

## Czynniki wpływające na pomiar pirometrów radiacyjnych

### Factors influencing on the radiation pyrometers measurement

Izabela Obiegło (Okręgowy Urząd Miar w Gdańsku)

Wydział Metrologii Elektrycznej, Fizykochemii, Akustyki, Drgań i Promieniowania Optycznego Okręgowego Urzędu Miar w Gdańsku posiada stanowisko do wzorcowania pirometrów radiacyjnych wyposażone w kalibratory typu 4180 i 4181 produkcji Fluke. Laboratorium OUM wykonuje wzorcowania tych przyrządów i przygotowuje się do akredytacji w PCA w zakresie pomiarowym od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . W artykule przedstawiono spostrzeżenia dotyczące czynników najbardziej wpływających na pomiar.

Regional Office of Measures in Gdańsk Electric Metrology Physics-Chemistry, Acoustics, Vibration and Optical Radiation Division has a calibration station with calibrators type 4180 and 4181 manufactured by Fluke. The Laboratory is already performing calibrations and measurements of devices and also the laboratory is preparing for PCA accreditation in range from  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In the article, the remarks on the factors that most affect the radiation pyrometers measurement are presented.

### Wprowadzenie

Temperatura należy do najczęściej mierzonych wielkości nieelektrycznych. Pomiary tej wielkości wykonuje się metodami pośrednimi, wykorzystując zmiany właściwości fizycznych ciał pod wpływem zmian temperatury (objętość, rezystancja, różnice potencjałów). Wyróżnia się trzy podstawowe metody pomiaru tych zmian: nieelektryczne, elektryczne i radiacyjne.

Promieniowanie cieplne (podczerwone) jest promieniowaniem elektromagnetycznym, którego źródłem są ciała znajdujące się w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Emisja promieniowania cieplnego związana jest z energią ruchu cieplnego atomów i cząsteczek w danym ciele fizycznym. Wszystkie ciała fizyczne, które mają temperaturę wyższą od zera bezwzględnego emitują promieniowanie termiczne do otoczenia i absorbują je z niego. W przypadku, gdy ilość emitowanego i absorbowanego promieniowania jest taka sama, to ciało pozostaje w równowadze termodynamicznej. Każde ciało fizyczne dąży do tej równowagi. Jeżeli ilość emitowanego i absorbowanego promieniowania jest różna, następuje przepływ promieniowania cieplnego z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze. Zjawisko to nosi nazwę wymiany ciepła.

Strumień cieplny padający na określoną powierzchnię podlega:

- pochłanianiu  $A$ ,
- odbiciu  $R$ ,
- przepuszczaniu  $P$ .

Suma tych strumieni dla każdego ciała wynosi:

$$A + R + P = 1 \quad (1)$$

Jeżeli strumień jest całkowicie pochłaniany przez ciało, czyli  $A = 1$ ,  $R = 0$ ,  $P = 0$ , to mamy do czynienia z ciałem doskonale czarnym. Zależność między energią wysłaną przez ciało doskonale czarne, jego temperaturą i długością fali emitowanego promieniowania opisuje wzór Plancka:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1} \quad (2)$$

gdzie:

$\lambda$  – długość fali promieniowania,

$T$  – temperatura bezwzględna,

$c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$  (pierwsza stała promieniowania Plancka),

$c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$  (druga stała promieniowania Plancka).

Temperatura określana jest na podstawie natężenia promieniowania wyemitowanego przez ciało doskonale czarne:

$$\Phi = \sigma_0 T^4 \quad (3)$$

gdzie:

$\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  (stała Stefana-Boltzmana),

$T$  – temperatura bezwzględna powierzchni promieniującej.

Dla ciał szarych zależność ta przyjmuje postać:

$$\Phi = \varepsilon \sigma_0 T^4 \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – współczynnik emisyjności. Między długością fali  $\lambda_{\max}$ , dla której zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego osiąga maksimum, a temperaturą bezwzględną  $T$  zachodzi związek:

$$\lambda_{\max} = bT \quad (5)$$

gdzie:

$\lambda_{\max}$  – długość fali odpowiadająca położeniu maksimum mocy promieniowania,

$b = 2896 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$  (stała Wiena),

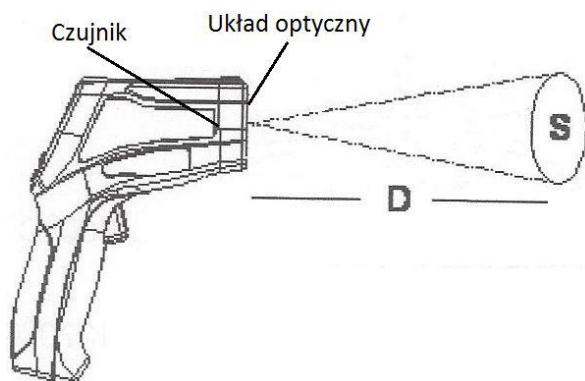
$T$  – temperatura bezwzględna.

