

# Wyznaczanie współczynnika emisyjności powierzchni metali

Kraków, 2019

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników emisyjności płytki metalowej, oraz zapoznanie się z budową, obsługą oraz metodą bezstykowego pomiaru temperatury z wykorzystaniem pirometrów oraz kamery termowizyjnej.

## 2. Pomiary temperatury z zastosowaniem pirometrów oraz kamer termowizyjnych

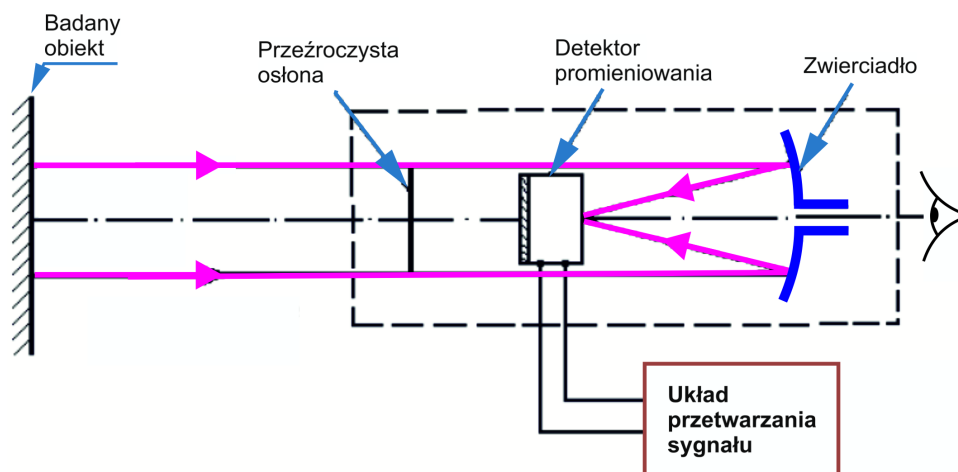
Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, zwane promieniowaniem cieplnym. Pomiary temperatury z wykorzystaniem metod pirometrycznych polegają na określeniu parametrów energii cieplnej wypromieniowanej przez mierzony obiekt. Są one ściśle związane z prawami dotyczącymi promieniowania ciał rzeczywistych, czyli: Plancka, Wiena, i Stefana-Boltzmana.

W pirometrii wykorzystuje się zakres promieniowania temperaturowego zawierający się w przedziale od ok. 0,4 do 20  $\mu\text{m}$ , czyli zakres promieniowania widzialnego i podczerwonego. Ze względu na zasadę działania pirometry dzieli się na:

- monochromatyczne,
- radiacyjne,
- fotoelektryczne,
- barwowe (dwubarwowe, trójbarwowe).

### 2.1. Pirometr radiacyjny

Pirometr radiacyjny – zwany też piometrem całkowitego promieniowania wykorzystuje zależność natężenia promieniowania cieplnego emitowanego w szerokim zakresie długości fal od temperatury. Ideowy schemat pirometru radiacyjnego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy pirometru radiacyjnego (zwierciadłowego).

Promieniowanie cieplne badanego obiektu skupiane jest za pomocą: soczewki, zwierciadła lub światłowodu na detektorze promieniowania, który najczęściej stanowią: kilka termoelementów połączonych szeregowo w termostos, lub rzadziej rezystory termometryczne, termistory lub elementy bimetalowe. Zmiana temperatury detektora promieniowania wywołuje powstanie w nim sygnału elektrycznego (siły termoelektrycznej lub zmiany rezystancji) proporcjonalnego do temperatury

mierzonej. Aby poprawić zdolność absorpcji powierzchnia detektora jest czerniona, a absorber umieszcza się w szczelnej obudowie szklanej wypełnionej argonem, w celu zapewnienia jednoznacznej i określonej wartości współczynnika przejmowania ciepła. Pomiary prowadzone za pomocą pirometrów radiacyjnych, oparte są na porównaniu parametrów promieniowania obiektu mierzonego z własnościami promieniowania ciała czarnego. Ponieważ wartość temperatury promieniowania całkowitego wyrażona jest prawem Stefana-Boltzmann, a więc działanie pirometru można opisać następująco:

$$\sigma T_{cz}^4 = \varepsilon_T \sigma T_{rz}^4 \quad (1)$$

gdzie:

- $\sigma$  – stała promieniowania ciała czarnego, (stała Stefana-Boltzmann)  
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,
- $T_{cz}$  – temperatura ciała czarnego, K
- $T_{rz}$  – temperatura rzeczywista, K
- $\varepsilon_T$  – współczynnik emisyjności dla pełnego zakresu widma promieniowania.

