę należy określić.

Metoda związana z wykorzystaniem zmiany gęstości strumienia promieniowania termicznego z powierzchni w funkcji temperatury. Polega na pomiarze natężenia promieniowania całkowitego, monochromatycznego, określonego pasma lub pasm promieniowania. Główną zaletą tej metody jest to, że pomiar jest bezstykowy. W ten sposób unika się obliczeń wartości błędów związanego z zaburzeniem pola temperatury badanego obiektu przez czujnik w miejscu jego instalacji. Obiekt, którego temperatura powierzchni jest określana, może zmieniać położenie w stosunku do detektora od pojedynczych centymetrów do kilku metrów. Natomiast największą wadą jest to, że mierzona temperatura jest zazwyczaj obciążona błędem zależnym od wartości emisyjności badanej powierzchni. Generalnie pirometry są wzorcowane w oparciu o promieniowanie ciała czarnego ($\varepsilon = 1$), natomiast powierzchnia badanego obiektu ma zwykle $\varepsilon < 1$. Z tego powodu temperatura rejestrowana przez tak wywzorcowany miernik jest zaniżona. Emisyjność jest parametrem termofizycznym, którego wartość w warunkach rzeczywistych może zmieniać się w szerokim zakresie. Jego wartość zależy od wartości temperatury, intensywności korozji powierzchni, czystości powierzchni (np. obecność smaru), itd. Czasem, celem wyeliminowania błędów pomiaru związanego z wpływem nieznanego lub znanej przybliżonej wartości emisyjności powierzchni zaleca się pokrycie jej sadzą. Pokryci szadzą eliminuje

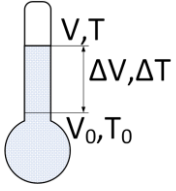
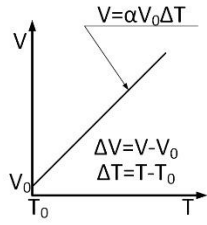
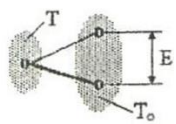
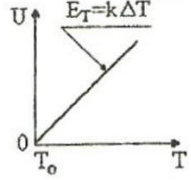
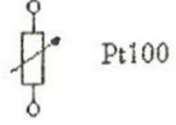
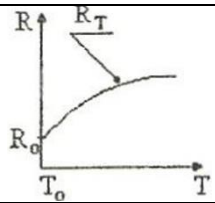
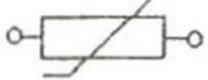
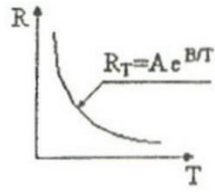
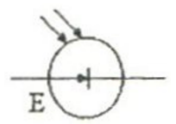
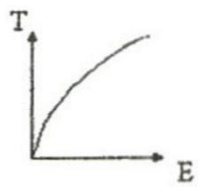
błąd związany z wpływem nieznannej wartości emisyjności, ale z drugiej strony powoduje zmianę gęstości strumienia ciepła wymienianego przez promieniowanie z otoczeniem, a zatem rzeczywista temperatura powierzchni ciała będzie w tym przypadku niższa niż przed pokryciem jej sadzą. W przypadku, kiedy w rachubę wchodzi jedynie kontrola temperatury procesu technologicznego, tj. utrzymanie jej stałej wartości, znajomość emisyjności nie jest istotna.

Tabela 1.3. Metody i techniki stosowane do pomiaru temperatury powierzchni ciał stałych

| Wielkość fizyczna podlegająca zmianie w zależności od zmiany temperatury i technika pomiaru | Temperaturowy zakres pomiaru [K] | Dokładność [%] |
|---|----------------------------------|----------------|
| SIŁA TERMIELEKTRYCZNA (SEM) | | |
| - dwa przewody z różnych metali | 70÷1900 | 1 |
| - jeden przewód + ciało jako drugi materiał | | |
| - cienka warstwa metalu (1 materiał) naniesiona na powierzchnię ciała (2 materiał) | | |
| - dwa ciała z różnych metali stykające się ze sobą | | |
| REZYSTANCJA ELEKTRYCZNA | | |
| - trójwymiarowa cewka | 30÷870 | 1 |
| - dwuwymiarowa siatka, cewka lub taśma | 30÷870 | 1 |
| - jednowymiarowy przewód | 30÷870 | 1 |
| - termistor (w kształcie kulistym itp.) | 250÷870 | 1 |
| PROMIENIOWANIE TERMICZNE | | |
| -porównanie jasności optycznych grzanego odniesienia z powierzchni obiektu | 320÷2270 | 1÷2 |
| - pomiar całkowitego promieniowania lub w paśmie | 290÷4270 | 1÷2 |
| - pomiar emitowanego promieniowania podczerwonego | >370 | 1÷2 |
| - pirometr odbiciowy | >570 | 1÷2 |
| - pirometr dwubarwny | 470÷4270 | 1÷2 |
| - termowizja | 250÷1900 | - |
| INNE TECHNIKI | | |
| - rozszerzalność termiczna (termometr dylatacyjny, bimetal) | 400÷1200 | 2 |
| - częstotliwość rezonansowa kryształu piezokwarcu | 190÷520 | 0,01 |
| - kredki (nagła zmiana koloru substancji w znanej temperaturze) | 340÷940 | 2 |

| | | |
|--|----------|---|
| - farby (nagła zmiana koloru substancji w znanej temperaturze) | 310÷1620 | 2 |
| - wskaźniki topikowe (zmiana koloru po stopieniu się) | 330÷1700 | 2 |

Tabela 1.4. Podstawowe dane techniczne czujników najczęściej stosowanych do pomiaru temperatury.

| Lp. | Typ detektora temperatury | Symbol detektora i typowy zakres mierzonej temperatury | Wielkość wyjściowa z detektora i jej związek z temperaturą | Charakterystyka statyczna detektora |
|-----|--|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Szklany, napełniony cieczą termometryczną (rtęć, alkohole, pentan, eter...) |  <p>73÷273K -200÷500°C</p> | Zmiana ΔV cieczy termometrycznej $\Delta V = \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T$ α – pozorny współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy; V – objętość zbiornika termometru; ΔT – zmiana temperatury cieczy. |  |
| 2 | Termoelement |  <p>150÷1900 K -123÷1627°C</p> | Siła termoelektryczna E_T termoelementu $E_T = k \cdot (T - T_0) = k \cdot \Delta T$ k – współczynnik materiałowy; T – temperatura spoiny pomiarowej; T_0 – temperatura spoiny odniesienia. |  |
| 3 | Opornik termoelektryczny metalowy (platyna, miedź, nikiel...) |  <p>50÷1100 K -223÷827°C</p> | Rezystancja R_T opornika termoelektrycznego w temperaturze T $R_T = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$ R_0 – rezystancja opornika w temperaturze T_0 ; A, B – stałe wzorcowe opornika. |  |
| 4 | Opornik termoelektryczny półprzewodnikowy (termistor) |  <p>193÷573 K -80÷300°C</p> | Rezystancja R_T termistora w temperaturze T $R_T = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)$ A – rezystancja termistora dla $T = \infty$; B – stała zależna od materiału termistora. |  |
| 5 | Fotoelement (fotoogniwo, fotodioda o jednym złączu) |  <p>323÷2273 K -80÷300°C</p> | Prąd I w obwodzie fotodiody $I = k \cdot E; E = f(T)$ k – współczynnik zależny od materiału i konstrukcji fotodiody; E – natężenie oświetlenia fotodiody; T – temperatura obiektu badanego. |  |