Wraz ze wzrostem temperatury ciała doskonale czarnego:

- 1) wzrasta zdolność emisyjna ciała dla wszystkich długości fali,
- 2) wzrasta całkowita zdolność emisyjna ciała (rośnie moc promieniowania emitowanego przez ciało), proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury,
- 3) maksimum zdolności emisyjnej ciała przesuwają się w stronę fal krótszych.

### Pirometr radiacyjny

Pirometr radiacyjny to bezdotykowe optyczne urządzenie odbierające promieniowanie cieplne obiektu, obejmujące najczęściej długości fal od 8  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$ , w zakresie temperatur od  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tym samym jest on termometrem na podczerwień (radiacyjnym). Określa on temperaturę powierzchni mierzonego obiektu poprzez pomiar ilości promieniowanej przez powierzchnię obiektu energii podczerwonej. Promieniowanie cieplne wysyłane przez ciało, którego temperaturę się mierzy, skupiane jest za pomocą soczewki, zwierciadła lub światłowodu. Pirometry radiacyjne, które działają w oparciu o prawo Stefana-Boltzmana (całkowita moc wypromieniowana przez ciało jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury), nazywane są pirometrami całkowitego promieniowania i wyskalowane są dla ciała doskonale czarnego. Moc wydzielana w detektorze nie zależy od odległości detektora ciała promieniującego, pod warunkiem że pole widzialne przez płytkę detektora w całości leży na promieniującym ciele. Urządzenia te są szczególnie przydatne przy pomiarach temperatury gorących, trudno dostępnych lub ruchomych obiektów.



Rys. 1. Budowa pirometru [8]

Pirometr zbudowany jest z:

- układu optycznego,
- detektora,
- układu pomiarowego z wyświetlaczem.

Zadaniem układu optycznego jest skupienie promieniowania emitowanego z badanej powierzchni na detektorze, które zamieniane jest następnie na sygnał elektryczny. Układ pomiarowy przetwarza sygnał elektryczny na wskazania temperatury odczytywane na wyświetlaczu.

### Kalibratory temperatury

Kalibratory temperatury na podczerwień (firmy Fluke) zapewniają spójne, dokładne i niezawodne pomiary. Posiadają one regulowaną emisyjność i są skalibrowane radiometrycznie, a rozmiar powierzchni tarczy minimalizuje rozmiar błędów efektu źródłowego. Dodatkowo upraszczają pomiar, ponieważ wyjątkowo kompensują błędy powodowane przez ustawienia emisyjności pirometru. Tarcza celu, będącego elementem pieca, jest duża i nagrzewa się w sposób jednorodny, co jest niezwykle ważne dla prawidłowego przeprowadzenia pomiarów urządzeń na podczerwień. Kalibratory te cechuje duża tarcza, o średnicy 152 mm (6 cali), zakres pomiarowy od  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  (typ 4180) lub od  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (typ 4181).



Rys. 2. Stanowisko do wzorcowania pirometrów radiacyjnych w OUM Gdańsk

## Czynniki wpływające na pomiar

Na wynik badania wpływ mają czynniki zewnętrzne panujące w miejscu pomiaru. Należą do nich zarówno źródła zewnętrznego promieniowania, takie jak żarówki czy grzejniki, jak również czynniki atmosferyczne. Idealne warunki pomiaru panują w chłodne zachmurzone dni. Powłoka chmur zasłania przedmioty przed promieniowaniem słonecznym i „zimnym rozproszonym promieniowaniem niebieskim”. Z kolei w czasie deszczu lub podczas opadów śniegu wynik pomiarów może być zakłócony. Woda, lód i śnieg mają wysoką emisyjność i są nieprzepuszczalne dla promieniowania podczerwonego. Ponadto pomiar mokrych przedmiotów może zawierać błędy, ponieważ powierzchnia mierzonego przedmiotu chłodzi się podczas wyparowywania cieczy.

