

Od redakcji

Zgodnie z zapowiedzią podaną w zeszycie Nr 1/2002 (str. 5) kontynuujemy w bieżącym roku wydawanie „zeszytów tematycznych”. Bieżący numer 4/2002 poświęcony jest tematyce **pomiarów termowizyjnych**. Jest to kontynuacja „tematyki termowizyjnej” na łamach PAK-u z lat ubiegłych. Dotychczas ukazały się dwa zeszyty PAK 1/2000; PAK 11/2001 w których publikowano artykuły naukowo-techniczne z tej dziedziny. Kolejne zeszyty PAK-u będą również zorientowane tematycznie i **poświęcone metrologii**.

METROLOGIA

POMIARY TERMOWIZYJNE

Waldemar Andrzej MINKINA

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

PODSTAWY POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

Część IV – Pomiar temperatury ciał półprzezroczystych i poprzez te ciała

Dr hab. inż. Waldemar Andrzej MINKINA



Profesor nadzwyczajny Politechniki Częstochowskiej; kieruje Zakładem Technik Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych; obecnie także dyrektor Instytutu Elektroniki i Systemów Sterowania na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1983r, a doktora habilitowanego – w 1995r. Jest autorem i współautorem 1 monografii, około 70 publikacji oraz 6 patentów. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej oraz pomiarów ciepłych. Odbył wielokrotnie staże zagraniczne w Instytutach Miernictwa Uniwersytetów: Karlsruhe, Berlina Zachodniego, Drezna, Federalnym Urzędzie Miar (PTB w Berlinie), Sankt Petersburga i Lwowa. W zakresie termografii komputerowej ściśle współpracuje z Instytutem Miernictwa Uniwersytetu w Rostocku oraz Instytutem Elektroniki Uniwersytetu w Dreźnie. Jest członkiem: Sekcji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Rady Programowej Miesięcznika „Pomiary Automatyka Kontrola”, Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej, Zarządu Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (oddział w Częstochowie) oraz Stowarzyszenia Elektryków Polskich, gdzie jest rzecznikiem w trzech grupach.

Streszczenie

W artykule opisano przydatne w praktyce, podstawowe zagadnienia problematyki pomiarów termowizyjnych. Wskazano na problemy występujące podczas termowizyjnych pomiarów temperatury ciał półprzezroczystych, takich jak: szkło, plastik, gorące gazy spalinowe. Niekiedy występuje potrzeba pomiaru poprzez te media, gdzie obiekt, którego temperatura ma być zmierzona znajduje się na końcu drogi pomiarowej, np. za szybą. Artykuł stanowi kontynuację prac opublikowanych w numerach 1/2000 oraz 11/2001 PAK.

Słowa kluczowe: pomiary w podczerwieni, termografia, pomiary temperatury ciał półprzezroczystych

Abstract

In the paper there are described practically useful, basic problems of thermovision measurements. There are indicated problems connected with infrared temperature measurement of semitransparent media, like glass, plastics or combustion gases. Sometimes it is necessary to measure temperature through such media, when the target is situated at a distance, e. g. behind a glass window. The paper

is continuation of works published in the 1/2000 and 11/2001 issues of Pomiary Automatyka Kontrola.

Keywords: infrared measurements, thermography, temperature measurements of semitransparent media

Wstęp

Niniejszy artykuł jest kontynuacją tematyki podjętej w pracach [7,8], w których opisano podstawy teoretyczne pomiarów termowizyjnych, rys historyczny rozwoju, standardowe detektory promieniowania podczerwonego, błędy pomiarów termowizyjnych oraz problemy metrologiczne związane z interpretacją wyników. W niniejszej publikacji opisano metody pomiaru temperatury ciał półprzezroczystych oraz poprzez te ciała. Zagadnienia te są mało znane w polskiej metrologicznej literaturze fachowej, zaś na świecie opisywane w sposób marginalny, najczęściej nie przez metrologów. Dlatego celem niniejszej publikacji jest przybliżenie tego zagadnienia. Są także niekiedy problemy z ustaleniem prawidłowej, polskiej terminologii metrologicznej w tej dziedzinie, gdyż powstające nowe rozwiązania nie mają odzwierciedlenia w nazewnictwie istniejącej normy [9,10]. Dlatego w niniejszej pracy, w przypadku braku polskiego terminu, przyjęto określenia wynikające bezpośrednio z tłumaczenia angielskiego.