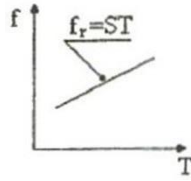
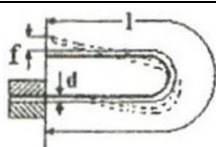
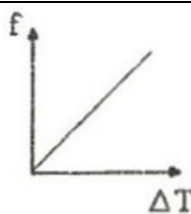
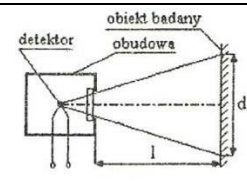
| | | | | |
|---|--------------------|---|---|---|
| 6 | Rezonator kwarcowy |  263÷328 K -10÷55°C | Częstotliwość rezonansowa f_r rezonatora $f_r = ST$ S – stały współczynnik; T – temperatura rezonatora. |  |
| 7 | Bimetal |  473÷673 K 200÷400°C | Przesunięcie f bimetalu $f = 10^{-4} \cdot K \cdot \frac{l^2}{2 \cdot d} \cdot \Delta T$ K – ugięcie właściwe [K^{-1}]; ΔT – różnica temperatur [K]; l, d – wymiary w [mm]. |  |

Tabela 1.5. Właściwości i dane techniczne pirometrów.

| Typ pirometru | Obszar pomiarowy [K] | Dokładność | Czas wartości ¹⁾ 98% [s] | Współczynnik odległościowy ²⁾ |
|--|-----------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Radiacyjne | | | | |
| 1. Soczewkowe | | | | |
| a) soczewka szklana | 970÷2270 | ±15÷±25 | 0,5÷2 | 7÷20 (50) |
| b) soczewka kwarcowa | 670÷1470 | | | |
| c) soczewka z fluoru | 320÷870 | | 5 | |
| 2. Ze światłowodem | 970÷2270 | | 0,5÷2 | - |
| 3. Zwierciadłowe | -230÷870 | ±2% | 2÷5 | 7÷20 (40) |
| Fotoelektryczne | | | | |
| 1. Monochromatyczne | 320÷2700 | ±2÷±1,5% | 0,001 ³⁾ | 20÷300 |
| 2. Pasmowe | | | | |
| Monochromatyczne z znikającym włóknem | | | | |
| Monochromatyczne znikającym włóknem | 970÷1770 1670÷2270 | ±6÷±15 K | - | 130 (mikropirometr 5000) |
| Dwubarwne | | | | |
| 1. Ręcznie regulowane | 970÷2470 | ±2 K | - | 20÷50 |
| 2. Samoczynne elektryczne | 1070÷2470 | ±1÷±1,5% | 0,001 ³⁾ | |
| 3. Samoczynne elektromechaniczne | | | - | |
| ¹⁾ Czas wartości 98 % jest to czas, po którym wskazania pirometru osiągają 98 % wartości odpowiadającej stanowi ustalonemu, przy założeniu, że sygnał wejściowy (wymuszenie) ma postać skoku jednostkowego 1(t). ²⁾ Współczynnik odległościowy jest to stosunek odległości l przedniej krawędzi lunety pirometru od powierzchni badanej do minimalnej wymaganej średnicy powierzchni ciała badanego d (rys. ²⁾). ³⁾ Wartości nieuwzględniające bezwładności miernika. | | | |  rys. ²⁾ |

Również ośrodek między badaną powierzchnią a detektorem musi być w zasadzie przezroczysty dla pasma (pasem) promieniowania podlegającego (podlegających) pomiarowi. Zatem

niedopuszczalnym jest, aby badana powierzchnia była zanurzona w cieczy, a nawet pokryta filmem cieczowym. Detektor musi być tak zlokalizowany, aby „widział” badaną powierzchnię bezpośrednio lub przez okienko (np. powierzchnia tłoka w silniku spalinowym). W przypadku zastosowania okienka należy uwzględnić absorpcję promieniowania przez materiał okienka.

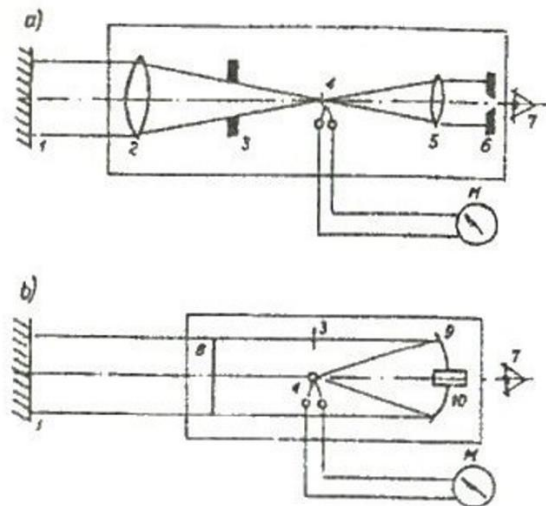
Zależnie od zasady działania rozróżnia się: pirometry radiacyjne, monochromatyczne z zanikającym włóknem, fotoelektryczne i dwubarwowe.

Podstawowe dane techniczne dotyczące własności i możliwości metrologicznych pirometrów przedstawiono w tablicy 1.5.

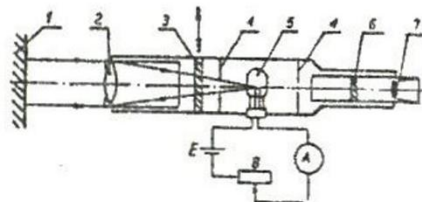
Piometr radiacyjny (rys.1.3) - jest to piometr całkowitego promieniowania. Jego działanie polega na zogniskowaniu (soczewka, lustro) na detektorze promieniowania panchromatycznego (w całym zakresie widmowym) emitowanego przez powierzchnię badanego obiektu. Aktualnie, w większości przypadków jako detektor promieniowania stosuje się termostos (zminiaturyzowane połączenie szeregowo kilku lub kilkunastu termoelementów). W różnych wersjach pirometry radiacyjne umożliwiają pomiar temperatury w przedziale $230 \div 2270\text{K}$ z dokładnością $\pm (15 \div 20)$ K. Są one stosowane, między innymi, do ciągłych pomiarów temperatury powierzchni ciał stałych (mogą być w ruchu), dużych objętości gazów, powierzchni wewnętrznych komór spalania silników (okienko).