Pirometr radiacyjny nie mierzy temperatury rzeczywistej badanego obiektu. Znając jednak zmierzoną temperaturę ciała czarnego, oraz współczynnik emisyjności można określić temperaturę rzeczywistą przekształcając równanie (1) do postaci (2):

$$T_{rz} = T_{cz} \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}} \quad (2)$$

Ponieważ  $\varepsilon_T < 1$ , dlatego wartość temperatury czarnej jest zawsze mniejsza od niż wartość temperatury rzeczywistej.

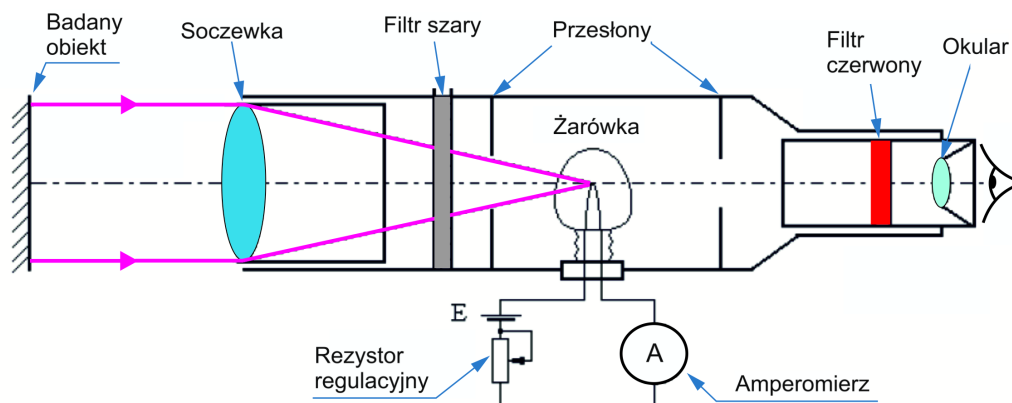
Pirometry radiacyjne dzieli się na:

- reflektorowe – elementem skupiającym energię promieniowania jest reflektor (odbłyśnik) i pracują w zakresie podczerwieni,
- refraktorowe – są wyposażone w obiektyw, i stosowane dla zakresów temperatury powyżej 600 °C. (Refraktor – urządzenie do zmiany rozkładu przestrzennego strumienia świetlnego przez wykorzystanie zjawiska załamania).

*Zastosowanie:* do pomiarów ciągłych i rejestracji temperatury ciał czarnych i nieczarnych. W warunkach przemysłowych do pomiaru wnętrza pieców elektrycznych i gazowych, powierzchni niemetalowych w przemyśle gumowym, tekstylnym, papierniczym, tworzyw sztucznych, przy nagrzewaniu w piecach przelotowych.

## 2.2. Pirometr monochromatyczny z zanikającym włóknem

Pomiar temperatury z wykorzystaniem pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem (schematycznie przedstawionego na rys. 2) polega na obserwacji włókna żarówki, przez które przepływa prąd elektryczny nastawiony za pomocą rezystora regulacyjnego.



Rys. 2. Schemat ideowy pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem.

Prąd żarówki należy nastawić w taki sposób, aby obserwując przez okular i filtr czerwony (zapewniający obserwację przy jednej długości fali  $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$  – barwa czerwona) badany obiekt i włókno żarówki, obraz włókna zanikł na tle badanego obiektu, co jest równoznaczne ze zrównaniem się luminancji obiektu i włókna. Wartość mierzonej temperatury odczytać należy z amperomierza wyskalowanego w jednostkach temperatury. Z kolei filtr szary odpowiada za rozszerzenie zakresu pomiarowego pirometru. Porównanie luminacji włókna żarówki i obiektu odbywa się przy jednej długości fali, stąd też nazwa pirometru – monochromatyczny. Pomiar z wykorzystaniem pirometrów monochromatycznych polega na porównaniu parametrów promieniowania obiektu mierzonego z właściwościami promieniowania ciała czarnego. Mierząc temperaturę ciała nieczarnego, pirometr monochromatyczny wskazuje temperaturę luminancyjną, niższą niż rzeczywista zgodnie z równaniem (3):

$$T_{rz} = \frac{1}{\frac{1}{T_L} + \frac{\lambda_e}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda_e}} \quad (3)$$

gdzie:

$T_{rz}$  – temperatura rzeczywista, K

$T_L$  – temperatura luminancyjna, K

$\lambda_e$  – efektywna długość fali,  $\lambda_e = 0,65 \cdot 10^{-6}$ , m

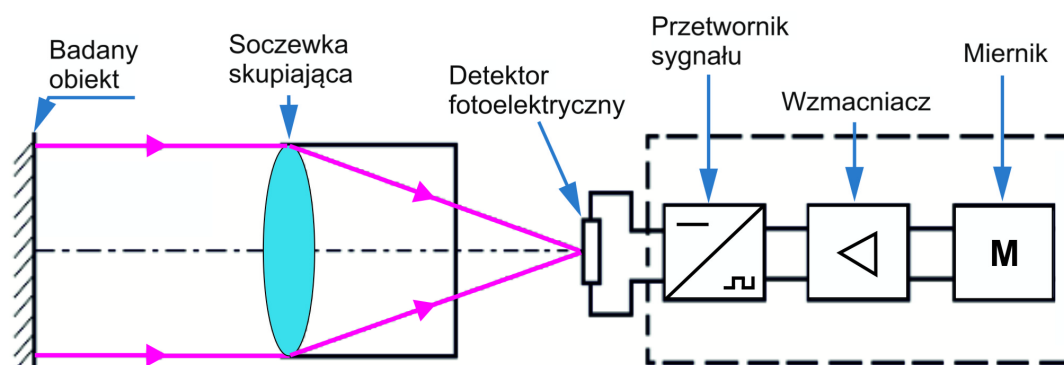
$\varepsilon_{\lambda_e}$  – emisyjność monochromatyczna (ciała nieczarnego), -

$c_2$  – stała ze wzoru Plancka,  $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ , m · K.

**Zastosowanie:** tylko do pomiarów dorywczych, kontrolnych i porównawczych, ponieważ wymagają obsługi ludzkiej. Znajdują szerokie zastosowanie w pomiarach laboratoryjnych.

### 2.3. Pirometr fotoelektryczny

Zasada działania pirometrów fotoelektrycznych polega na pomiarze sygnału elektrycznego powstającego w detektorze fotoelektrycznym, na którym jest skupione promieniowanie cieplne wysyłane przez badany obiekt - zgodnie ze schematem ideowym 3. Sygnał elektryczny jest przetwarzany na prąd zmienny, następnie wzmacniony i skierowany do miernika wycechowanego w skali temperatury. W pirometrach fotoelektrycznych stosowane są następujące rodzaje detektorów: fotorezystory, fotodiody (germanowe lub krzemowe), fotoelementy emisyjne, oraz fotoogniwa.



Rys. 3. Schemat ideowy pirometru fotoelektrycznego.

Zakres długości fal promieniowania wykorzystywanych w danym pirometrze fotoelektrycznym zależy od czułości widmowej zastosowanego detektora, przepuszczalności widmowej soczewki lub filtru. Pirometry o wąskim paśmie wykorzystywanego promieniowania można zaliczyć do pirometrów monochromatycznych. Jednak elementem decydującym o dokładności pomiaru nie jest oko ludzkie a detektor fotoelektryczny, dzięki czemu eliminowany jest błąd ludzki. Z kolei pozostałe pirometry nazywa się pasmowymi. Temperaturę rzeczywistą określić można dla nich z następującej zależności:

$$T_{rz} = T_w^n \sqrt{\frac{1}{\varepsilon(\lambda_1 \div \lambda_2)}} \quad (4)$$