Względna wilgotność powietrza w środowisku pomiaru powinna być wystarczająco niska, aby nie było kondensacji w powietrzu (mgły) na mierzonym przedmiocie, na nasadce ochronnej lub obiektywie. Jeżeli obiektyw (lub nasadka ochronna) jest zamglona, część promieniowania podczerwonego nie zostanie odebrana, ponieważ nie będzie ono mogło w pełni przeniknąć przez wodę do obiektywu. Wyjątkowo gęsta mgła może mieć wpływ na wyniki pomiaru, ponieważ kropelki wody w ścieżce transmisji przepuszczają mniej promieniowania podczerwonego.

Ze względu na wpływ temperatury urządzenia na wyniki pomiarów, powinno ono znajdować się w laboratorium odpowiednio wcześniej przed wzorcowaniem. W przypadku wzorcowania w temperaturach niższych od temperatury punktu rosy, należy zwrócić uwagę na kondensację pary wodnej na powierzchni tarczy. W przypadku wzorcowania w temperaturach poniżej 0 °C pole pomiarowe tarczy nie może być odkryte dłużej niż 5 sekund. Kiedy na powierzchni pojawia się lód, należy przerwać procedurę wzorcowania i postępować zgodnie z instrukcją w celu usunięcia lodu z powierzchni oraz kontynuować przerwana serię pomiarową. W przypadku wzorcowania w temperaturach powyżej 100 °C należy zastosować przegrodę termiczną oddzielającą tarczę kalibratora od przyrządu wzorcowanego, którą należy zdjąć każdorazowo tuż przed odczytem wskazań. Kalibrator temperatury trzeba uruchomić odpowiednio wcześniej, biorąc pod uwagę czas schładzania lub wygrzewania się do odpowiedniej temperatury. Wzorcowanie wykonywane jest po ustabilizowaniu się warunków pomiaru na kalibratorze temperatury.

## Współczynnik emisyjności

Emisyjnością danego ciała dla całkowitego zakresu promieniowania, zwaną emisyjnością całkowitą, nazywa się stosunek natężenia promieniowania  $E_\lambda$ , w pełnym

zakresie promieniowania dla tego ciała, do natężenia promieniowania  $E_{0\lambda}$ , w pełnym zakresie promieniowania dla ciała czarnego, znajdującego się w tej samej temperaturze. Ciało, którego emisyjność zachowuje stałą wartość, nazywamy ciałem szarym. Matematyczny zapis emisyjności:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0\lambda}} \quad (6)$$

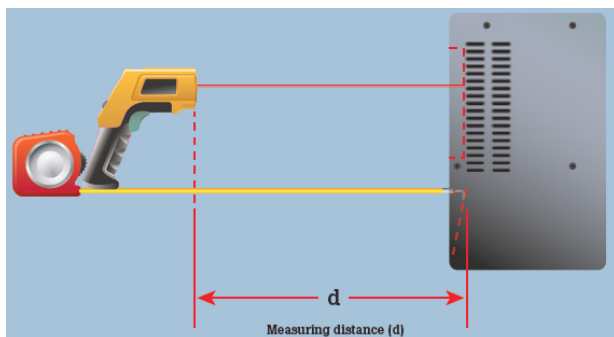
Duży wpływ na uzyskanie prawidłowych wyników ma właściwe określenie współczynnika emisyjności. Prawidłowo określony współczynnik emisyjności uzależniony jest od rodzaju materiału, stanu powierzchni, stanu skupienia, kąta obserwacji, użytej długości fali pomiarowej przez wzorcowany przyrząd. Im większa różnica między temperaturą tarczy kalibracyjnej a temperaturą otoczenia i im niższa emisyjność, tym większe są błędy pomiaru. Współczynnik emisyjności powinien być określony przez producenta w specyfikacji pomiarowej. Ustawiona emisyjność na obu urządzeniach powinna być taka sama, w przeciwnym razie budżet niepewności musi uwzględniać te różnice. Jeśli termometr na podczerwień ma regulowaną emisyjność, to ustawienie powinno być 0,95 na obu urządzeniach. Jeśli nie jest to możliwe, to kalibrator temperatury może kompensować ograniczoną liczbę emisyjności ustawienia inną niż 0,95.

## Długość fali

Rzeczywisty podział i intensywność promieniowania emitowanego przez określony obiekt w dużej mierze zależy od temperatury obiektu. Dla obiektu, w pobliżu temperatury pokojowej, większość emitowanego promieniowania znajduje się w części podczerwonej widma, w pobliżu 10  $\mu\text{m}$ . Jest to najczęściej używany zakres długości fali przez producentów pirometrów radiacyjnych. Przez pomiar promieniowania o ustalonej długości fali pirometr wyznacza temperaturę obiektu. Parametr ten, podany w specyfikacji wzorcowanego przyrządu, powinien mieścić się w zakresie widmowym kalibratorów temperatury, który wynosi (8 ÷ 14)  $\mu\text{m}$ , w przeciwnym razie budżet niepewności musi uwzględniać te różnice.