Piometr monochromatyczny z zanikającym włóknem (rys.1.4) - jego zasada działania polega na porównaniu okiem luminacji świetlnej powierzchni ciała badanego z luminacją włókna żarówki pirometrycznej, która jest regulowana poprzez regulowany rezystor sterujący natężeniem przepływu prądu przez włókno. Prąd reguluje się dotąd aż pozornie zniknie obraz włókna żarówki na tle powierzchni ciała badanego. Włączony w obwód żarówki amperomierz jest wywzorcowany w jednostkach temperatury. Typowy zakres stosowalności wynosi $970 \div 2270$ K z dokładnością $\pm (5 \div 15)$ K. Ma coraz mniejsze zastosowanie z powodu subiektywności pomiaru. Ze względu na obsługę ręczną nie nadaje się do stosowania w układach automatycznych.

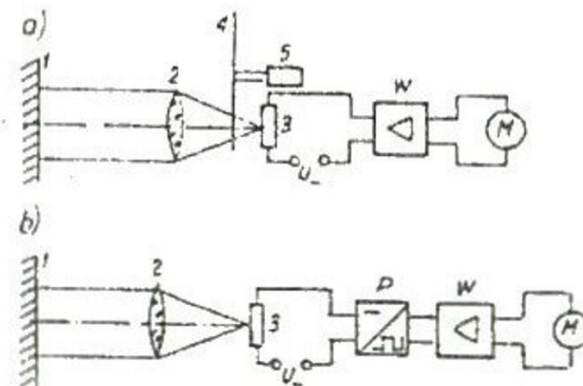
Piometr fotoelektryczny (pasmowy) - wykorzystuje się w nim zależność uśrednionej gęstości strumienia promieniowania w paśmie, którego zakres jest narzucony przez charakterystykę widma detektora, od temperatury. Typowymi czujnikami promieniowania w pirometrach pasmowych są fotorezystory wykonane z PbS, CdS, PbTe i PbSe oraz fotodiody germanowe lub krzemowe, elementy fotoemisyjne lub fotowoltaiczne. Zakres długości fal, na który reaguje detektor nazywa się pasmem pracy pirometru, np. dla fotodetektora z PbS wynosi ono $0.4 \div 4.7 \mu\text{m}$, a dla fotodiody germanowej $0.4 \div 1.7 \mu\text{m}$. Typowe rozwiązania metrologiczne tego typu pirometrów (rys. 1.3) zawierają przetwornik elektryczny lub modulator strumienia promieniowania. Niektóre wersje handlowe pirometrów są zaopatrzone w układ pamięciowy, umożliwiający zapamiętanie wartości maksymalnej temperatury. Typowy zakres pomiarowy pirometru pasmowego wynosi $320 \div 2270$ K, a niedokładność $\pm (0.2 \div 1.5\%)$ zakresu pomiarowego. Pirometry pasmowe stosuje się najczęściej w układach pomiaru i regulacji szybkozmiennej temperatury, np. przy nagrzewaniu indukcyjnym, przy walcowaniu blach na gorąco, itp.



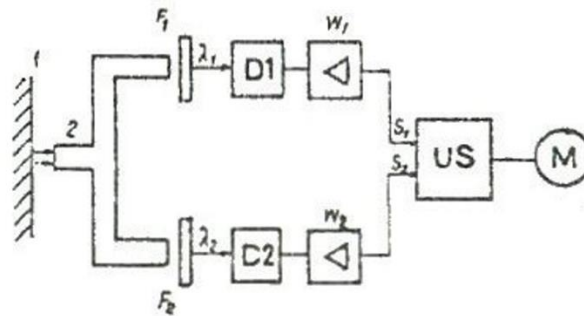
Rys.1.3 Schemat blokowy pirometru radiacyjnego: a) soczewkowego; b) zwierciadłowego. 1-ciało badane; 2-soczewka; 3,6-przesłona; 4-termostat; 5-okular; 7-obserwator; 8-przesłona przezroczysta; 9-zwierciadło; 10-wziernik; M-miernik.



Rys.1.4 Schemat budowy pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem:1-obiekt badany; 2-soczewka; 3-filtr szary; 4-przesłony; 5-żarówka; 6-filtr czerwony; 7-okular; 8-rezystor regulacyjny.



Rys. 1.5 Schemat budowy pirometru fotoelektrycznego: a) z modulacją strumienia; b) z przetwornikiem elektrycznym. 1-ciałobadane; 2-soczewka; 3-detektor fotoelektryczny; 4-wirująca tarcza z otworami; 5-silnik napędzający tarczę; P-przetwornik; W-wzmacniacz; M-miernik.

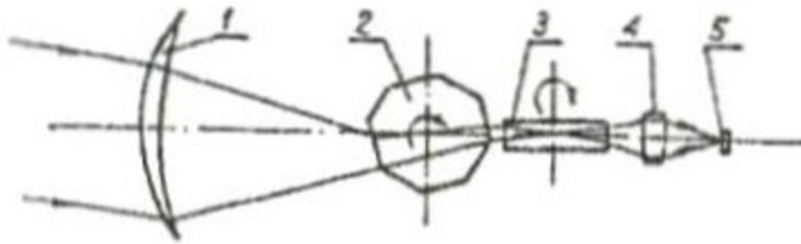


Rys. 1.6 Schemat budowy pirometru dwubarwowego: 1- obiekt badany; 2- światłowód typu „portki” F1, F2-filtry wąskopasmowe; W1, W2-wzmacniacze; S1, S2-sygnały wyjściowe ze wzmacniaczy; US-układ realizujący; funkcję S1/S2; M-miernik.