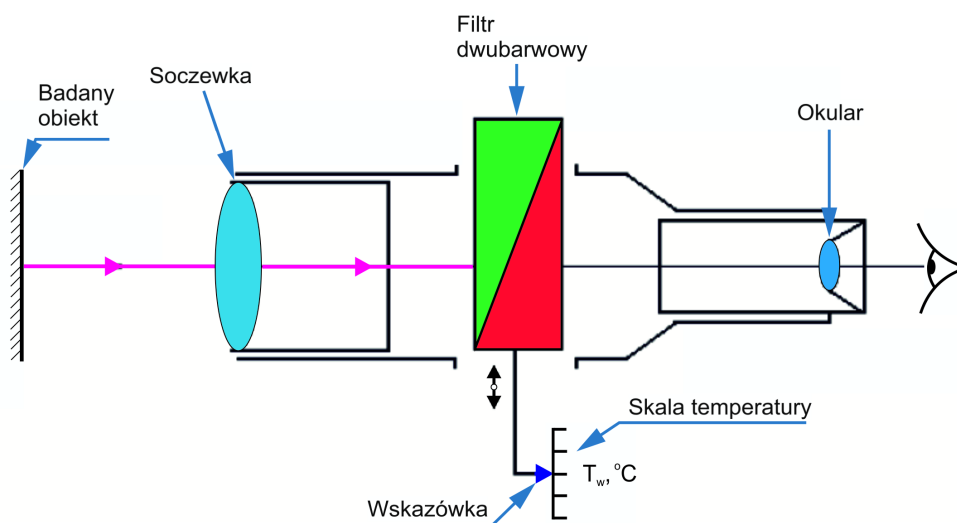
gdzie:

- $T_{rz}$  – temperatura rzeczywista, K
- $T_w$  – temperatura wskazywana, K
- $\varepsilon(\lambda_1 \div \lambda_2)$  – średnia wartość współczynnika emisyjności dla zakresu  $\lambda_1 \div \lambda_2$  (emisyjność pasmowa),
- $n$  – wykładnik zależny od charakterystyki detektora,  $n = 5 \div 12$ .

**Zastosowanie:** w miejscach, gdzie obecność pary wodnej, lub gazów silnie pochłaniających uniemożliwia stosowanie pirometrów radiacyjnych, rejestracja temperatur szybkozmiennych, lub temperatur przedmiotów znajdujących się w ruchu, są niezastąpione w pomiarach wsadu nagrzewanego w piecach indukcyjnych lub oporowych.

## 2.4. Pirometr dwubarwowy

W pirometrze barwowym wykorzystuje się długości fal znajdujące się w zakresie widzialnej części widma. Schemat ideowy przedstawiający pirometr dwubarwowy pokazano na rys. 4. Obserwator patrząc na badany obiekt ustawia w taki sposób filtr przesuwany, aby widział barwę szarą, jaka powstaje z przyjętych dwóch dopełniających się barw, przy równości natężeń promieniowania. Ze wzrostem temperatury mierzonej zwiększa się udział promieniowania wysyłanego w barwie zielonej, a malej udział promieniowania w barwie czerwonej. Temperaturę mierzoną zwaną temperaturą barwową odczytuje się na podstawie położenia wskazówki na skali temperatury. Pirometry dwubarwowe są skalowane dla ciał szarych, i dają prawidłowe wskazania przy pomiarze temperatury zarówno ciał szarych jak i czarnych.



Rys. 4. Schemat ideowy pirometru dwubarwowego.

Przekształcając odpowiednio prawo Wiena, można zapisać wyrażenie na temperaturę rzeczywistą dla pirometru dwubarwowego:

$$T_{rz} = \frac{1}{\frac{\ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{T_b} + \frac{1}{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}} \quad (5)$$

gdzie:

- $T_{rz}$  – temperatura rzeczywista, K
- $T_{cz}$  – temperatura barwowa, K
- $c_2$  – stała,  $c_2 = 14\,388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
- $\varepsilon_{\lambda_1}$  – współczynnik emisyjności dla długości fali  $\lambda_1$ .

*Zastosowanie:* głównie tam, gdzie ze względu na pochłanianie promieniowania przez gazy, pary i dymy stosowanie innych pirometrów jest niemożliwe. Pirometry te mają również zastosowanie przy pomiarach temperatury ciał nieczarnych o zmiennej emisyjności.