## Odległość od celu

Odległość między kalibratorem temperatury a piometrem jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na prawidłowy pomiar. Ważne jest, aby pirometr nie znajdował się zbyt blisko powierzchni tarczy kalibratora temperatury. Spowoduje to podgrzewanie się optyki piometru, co wiąże się z fałszywymi odczytami. Pirometr nie może też znajdować się za daleko, nie obejmie wtedy powierzchni całej tarczy i wyniki będą zafałszowane. Aby efekt rozpraszania nie miał wpływu na pomiar, zaleca się

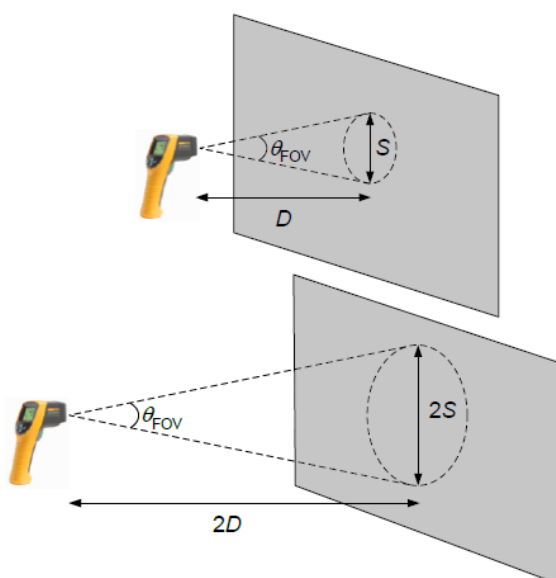


Rys. 3. Ustawianie odległości pomiarowej dla pirometrów przy użyciu kalibratora Fluke [5]

dobieranie odpowiedniej odległości i wielkości plamki, zgodnie ze specyfikacją producenta pirometru i/lub na wzorcowanym przyrządzie, jako stosunek odległości do wielkości plamki  $D/S$ .

### Pole powierzchni mierzonej

Istotne jest również prawidłowe określenie pola pomiarowego. W celu uzyskania dokładnych wyników pomiaru powierzchnia mierzonego obiektu (kalibrator temperatury, 15 cm średnica tarczy kalibracyjnej) musi być większa niż pole pomiaru. Im obiekt jest mniejszy, tym mniejsza musi być jego odległość od wzorcowanego przyrządu. Występuje tu efekt wielkości źródła, który może mieć znaczący wpływ na wyniki pomiarów. W idealnej sytuacji pole powierzchni mierzonego obiektu powinno całkowicie wypełniać pole widzenia pirometru. W praktyce to pole jest tylko przybliżoną wartością stosunku  $D/S$ . Rzeczywiste pole widzenia nie jest wyraźną granicą, powodem tego są niedoskonałości w układzie optycznym,



Rys. 4. Podwojenie odległości pomiaru  $D$  podwaja powierzchnię pola  $S$  zachowując kątowe pole widzenia [2]

brud, tłuszcz lub kurz na powierzchni soczewki, co powoduje rozproszenie promieniowania. Niektóre pirometry rzucają wiązkę lasera w formie pierścienia w celu wskazania użytkownikowi lokalizacji pola widzenia. Dla tych urządzeń lokalizacja pola pomiarowego jest łatwiejsza. Kąt pola widzenia jest określony wzorem:

$$\theta_{FOV} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{S}{2D} \right) \quad (7)$$

### Kąt obserwacji

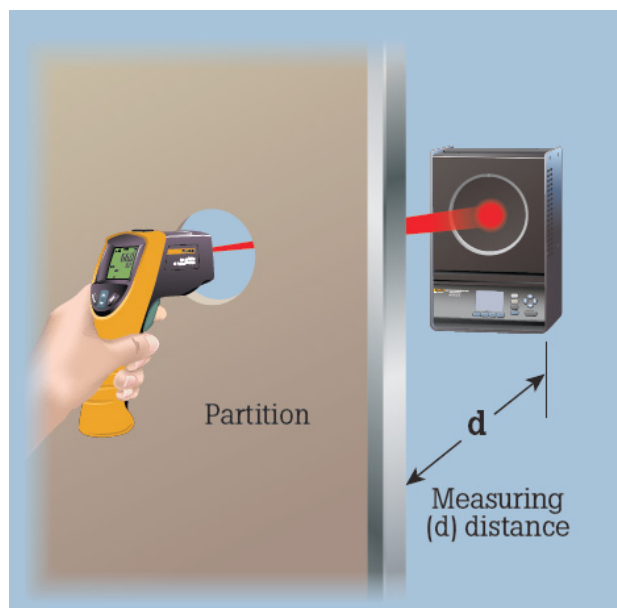
Emisyjność zmienia się wraz z kątem. Zwykle emisyjność jest maksymalna dla prostopadłego pomiaru i zera dla pomiaru równoległego. Pomiaru powinno się przeprowadzać instalując przyrząd wzorcowany równoległe do kalibratora temperatury tak, aby wiązka padała prostopadle do badanej powierzchni materiału (tarczy kalibracyjnej). Prawidłowe ustawienie osi wiązki powinno trafić dokładnie w środek tarczy kalibracyjnej. Może okazać się konieczne umieszczenie wzorcowanego przyrządu na statywie, tak by wyeliminować wszelkie drgania i ustabilizować pomiar.