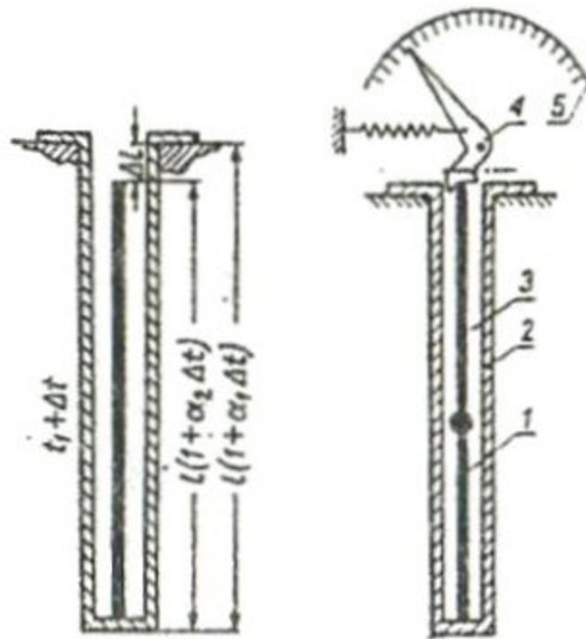
Pirometr dwubarwowy (rys.1.6) - pirometr, którego zasada działania polega na wykorzystaniu zależności ilorazu gęstości strumieni promieniowania bardzo wąskich pasm wokół długości fal λ_1 i λ_2 od temperatury. Zwykle przyjmuje się, że $\lambda_1 = 0.55 \mu\text{m}$ (barwa zielona) oraz $\lambda_2 = 0.65 \mu\text{m}$ (barwa czerwona). Rozwiązania konstrukcyjne tego typu pirometrów są różne, ale najczęściej do wydzielenia wąskich pasm promieniowania wokół λ_1 i λ_2 stosuje się filtry interferencyjne i oddzielne detektory, a iloraz sygnałów pomiarowych realizuje się w specjalnym układzie elektronicznym lub na drodze obliczeń numerycznych. Jeszcze dotąd spotyka się wersje z filtrem dwubarwowym. W tym przypadku obserwator tak ustawia dwubarwowy filtr przesuwany, aby ciało obserwowane przez ten filtr wydawało się szare. Zakres pomiarowy pirometru dwubarwowego wynosi $970 \div 2470 \text{ K}$, a błąd pomiaru zwykle nie przekracza $\pm 10 \text{ K}$. Pirometry dwubarwowe mogą samoczynnie współpracować z regulatorami i rejestratorami temperatury. Ich sygnał wyjściowy praktycznie nie zależy od emisyjności powierzchni. Są one stosowane do pomiarów temperatury powierzchni, których emisyjność zmienia się w dużych granicach, a także do pomiarów temperatury w ośrodkach pochłaniających promieniowanie ciepłe (pary, gazy). Są one stosunkową drogą.

Kamera termowizyjna (termowizja) - jest to urządzenie umożliwiające zobrazowanie (wizualizację) rozkładu pola temperatury występującej na określonym obszarze powierzchni badanego obiektu. Ściślej, jest to wizualizacja gęstości strumienia promieniowania podczerwonego emitowanego niezależnie przez poszczególne punkty (wraz z otoczeniem) tworzące powierzchnię widzialną przez układ optyczny kamery. Podstawowym zespołem takiej kamery jest układ próbkujący (obserwujący powierzchnię), którego zadaniem jest przekazanie informacji o amplitudzie sygnału do detektora punkt po punkcie (rys.1.7). Do tego celu służy w przeważającej ilości przypadków układ optomechaniczny złożony z obracających się lub wahających lusterek lub pryzmatów wykonanych z materiału przezroczystego dla dedykowanego pasma promieniowania. Częstotliwość omiatania powierzchni badanego obiektu wynosi 25 Hz . Sygnał z określonego punktu (z najbliższym otoczeniem) badanej powierzchni padając na detektor (np. InSb) jest przetwarzany na sygnał elektryczny. Amplituda sygnału pomiarowego padającego w danej chwili (a zatem i z określonego miejsca badanego obiektu) na detektor decyduje o intensywności świecenia plamki na ekranie (poziom jasności) lub może być zakodowana w skali kolorowej np. 10-cio stopniowej. Obraz pola temperatury powierzchni badanego obiektu nazywa się termogramem. Oraz ten może być zapamiętany w pamięci urządzenia z możliwością jego odtworzenia. Detektor promieniowania powinien być tak dobrany, aby pasmo jego detekcji leżało w zakresie $3 \div 5 \mu\text{m}$ lub $8 \div 14 \mu\text{m}$, gdyż w tych zakresach pochłanianie promieniowania przez atmosferę jest pomijalnie małe. Za pomocą termowizji można wizualizować pole temperatury w zakresie od 250 do 1900 K . Zdolność rozdzielcza tego typu urządzeń zależy od zakresu mierzonych temperatur. Termowizję stosuje się do wykrywania nieszczelności izolacji cieplnej, w diagnostyce medycznej, w prognozowaniu stanu upraw rolniczych (z kosmosu), do wykrywania badań podziemnych

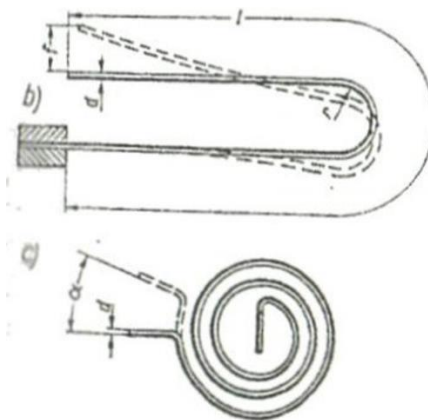
(z kosmosu), zanurzonych okrętów podwodnych (samolot, kosmos), do wykrywania złóż surowców mineralnych.



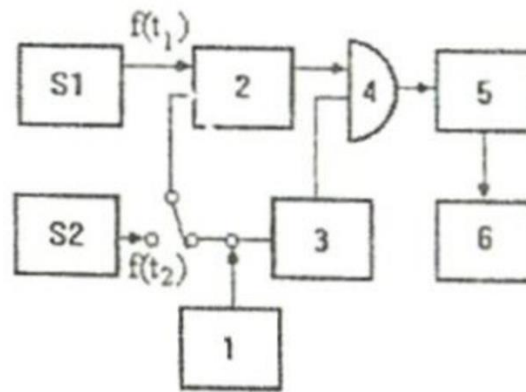
Rys.1.7 Układ optomechaniczny urządzenia termowizyjnego: 1,4-soczewka; 2-pryzmat obrotowy pionowy; 3-pryzmat obrotowy poziomy; 5-detektor promieniowania podczerwonego.



Rys. 1.8 a) zasada działania termometru dylatacyjnego - stan w temperaturze $(t - \Delta T)$; b) przekrój przez termometr: 1-materiał bierny; 2-materiał czynny; 3-przedłużenie pręta; 4-wskazówka z przekładnią mechaniczną; 5-skala temperatury.



Rys. 1.9 Najczęściej spotykane kształty bimetalu: a) taśma płaska; b) taśma w kształcie litery U; c) spirala płaska.



Rys.1.10 Schemat blokowy termometru kwarcowego: S1, S2-czujniki temperatury; 1-generator częstotliwości f_0 ; 2-mieszacz; 3-generator impulsów zegarowych; 4-układ detektora częstotliwości różnicowej z przetwornikiem A/C; 5-licznik; 6-wyświetlacz.

Metodą związaną z wykorzystaniem różnicy rozszerzalności liniowej różnych materiałów w funkcji temperatury. Różnica ta wyraża się wzorem

$$\Delta l = l \cdot (1 + \alpha_1 \Delta T) - l \cdot (1 + \alpha_2 \Delta T) = l \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

gdzie: l - długość czujnika w temperaturze T ; α_1 i α_2 , - współczynniki rozszerzalności liniowej zastosowanych materiałów; ΔT - zmiana temperatury. Przykładowym rozwiązaniem termometru dylatacyjnego jest rozwiązanie pokazane na rys.1.8. Czujniki tych termometrów są najczęściej wykonane w postaci rurki o dużej wartości współczynnika α_1 z umieszczonym w niej współosiowo prętem wykonanym z materiału o małym współczynniku α_2 . Pary materiałów stosowanych w termometrach dylatacyjnych powinny charakteryzować się możliwie wysoką dopuszczalną temperaturą pracy, dużą różnicą ($\alpha_1 - \alpha_2$) oraz odpornością na korozję i utlenianie (Al, Ni, mosiądz, NiCr, porcelana, FeNi36, kwarc). Maksymalne mierzone temperatury sięgają 1200 K (NiCr - porcelana), a błąd pomiaru nie przekracza 2 %.