## 2.5. Kamera termowizyjna

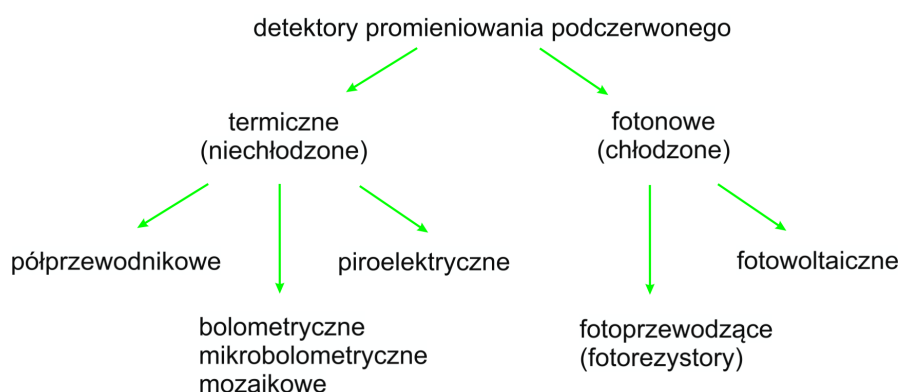
Termowizja - metoda diagnostyczna polegająca na pomiarze promieniowania w paśmie zwanym podczerwienią.

Kamery termowizyjne rozszerzają możliwości pomiarowe pirometrów o obrazowanie rozkładu przestrzennego pola temperatury. W kamerach termowizyjnych promieniowanie podczerwone emitowane lub odbite z badanego obiektu przetwarzane jest na sygnał elektryczny.

Podstawowy podział kamer termowizyjnych wynika z pracy zastosowanych detektorów w jednym z pięciu podzakresów pasma promieniowania podczerwonego:

- bliska podczerwień (NIR - *Near Infrared*):  $0,8 \mu\text{m} \div 1 \mu\text{m}$ ,
- zakres krótkofalowy podczerwieni (SWIR - *Short Wave Infrared*):  $1 \mu\text{m} \div 3 \mu\text{m}$ ,
- średnia podczerwień (MWIR - *Medium Wave Infrared*):  $3 \mu\text{m} \div 6 \mu\text{m}$ ,
- daleka podczerwień (LWIR - *Long Wave Infrared*):  $6 \mu\text{m} \div 15 \mu\text{m}$ .
- ekstremalnie daleka podczerwień:  $15 \div 100 \mu\text{m}$ .

Głównymi elementami składowymi kamery są: detektory podczerwieni, obiektyw (układ optyczny), układ wzmacniania, przetwarzania i wizualizacji. W kamerach termowizyjnych stosuje się detektory: pojedyncze, liniowe lub w postaci matryc. Podział detektorów pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Podział detektorów stosowanych w kamerach termowizyjnych.

Podczas zajęć użyta będzie kamera termowizyjna FLIR ThermaCam S60, w której zastosowano matrycę detektorów mikrobolometrycznych (najpowszechniej stosowany typ detektora w budowie współczesnych kamer termowizyjnych). Działanie detektora bolometrycznego opiera się na zmianie rezystancji w funkcji temperatury.

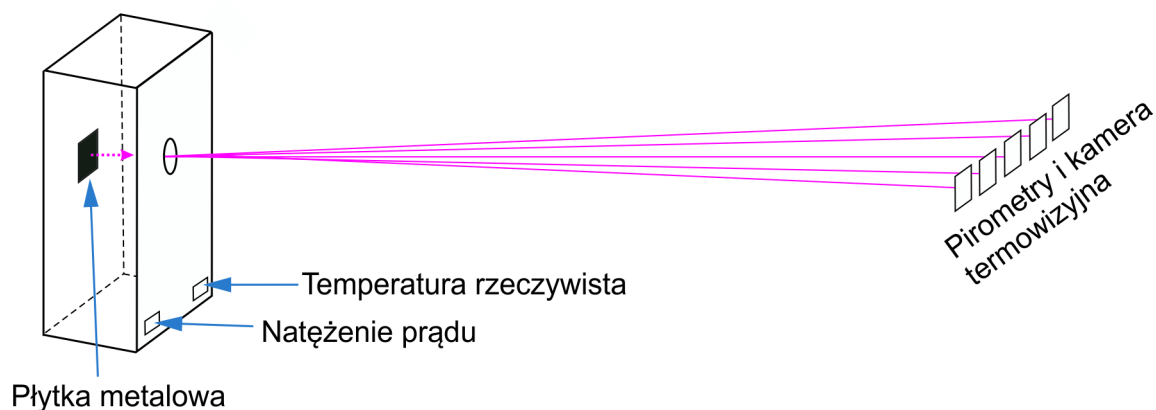
## 3. Wykonanie ćwiczenia

Na rys. 6 zilustrowano uproszczony schemat laboratoryjnego stanowiska pomiarowego. Obiektem, którego temperaturę należy zmierzyć jest płytkę metalową nagrzewaną w piecu elektrycznym. Na początku należy włączyć zasilanie pieca (natężenie prądu zasilającego  $I = 6,5 \text{ A}$ ), oraz zasilanie pirometrów. Pomiar temperatury płytki rozpocząć po osiągnięciu dolnej granicy zakresu pomiarowego przyrządów wynoszących odpowiednio:

- pirometr radiacyjny **StR 1871** ( $800 \div 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- pirometr monochromatyczny **ОППИР-017** ( $800 \div 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- pirometr fotoelektryczny **U-Pyr** ( $500 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- pirometr radiacyjny **Raynger 3i** ( $600 \div 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ ),
- kamera termowizyjna **FLIR® ThermaCAM S60**: ( $-40 \text{ do } 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

W trakcie ćwiczenia notować w karcie pomiarowej zmiany w czasie temperatury płytki: wskazywanej przez pirometr oraz rzeczywistej (mierzonej przez termoelement zamocowany w płytce).

#### Elektryczny piec oporowy



Rys. 6. Uproszczony schemat laboratoryjnego stanowiska pomiarowego.

#### 4. Sprawozdanie powinno zawierać:

- cel ćwiczenia,
- schemat i krótki opis stanowiska laboratoryjnego,
- zestawienie wyników pomiarów, oraz dodatkowo załączoną kartę pomiarową podpisaną przez prowadzącego zajęcia,
- obliczenia współczynników emisyjności płytki metalowej dla temperatur zmierzonych pirometrami monochromatycznym i piometrem całkowitego promieniowania,
- wykresy zależności:  $\varepsilon_{\lambda_e} = f(T_{rz})$ ,  $\varepsilon_T = f(T_{rz})$ , oraz dla wyników z kamery termowizyjnej  $T_{zm} = f(T_{rz})$  dla badanych  $\varepsilon$ .
- uwagi i wnioski.

#### 5. Zagadnienia teoretyczne

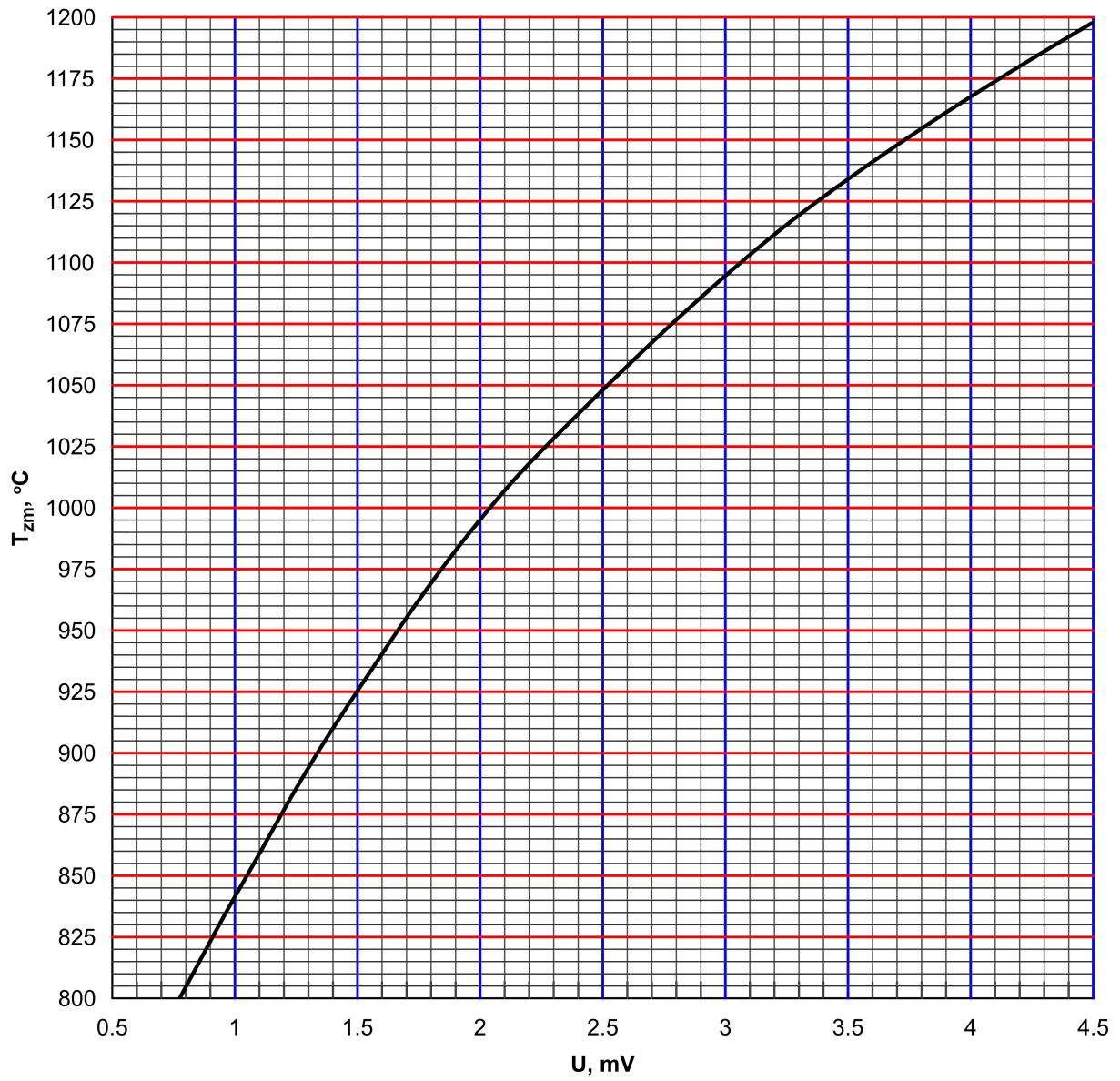
Absorpcyjność i przepuszczalność ośrodka; ciało doskonale czarne; prawo Plancka; prawo promieniowania Wiena i prawo przesunięć Wiena; prawo Stefana-Boltzmann; emisyjność, parametry decydujące o emisyjności ośrodka; rodzaje, zastosowanie, budowa i zasada działania pirometrów; podział detektorów promieniowania wykorzystywanych w kamerach termowizyjnych; okna pomiarowe pirometrów.