Ciała nieprzezroczyste, to takie, których współczynnik przepuszczenia $P=0$. Do ciał półprzezroczystych zalicza się ciała częściowo przepuszczające promieniowanie podczerwone w długościach fal zawartych w zakresie promieniowania widzialnego i podczerwonego. Niżej podano przykłady zastosowań pomiarów termowizyjnych, gdzie bezstykowa metoda pomiaru temperatury jest jedyną z możliwych do zastosowania, gdyż rodzaj obiektu nie pozwala na umieszczenie w nim termometru. Taka sytuacja występuje na wielu liniach produkcyjnych płaskich, cienkich materiałów, np.: szkła, warstw plastiku, przy pomiarze temperatury gazów spalinowych lub poprzez te gazy.

Szkło i plastik są materiałami półprzezroczystymi, przynajmniej dla oka, i dlatego wymagają specjalnego podejścia w celu znalezienia prawidłowej metody pomiaru ich temperatury. Zakres widmowy w którym ϵ materiałów półprzezroczystych jest bliskie jedności, a P bliskie zera, wykorzystuje się przy termowizyjnych pomiarach temperatury ich powierzchni. Niepełne pochłanianie może być w tym przypadku do zaakceptowania jedynie gdy znane są wartości współczynników P i odbicia R . Podobna zasada dotyczy pomiaru, a właściwie szacowania, temperatury gorących ga-

zów czy płomieni. Należy tu jednak podkreślić, że niektóre gazy, nawet w zakresie widmowym w którym charakteryzują się dużym ϵ i małym P , mimo to w ten sposób może być niemierzalnymi. Pomiarów termowizyjnych temperatury gazów należy dokonywać w sytuacji, gdy nie jest wymagana wysoka dokładność.

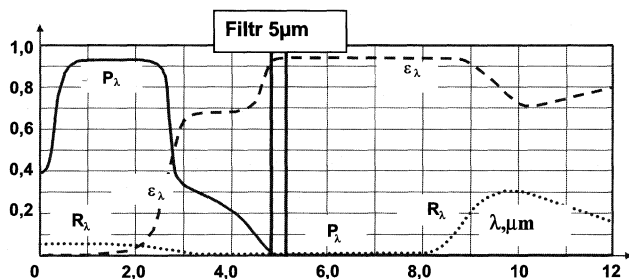
Niekiedy należy zmierzyć temperaturę obiektu poprzez szkło czy plastik. Zakres widmowy w którym emisyjność ϵ (lub współczynnik pochłaniania A) materiałów półprzezroczystych jest bliska zera, a współczynnik przepuszczania P bliski jedności, wykorzystuje się do pomiaru temperatury obiektów poprzez te materiały.

1. Pomiar temperatury ciał półprzezroczystych

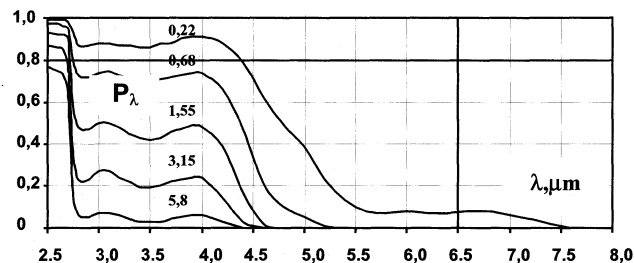
1.1. Pomiar temperatury szkła

Na rys. 1 przedstawiono właściwości widmowe szkła o niskiej temperaturze, to jest średnie wartości współczynników: emisyjności $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$, przepuszczania (transmisji) $P_\lambda = f(\lambda)$ oraz odbicia (refleksji) $R_\lambda = f(\lambda)$ w funkcji długości fali λ . Można zauważyć, że najlepsze warunki do pomiaru jego temperatury są dla $\lambda = 5-8 \mu\text{m}$. W tym zakresie jest ono ciałem szarym, $\epsilon \approx 0,97$, atmosfera między kamerą a obiektem, dla niewielkich odległości, jest przezroczysta oraz omija się główne pasma pochłaniania promieniowania atmosfery, spowodowane zawartością CO_2 oraz pary wodnej.

Na rys. 2 przedstawiono wartości współczynnika przepuszczania P_λ szkła sodowo-krzemowego w funkcji jego grubości i długości fali λ [4,6]. Gdy P_λ jest duże, to emisyjność ϵ jest mała. Można zauważyć, że współczynnik przepuszczania P_λ szkła maleje – co jest oczywiste, ze wzrostem jego grubości.