Zjawisko to jest również wykorzystywane w konstrukcji *termometru bimetalowego* (rys.1.9). Podstawowym elementem tego typu termometru jest bimetal, stanowiący dwa zgrzane lub zwalcowane na gorąco paski metali lub stopów o różnych liniowych współczynnikach rozszerzalności. Przy zmianie temperatury bimetal wygina się w kierunku paska o mniejszym współczynniku rozszerzalności. W przypadku płaskiej taśmy bimetalowej przesunięcie f w [mm] na końcu bimetalu wyraża się następująco

$$f = 10^{-4} \cdot K \cdot \frac{l^2}{d} \cdot \Delta T \quad (1.6)$$

gdzie: K - ugięcie właściwe w [K]; l - długość bimetalu w [mm]; d - grubość bimetalu w [mm]; ΔT - przyrost temperatury ponad temperaturę spoczynkową. Niezamocowany koniec bimetalu porusza wskazówką na skali termometru. Typowy zakres temperaturowy stosowalności tego typu termometrów wynosi 200÷400°C. Dokładność pomiarów 1÷2%. Mogą one zastępować techniczne termometry cieczkowe. Bimetal czasami stosuje się w innych termometrach jako element kompensujący wpływ temperatury otoczenia.

Metoda związaną z wykorzystaniem zależności częstotliwości kryształu piezoelektrycznego od temperatury i innych efektów.

Termometry kwarcowe. Częstotliwość drgań własnych oscylatora kwarcowego zależy od temperatury T i może być zapisana w postaci

$$f(\theta) = f_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta + \beta \cdot \theta^2 + \gamma \cdot \theta^3) \quad (1.7)$$

gdzie: f_0 , - częstotliwość w temperaturze odniesienia T_0 , $\theta = T - T_0$; α , β , γ - współczynniki zależne od usytuowania osi monokryształu kwarcu do płaszczyzny cięcia.

W typowych oscylatorach monokryształ piezoelektrycznego kwarcu jest tak wycięty, że jego częstotliwość jest praktycznie niezależna od temperatury, tj. $\alpha = 0$. Natomiast w przypadku zastosowania go w termometrii tak się dobiera wzajemne usytuowanie osi i płaszczyzny cięcia, aby $\beta = 0$ i $\gamma = 0$, wtedy $f(\theta)$ jest liniową funkcją θ . Jednym z możliwych rozwiązań układowych termometru kwarcowego jest układ pokazany na rysunku 1.10. Rozwiązanie takie zastosowano w termometrze firmy Hewlett-Packard. Umożliwia ono zarówno pomiar temperatury T_1 (czujnik S_1), jak i różnicy temperatury T_1 i T_2 (czujniki S_1 i S_2). Płytki kwarcowe w czujnikach temperatury mają zazwyczaj średnicę kilku milimetrów, przy częstotliwości rezonansowej rzędu kilkudziesięciu MHz i jej zmianie w funkcji temperatury około 1 kHz/K. Rozdzielczość termometru jest zależna od czasu trwania pomiaru, np. dla 10 s wynosi ona 10^{-4} K, a dla 0.1 s 10^{-2} K. Typowy zakres mierzony tym termometrem temperatury wynosi od -80°C do 250°C , a błąd pomiaru winien być określony indywidualnie dla każdego konkretnego problemu pomiarowego.

Kolor. Do badania rozkładu temperatury na powierzchni ciał stałych stosowane są często pokrycia termoczułe, gwałtownie zmieniające barwę przy przekroczeniu temperatury krytycznej. Pokrycia termoczułe powinny zmieniać barwę w czasie krótszym od jednej sekundy, nie mogą zmieniać swych własności pod wpływem działania płynu otaczającego pokrytą powierzchnię i nie mogą wydzielać szkodliwych gazów podczas nagrzewania. Pokrycia termoczułe można podzielić na:

- zmieniające barwę odwracalnie lub nieodwracalnie na skutek zmiany składu chemicznego lub budowy siatki krystalicznej pigmentów czułych na zmiany temperatury. Przy zastosowaniu mieszanin różnych pigmentów można otrzymać farby termoczułe zmieniające barwę wielokrotnie, aż do 12-krotnie;
- zmieniające barwę na skutek topnienia jednego ze składników;
- ciekłe kryształy (najczęściej cholesterole), które mają własności cieczy (ciekłość) i kryształów ciała stałego (nieizotropowość), zmieniające barwę przy zmianie temperatury o setne części stopnia.

Jako przykład wykorzystania pokryć termoczułych mogą służyć kredki i farby termoczułe firmy Faber-Castell, Stein bei Numberg, Niemcy. Firma ta produkuje kredki Thermochrom, których 18 pokrywa zakres temperatury $65^\circ\text{C} \div 670^\circ\text{C}$ oraz farby Thermocolor, których 34 pokrywa zakres temperatury $40^\circ\text{C} \div 1350^\circ\text{C}$. Dokładność pomiaru wynosi $\pm 5\%$. Do zalet tych farb i kredek należy niski koszt określania rozkładów temperatury na badanych powierzchniach i możliwość wyznaczenia izoterm natychmiast po ostygnięciu przedmiotu. Farby dostarczane są w postaci proszków rozpuszczonych w alkoholu.

Wśród 34 farb Thermocolor, 5 zmienia barwę dwukrotnie, 4 zmienia barwę trzykrotnie i 2 zmieniają barwę czterokrotnie.

Kredki Thermochrom stosuje się do szybkiego i taniego określania temperatury przy spawaniu, wytłaczaniu, starzeniu itp., procesach technologicznych oraz przy nadzorowaniu nagranych części podczas eksploatacji. Farby Thermocolor stosuje się do określania rozkładu temperatury na dużych powierzchniach, np. aparatury chemicznej, ścian pieców, poszycia samolotów, ścianek silników rakietowych, łopatek turbin gazowych, ścianek kanałów przepływowych, itp. W szczególnych przypadkach stosuje się farby do określania maksymalnej temperatury tłoków oraz cylindrów i głowic chłodzonych powietrzem silników spalinowych lub do określania temperatury skrawania. W odróżnieniu od kredek farby muszą być nanoszone na powierzchnie przed nagrzewaniem ciała.