#### Literatura i pomoce naukowe

1. Notatki z wykładów,
2. Wiśniewski S., Wiśniewski T.: Wymiana ciepła, WNT, Warszawa 1997
3. Fodemski T. (red.): Pomiary cieplne cz. 1. Podstawowe pomiary cieplne, WNT, Warszawa 2001
4. Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury, WNT, Warszawa 1969
5. Miller D.: Pirometry, WNT, Warszawa 1970



### Charakterystyka termometryczna dla pirometru StR 1871



## KARTA POMIAROWA

Kierunek:

Grupa lab.:

Data:

### 1. Pirometr radiacyjny (całkowitego promieniowania)

| Nr pomiaru | $T_{rz}, ^\circ\text{C}$ | $U_{zm}, \text{mV}$ |
|------------|--------------------------|---------------------|
| 1.         |                          |                     |
| 2.         |                          |                     |
| 3.         |                          |                     |
| 4.         |                          |                     |
| 5.         |                          |                     |
| 6.         |                          |                     |
| 7.         |                          |                     |
| 8.         |                          |                     |

### 2. Pirometr monochromatyczny z zanikającym włóknem

| Nr pomiaru | $T_{rz}, ^\circ\text{C}$ | $T_{zm}, ^\circ\text{C}$ |
|------------|--------------------------|--------------------------|
| 1.         |                          |                          |
| 2.         |                          |                          |
| 3.         |                          |                          |
| 4.         |                          |                          |
| 5.         |                          |                          |
| 6.         |                          |                          |
| 7.         |                          |                          |
| 8.         |                          |                          |

### 3. Kamera termowizyjna

| $\varepsilon = \dots$ |                          |                          | $\varepsilon = \dots$ |                          |                          |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Nr pomiaru            | $T_{rz}, ^\circ\text{C}$ | $T_{zm}, ^\circ\text{C}$ | Nr pomiaru            | $T_{rz}, ^\circ\text{C}$ | $T_{zm}, ^\circ\text{C}$ |
| 1.                    |                          |                          | 1.                    |                          |                          |
| 2.                    |                          |                          | 2.                    |                          |                          |
| 3.                    |                          |                          | 3.                    |                          |                          |
| 4.                    |                          |                          | 4.                    |                          |                          |