Rys. 5. Centrowanie termometru na podczerwień na powierzchni kalibratora [5]

### Promieniowanie odbite

Kolejnym czynnikiem wpływającym jest temperatura tła, czyli temperatura obiektów zwróconych do mierzonej powierzchni. Laboratorium nie ma ścian o charakterze ciała doskonale czarnego, część promieniowania jest odbijana. Dla każdego nieprzezroczystego obiektu emisyjność i odbicie sumują się. Obiekt o emisyjności 0,8 ma współczynnik odbicia 0,2. Oznacza to, że 20 % całego promieniowania emitowanego z otaczających obiektów jest wykrywane przez piometr i dodawane do promieniowania emitowanego przez obiekt. Tak więc odczyt na pirometrze zależy nie tylko od temperatury obiektu, ale także od temperatury otoczenia. Obiekty, które mają dobrą emisyjność (bliską 1), wydają się być czarne, a im wyższa emisyjność, tym niższy współczynnik odbicia, a tym samym mniejszy wpływ otoczenia na odczyt pirometru. Zjawisko to może mieć mało znaczący wpływ na pomiar jedynie w przypadku, gdy mierzona temperatura jest



Rys. 6. Kontrolowanie temperatur odbitych w celu obniżenia temperatury [5]

bliska temperaturze otoczenia. W takiej sytuacji dodatkowe promieniowanie tła kompensuje częściowo niedoszacowanie promieniowania od obiektu. Czynniki te mają największy wpływ dla niskich temperatur. Sugeruje się stosowanie przysłon w celu eliminacji jak największej części promieniowania odbitego.

### Temperatura detektora

Sam detektor emituje promieniowanie. Sygnał ten na wyjściu czujnika odpowiada różnicy pomiędzy nadchodzącemu promieniowaniu od obiektu (w tym odbijanemu promieniowaniu) i promieniowaniu wychodzącemu

z detektora. Większość pirometrów ma niechłodzony detektor, więc jego temperatura będzie w przybliżeniu odpowiadała temperaturze otoczenia i różnice te mogą wpływać na wyniki pomiarów.

### Wnioski

Z powyższej analizy wynika, że na pomiar temperatury pirometrem radiacyjnym ma wpływ wiele czynników. Uwzględnione są tu najważniejsze z nich. Procedury wzorcowania tych urządzeń muszą być tak przemyślane, by równanie pomiaru uwzględniało emisyjność pirometru, temperaturę detektora, temperaturę otoczenia, właściwości kalibratora temperatury. Każde laboratorium indywidualnie powinno oceniać, jakie dodatkowe czynniki mają wpływ na pomiar w jego laboratorium, w zależności od wyposażenia i warunków otoczenia (uwzględniając np. hałas, jednorodność obiektu mierzzonego).

### Literatura

- [1] MSL Technical Guide 22 “Calibration of Low-Temperature Infrared Thermometers”.
- [2] MSL Technical Guide 26 “Size-of-Source Effect in Infrared Thermometers”.
- [3] Liebmann F., Fluke Calibration Web Seminar Series “How to Calibrate an Infrared Thermometer”.
- [4] Fluke 4180, 4181 Precision Infrared Calibrator.
- [5] Fluke Calibration “Infrared Thermometers Calibration – A Complete Guide”.
- [6] Łukjaniuk A., Bezdotykowe pomiary temperatury. Politechnika Białostocka, Białystok 2015.
- [7] Michalski M., Eckersdorf K., Kucharski J., Termometria, przyrządy i metody. Politechnika Łódzka, Łódź, 1998.
- [8] Strona internetowa: <http://pomiarytemperatury.pl/page/Bezdotykowy-pomiar-temperatury/>