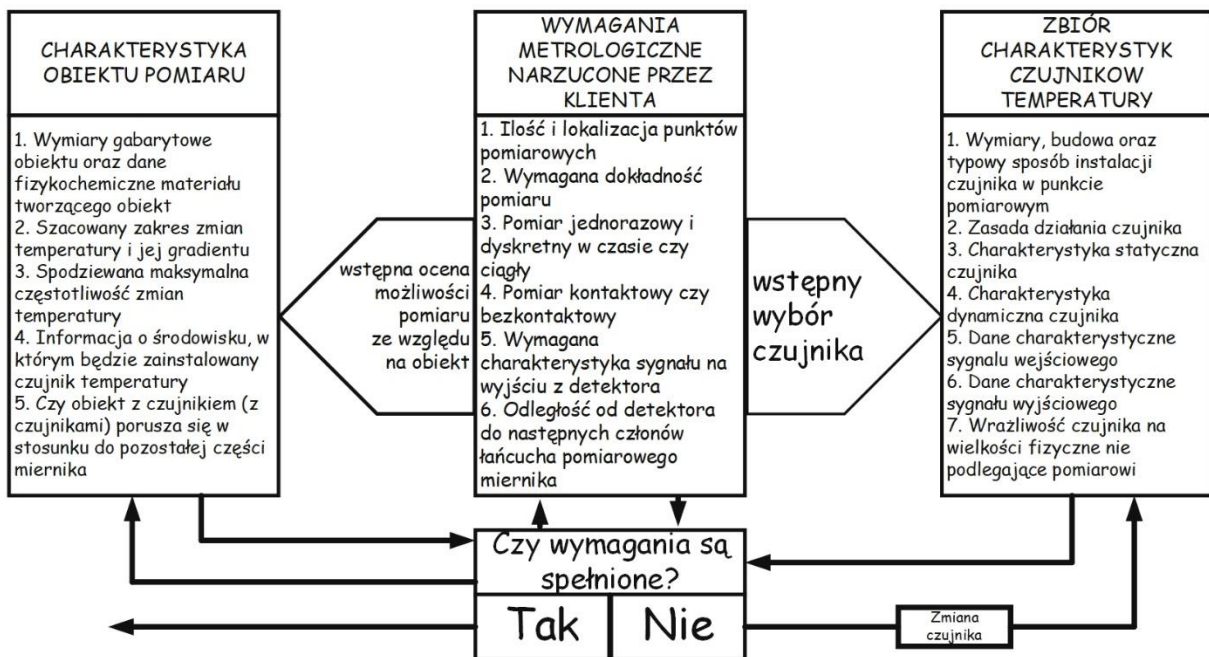
Wskaźniki topikowe - są to związki chemiczne o różnych temperaturach topnienia, dostępne handlowo w postaci szybkooschnących cieczy lub kredek. Powierzchnia pomalowana taką substancją w temperaturze niższej od temperatury topnienia jest matowa, tak, jak gdyby zarysowano ją kredą. Po osiągnięciu przez powierzchnię temperatury znamionowej (topnienia) i wyższej oraz po jej ostudzeniu

substancja na powierzchni staje się szklista i nosi ślady nadtopienia. Wskaźniki topikowe są produkowane w zakresie temperatury od 330 do 1700 K z gradacją od 5 do 30 K. Błąd wskazań jest określany maksymalnie na $\pm 1\%$.

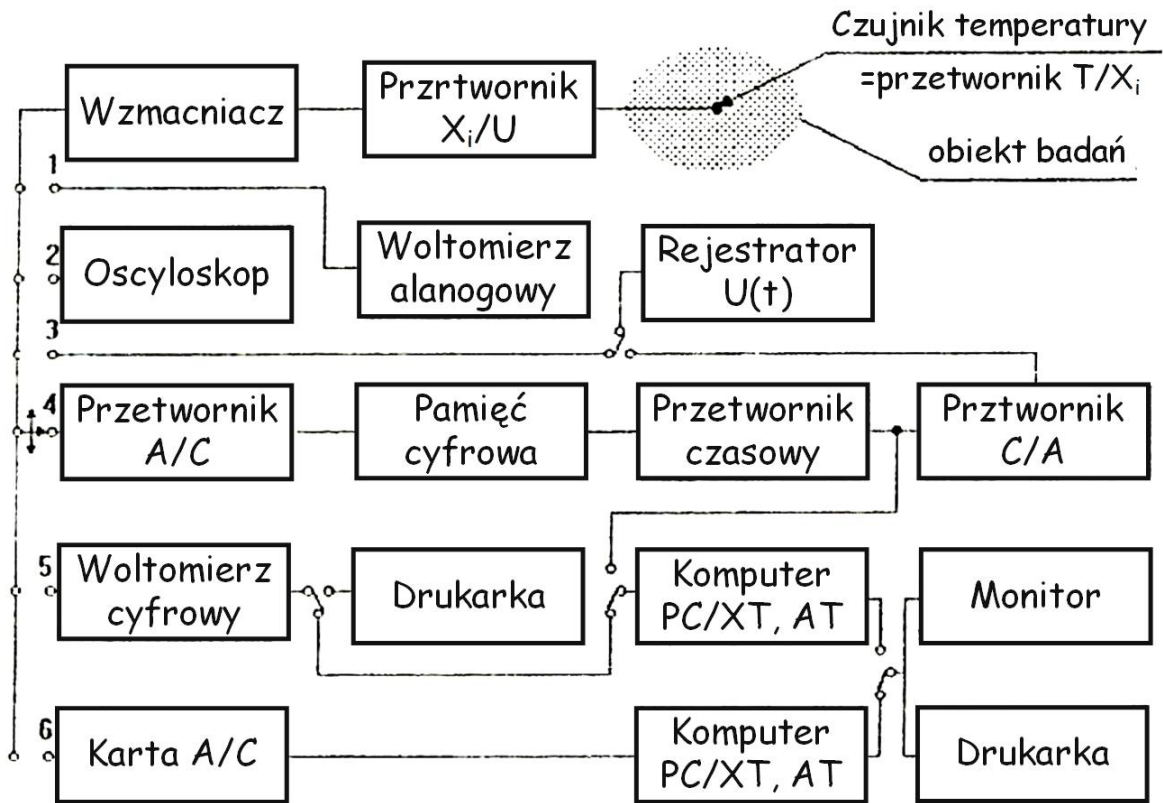
1.3. WARUNKI POPRAWNEGO POMIARU TEMPERATURY

Duża różnorodność zjawisk termodynamicznych, które zachodzą w różnych ośrodkach (ciało stałe, ciecz, gaz) pociąga za sobą konieczność wyboru najwłaściwszej metody pomiaru temperatury w każdym przypadku oddzielnie.