Rys. 1. Średnie wartości współczynników: emisyjności $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$, przepuszczania $P_\lambda = f(\lambda)$ oraz odbicia $R_\lambda = f(\lambda)$ szkła [4,11]



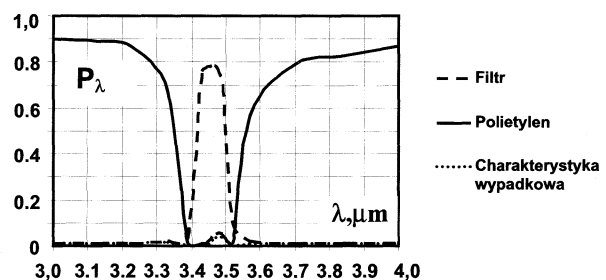
Rys. 2. Współczynnik przepuszczania P_λ szkła sodowo-krzemowego w funkcji jego grubości d , mm i długości fali λ [4,6]

Pomiaru temperatury szkła cienkiego, o grubości $d < 0,6 \text{ mm}$, lepiej jest dokonywać za pomocą kamery długofalowej (LWB). W tym zakresie większa jest wartość emisyjności ϵ oraz mniejsza współczynnika przepuszczania P_λ . Temperaturę szkła grubszego, o $d > 0,6 \text{ mm}$, można mierzyć za pomocą kamery długofalowej lub krótkofalowej. Ta ostatnia musi być jednak wyposażona w filtr wąskopasmowy o paśmie przepuszczania $5,0 \pm 0,1 \mu\text{m}$ – rys. 1. To stwierdzenie jest ważne przy wyborze typu kamery np. dla tzw. termowizyjnego „audytu” budynków i porównawczego pomiaru temperatury szyb w mieszkaniach. Z rys. 1 można zauważyć, że w zakresie światła widzialnego $\lambda = 0,35-0,75 \mu\text{m}$, szkło ma dobrą przepuszczalność $P_\lambda = 0,85-0,95$ – dlatego okna są robione ze szkła.

1.2. Pomiar temperatury cienkich powłok tworzywa sztucznego

Przy powlekaniu materiałów cienkimi powłokami plastikowymi, np. polietylenem czy teflonem, konieczny jest niekiedy pomiar ich temperatury. Aby tego dokonać, należy najpierw określić pasmo dobrego pochłaniania A (dużego ϵ) powłoki i dobrać filtr o odpowiednim paśmie przepuszczania promieniowania powłoki. Pasma pochłaniania polietylenu występuje w zakresie $3,4-3,5 \mu\text{m}$, tj. krótkofalowym, zaś teflonu w zakresie $8,0-8,7 \mu\text{m}$, tj. długofalowym [3].

Opisany przypadek pomiarowy zostanie rozpatrzony na przykładzie pomiaru temperatury polietylenu. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki widmowe współczynnika przepuszczania P_λ : polietylenu (linia ciągła), filtra zastosowanego do pomiaru jego temperatury (linia przerywana) oraz wypadkową charakterystykę przepuszczania promieniowania przez polietylen i filtr (linia punktowa) w funkcji długości fali λ . Można zauważyć, że charakterystyka wypadkowa przebiega w pobliżu wartości zerowej, potwierdzając bardzo dobry dobór filtra i zakresu widmowego dla pomiarów.

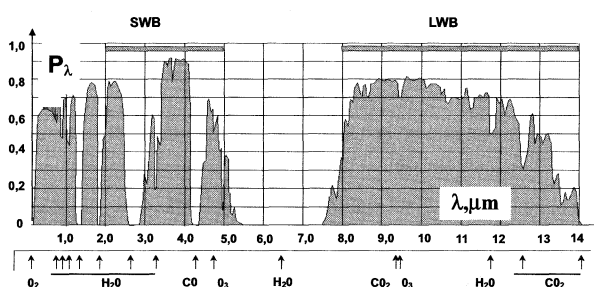


Rys. 3. Współczynnik przepuszczania P_λ polietylenu (linia ciągła), filtra zastosowanego do pomiaru jego temperatury (linia przerywana) oraz wypadkowy: polietylen + filtr (linia punktowa) w funkcji długości fali λ [3]

Aby pomiar był poprawny, należy jeszcze określić emisyjność polietylenu w paśmie przepuszczania filtra $3,4-3,5 \mu\text{m}$ uwzględniając, że $P_\lambda = 0,02$ – rys. 3 oraz zakładając, że współczynnik odbicia $R'_\lambda = 0,08$. Należy jednak podkreślić, że odbicie promieniowania następuje z dwóch stron powłoki polietylenu. Rzeczywisty współczynnik odbicia z jednej strony powłoki wyniesie więc $R_\lambda = 0,04$, a poszukiwana emisyjność polietylenu: $\epsilon = 1 - P_\lambda - R_\lambda = 0,94$.

1.3. Wyznaczanie temperatury gazów spalinowych lub płomieni

Na rys. 4 przedstawiono charakterystykę przepuszczalności widmowej P_λ promieniowania podczerwonego przez warstwę atmosfery ziemskiej o grubości 100 m w funkcji długości fali λ , z zaznaczeniem pasm pochłaniania przez pewne gazy.

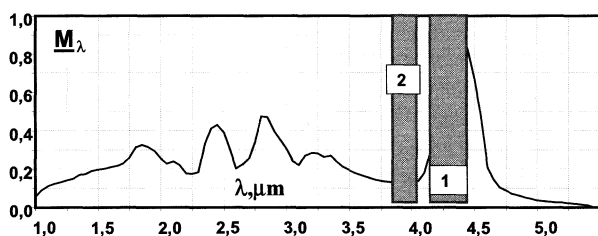


Rys. 4. Przepuszczalność widmowa P_λ promieniowania podczerwonego przez warstwę atmosfery ziemskiej o grubości 100 m [1, 6, 7, 11, 12]

Głębsze pasmo pochłaniania dwutlenku węgla CO_2 przy długości fali λ około $4,25\mu\text{m}$ zapewnia dobre warunki do pośredniego pomiaru temperatury płomieni lub gorących gazów. Pomiar ten polega bowiem na pomiarze temperatury CO_2 , który jest ich składnikiem. Należy tu jednak zaznaczyć, że CO_2 znajduje się także w atmosferze na drodze pomiarowej między kamerą a gazami, których temperatura jest mierzona. Dla podanego wyżej λ , CO_2 z atmosfery będzie pochłaniał promieniowanie CO_2 z gorących gazów. Z tego powodu ważne jest aby droga pomiarowa była możliwie krótka.

Szerokość pasma pochłaniania CO_2 , czyli szerokość pasma jego emisji, wzrasta z temperaturą gazu. Gorące CO_2 gazu będzie miało więc szersze pasmo emisji niż zakłócające pasmo emisji CO_2 z chłodnej atmosfery. Dlatego wpływ zakłócającego pomiar promieniowania CO_2 z atmosfery maleje ze wzrostem temperatury gazu. Niżej opisano ogólną koncepcję wyznaczania temperatury gorących gazów.

Na rys. 5 przedstawiono *przykładową* charakterystykę widmową względnego natężenia promieniowania gazu spalinowego $M_\lambda = f(\lambda)$ oraz zaznaczono zakres widmowy filtra pasmowo-przepustowego (1), o przykładowym zakresie przepuszczania $4,2-4,4\mu\text{m}$, w którym natężenie promieniowania gazu jest maksymalne, służący do wyznaczania jego temperatury.



Rys. 5. Przykładowa charakterystyka względnego natężenia promieniowania gazu spalinowego M_λ w funkcji długości fali λ z zaznaczeniem okien w których natężenie jest maksymalne (1) i minimalne (2) [3]

Analizując powyższe, można dojść do wniosku, że do wyznaczania temperatury gazów spalinowych lub płomieni najlepiej stosować kamery krótkofalowe SWB, wyposażone w filtr o przykładowym paśmie przepuszczania $4,25 \pm 0,225\mu\text{m}$. Jeżeli temperatura gazów nie jest wysoka, to taki system można stosować przy stosunkowo niewielkiej odległości kamery od źródła promieniowania – tj. gazów. Ze wzrostem ich temperatury, odległość może być większa. Jest to pomiar wyjątkowo trudny, dlatego jego dokładność nie jest wysoka. Z tego też powodu w tytule p. 1.3 celowo użyto pojęcia: „wyznaczanie” temperatury. Charakterystyka widmowa natężenia promieniowania innych płomieni, powstałych np. ze spalania węgla lub oleju, będzie inna od przedstawionej na rys. 5 z powodu tego, że w płomieniu będą cząstki sadzy i innych ciał stałych. Dlatego każdy rodzaj płomienia wymaga indywidualnej analizy w celu doboru odpowiednich filtrów i wyboru typu kamery.