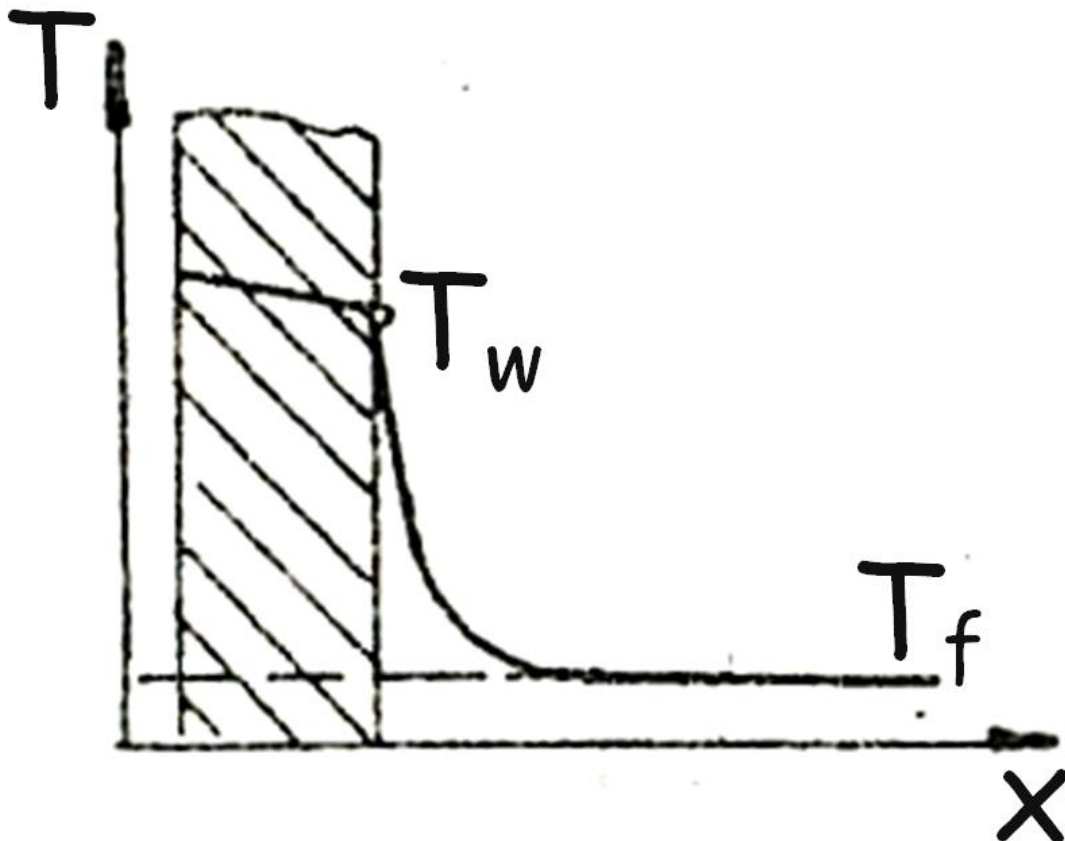
Współcześnie każdy inżynier ma do dyspozycji dużą różnorodność metod i technik pomiaru temperatury, a problem sprowadza się jedynie do optymalnego wyboru metody pomiaru oraz sposobu jej wdrożenia w praktyce.



Rys 1.11. Tok postępowania przy doborze rodzaju i typu czujnika do pomiaru temperatury.



Rys 1.12. Schemat blokowy połączeń najczęściej stosowanych układów do pomiaru i rejestracji temperatury.



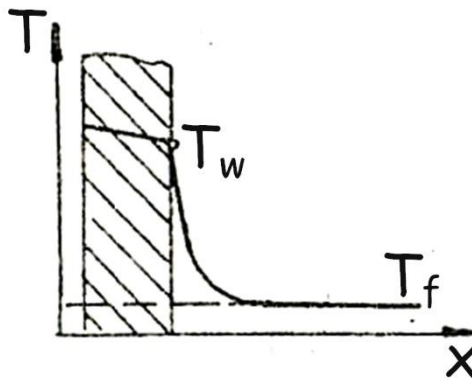
- charakter pomiaru (pomiar ciągły lub dyskretny w czasie). Ma to szczególne znaczenie przy pomiarze temperatury części poruszających się ruchem obrotowym lub posuwisto-zwrotnym;
- sposób obróbki końcowej sygnału pomiarowego (odczyt analogowy, cyfrowy, rejestracja analogowa lub cyfrowa).

Kryterium decydującym o szczegółach układu pomiarowego jest zazwyczaj z góry zadany błąd pomiaru oraz to, czy układ pomiaru temperatury współpracuje z układem kontroli i automatyki obiektu jako szerszej całości.

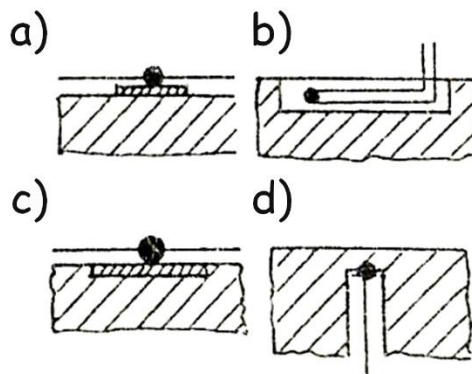
Na pokazanym na rys.1.12 schemacie czujnik temperatury, który jest przetwornikiem T/X_i (przy czym X może być siłą termoelektryczną E , rezystancją elektryczną R , gęstością strumienia promieniowania I , wydłużeniem l , ...) jest połączony z następnym przetwornikiem X_i/U . Generalnie rzecz biorąc układ "czujnik temperatury - przetwornik X_i/U " ma za zadanie przetransponować zmianę wielkości zależnej od temperatury na napięcie elektryczne. Przykładowo, w przypadku czujnika rezystancyjnego sam czujnik transformuje zmianę temperatury na zmianę rezystancji elektrycznej T/R , natomiast następny człon (przetwornik X_i/U) transformuje zmianę rezystancji na zmianę napięcia elektrycznego R/U . W przypadku termoelementu przetwornik X_i/U nie jest konieczny, gdyż sam czujnik bezpośrednio transformuje zmianę temperatury na zmianę napięcia termoelektrycznego T/U .

Poprawny pomiar temperatury danego obiektu, danym czujnikiem pomiarowym wraz ze stowarzyszonym z nim układem pomiarowym i wizualizacji, wymaga za każdym razem oddzielnej analizy błędów. Ilustracją tego problemu może być, na przykład, pomiar temperatury powierzchni. Dokładny pomiar temperatury powierzchni ciała stałego, wbrew pozorom, nie jest problemem trywialnym. Szczególnie, jeżeli powierzchnia ciała wymienia ciepło z otoczeniem (płyn) na drodze konwekcji (rys.1.13). Cechą charakterystyczną takiego sposobu wymiany ciepła jest występowanie dużego gradientu temperatury w przyściennej warstwie płynu i w związku z tym, celem zredukowania do minimum błędów pomiaru, czujnik (termoelement, termistor) na powierzchni ciała stałego musi być umieszczony w sposób specjalny. Różne sposoby umieszczenia termoelementów, przeznaczonych do pomiaru temperatury powierzchni ciała stałego pokazano na rys. 1.14.

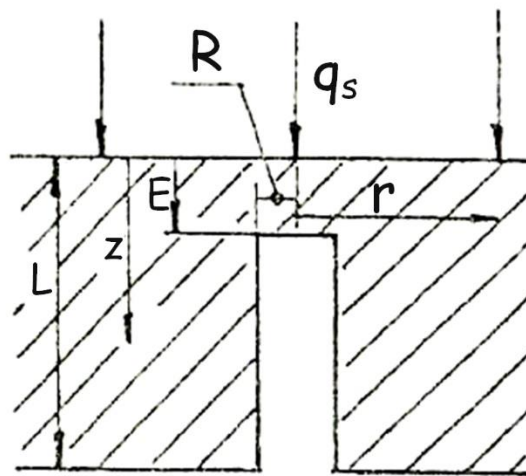
Każdy ze sposobów umieszczenia czujnika na powierzchni powoduje zaburzenie lokalnego pola temperatury ciała w sąsiedztwie miejsca zamocowania termometru. Zaburzenie to jest spowodowane lokalną zmianą warunków wymiany ciepła między płynem a powierzchnią, na której jest zamocowany termoelement i odprowadzeniem ciepła przez przewody czujnika. Wartość błędów pomiaru temperatury powierzchni czujnika jest zależna od zaburzenia pola temperatury. Jako ilustracja złożoności zagadnienia określania błędów pomiaru zostanie rozpatrzony przypadek pokazany na rys.1.14.d), przy założeniu, że opór dla przepływu ciepła od ciała do czujnika jest nieskończenie duży.



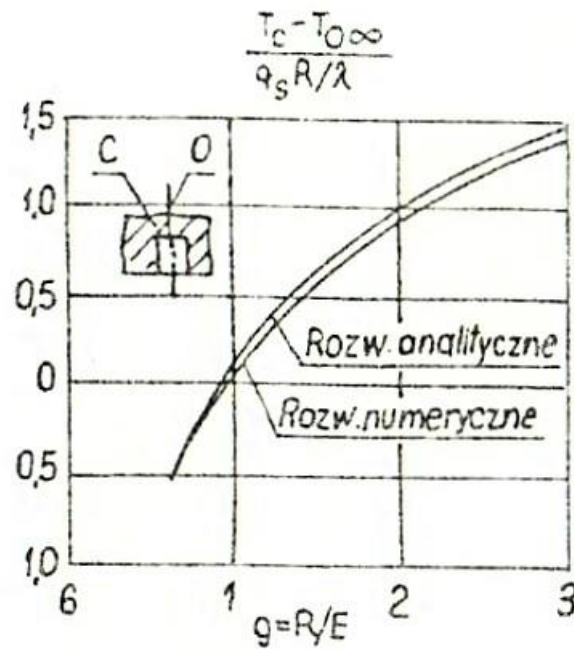
Rys. 1.13 Przebieg zmian temperatury w płycie i przyściennej warstwie materiału.



Rys.1.14 Sposoby umieszczania termoelementów do pomiaru temperatury powierzchni: P-płytką z dobrego przewodnika ciepła; ● - spoina termoelementu.



Rys.1.15 Geometria pomiaru temperatury powierzchni termometrem umieszczonym w otworze pod powierzchnią.



Rys. 1.16 Zależność błędu pomiaru temperatury powierzchni termometrem umieszczonym w punkcie C od g .

Taki przypadek ma miejsce, kiedy występuje konieczność pomiaru temperatury powierzchni bez bezpośredniej możliwości zainstalowania na niej czujnika temperatury, np. wewnętrzna powierzchnia ścianki wysokociśnieniowego zbiornika lub tulei cylindra silnika spalinowego. Wtedy stosuje się sposób pokazany na rys.1.14.d). Termometr jest umieszczany, w tym przypadku, prostopadłe do powierzchni, której temperaturę należy określić w małym cylindrycznym otworze wywierconym od zewnętrznej strony ścianki. Błąd pomiaru temperatury powierzchni tym sposobem określili Beck i Hurwicz (1960r.). Po przyjęciu oznaczeń jak na rys.1.15, dla ustalonej wymiany ciepła i przy założeniu, że termometr nie odprowadza ciepła, a otwór jest nieskończenie długi, otrzymali oni, że

$$\frac{T_0 - T_g}{g \dot{q} \frac{R}{\lambda}} = 0,5$$

gdzie:

- $T_0 = T(r = 0, z = 0)$ - jest temperaturą w punkcie O (rys. 1.15);
- $T_g = T(r = \infty, z = 0)$ - jest niezaburzoną przez otwór temperaturą powierzchni;
- $g = R/E$ - współczynnik bezwymiarowy;
- \dot{q} - gęstość strumienia ciepła na powierzchni;
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła materiału ścianki.

Ci sami autorzy określili również błąd bezwzględny określenia temperatury powierzchni przy pomiarze temperatury w punkcie C, któremu odpowiada temperatura $T_c = T(r=0, z=E)$, w funkcji g , przy takich samych założeniach jak wyżej. Wykres tej zależności jest pokazany na rys.1.16. Z przedstawionego wykresu wynika, że błąd ten jest równy zero, jeżeli $g = 1$. Ponieważ termometr nie mierzy temperatury w punkcie C, ale średnią temperaturę na powierzchni czołowej otworu zaleca się stosować $g = 1.1$.

1.4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Zadaniem tego ćwiczenia jest unaocznienie studentowi mnogości i różnorodności metod i technik pomiaru temperatury oraz niuansów związanych z ich stosowaniem.

W części pierwszej prowadzący ćwiczenie dokona, korzystając z materiałów audiowizualnych, przeglądu wybranych metod pomiaru temperatury stosowanych w tych dziedzinach techniki, gdzie mają one zasadnicze znaczenie.

W części drugiej, która ma charakter demonstracyjny, prowadzący zajęcia zapozna studentów z różnymi typami czujników i przyrządów do pomiaru temperatury oraz praktycznie zademonstruje sposób ich działania.

Zaliczenie ćwiczenia wiąże się z opracowaniem przez grupę do końca semestru tematu zadanego przez prowadzącego i wiążącego się bezpośrednio z konkretnym zagadnieniem pomiaru temperatury. Zakres, treść i objętość sprawozdania zadanego tematu określa prowadzący ćwiczenie.

Literatura

- [1] Mata Encyklopedia Metrologii. WNT, Warszawa 189.
- [2] Michalski L., Eckersdorf K. Pomiary temperatury, WNT, Warszawa 1986.
- [3] Wisniewski S. Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń ciepłych. WNT, Warszawa 1983.
- [4] Watson G.G. Techniques for Measuring Surface Temperature. Instrument Practice, No 3+8, 1966.
- [5] Thermocoax. Which Thermocouple to Choose. Prospekt firmy Philips.
- [6] Mantel-Thermoelemente. Prospekt firmy Heraeus.
- [7] System für temperaturmeß - und - reglungstechnik. Heiman LP 1/74. Prospekt firmy Therm.