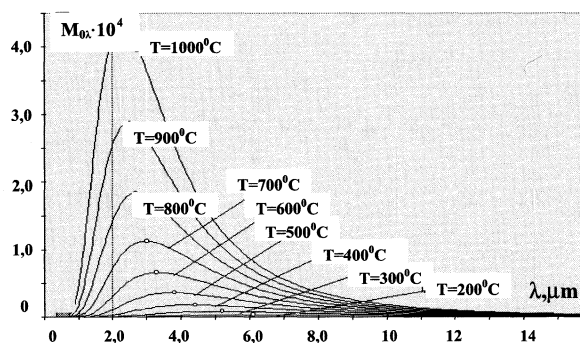
2. Pomiar temperatury obiektów poprzez ciała półprzezroczyste

2.1. Pomiar temperatury poprzez atmosferę

Na rys. 6 przedstawiono zależność monochromatycznej emitancji energetycznej (natężenia promieniowania) ciała czarnego $M_{0\lambda}$ od długości fali λ oraz jego temperatury T , według prawa Plancka:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(c_2 / \lambda T) - 1}, \quad \text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m},$$

gdzie: $c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.



Rys. 6. Zależność natężenia promieniowania ciała czarnego $M_{0\lambda}$ od długości fali λ [1,2,3,5,13]

Z rys. 6 można zauważyć, że natężenie promieniowania obiektów o wysokiej temperaturze jest większe w zakresie krótkofalowym SW: $2-5\mu\text{m}$ kamery, zaś obiektów o niskiej temperaturze – w długofalowym LW: $8-12\mu\text{m}$. Dlatego dla wysokich temperatur obiektów lepsza jest kamera SWB, zaś dla niskich – LWB. Z rys. 4 można zauważyć, że przepuszczalność atmosfery jest lepsza w zakresie długofalowym – szczególnie dla dużych odległości. Opisany przypadek dotyczy atmosfery idealnie „czystej”, tj. bez zapylenia, mgły itp. Dla atmosfery rzeczywistej, uwzględniając odległość obiektu, jego temperaturę, zapylenie i wilgotność atmosfery nie zawsze tak jest. Wtedy często lepsza jest kamera SWB. Problem jednak staje się na tyle złożony, że wymaga szerszego opisu. Tematowi temu poświęcona będzie kolejna publikacja.

2.2. Pomiar temperatury poprzez szkło

W p. 1.1 opisano metody pomiaru temperatury szkła poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów ograniczających widmo promieniowania do takiego zakresu w którym szkło maksymalnie pochłania padające na niego promieniowanie (współczynnik pochłaniania A_{max} jest maksymalny), a w związku z tym maksymalnie emituje promieniowanie własne: $\epsilon = \epsilon_{\text{max}}$.

Aby zmierzyć temperaturę obiektu poprzez szkło, niezbędne jest wykorzystanie zakresu widmowego w którym charakteryzuje się ono minimalnym współczynnikiem pochłaniania A (tj. minimalną emisyjnością ϵ) a maksymalnym współczynnikiem przepuszczania P . Typowy może być tutaj przypadek pomiaru temperatury włókna żarówki poprzez bańkę szklaną, która dodatkowo może być cieplą.

Z rys. 1,2 można zauważyć, że najlepsza przepuszczalność P szkła jest dla $\lambda < 2,7\mu\text{m}$. Dla $\lambda > 2,7\mu\text{m}$ silnie wzrasta ϵ , czyli współczynnik pochłaniania A . Ze wzrostem temperatury szkła, próg $2,7\mu\text{m}$ ulega przesunięciu w kierunku fal krótszych. Dlatego do pomiaru temperatury obiektów poprzez szkła należy stosować kamery krótkofalowe SWB i filtry wąkopasmowe o paśmie przepuszczania $2,35 \pm 0,11\mu\text{m}$. W tym zakresie kamera krótkofalowa jest jednak niezbyt czuła, gdyż najlepiej pracuje ona dopiero w zakresie $3-5\mu\text{m}$. Jednak, gdy temperatura obiektu jest wysoka (rozgrzane włókno żarówki), uzyskuje się dużą wartość sygnału z detektora i pomiar jest możliwy.

2.3. Wyznaczanie temperatury poprzez gazy spalinowe

Metodami termowizyjnymi można wyznaczać temperatury obiektów wewnątrz nagranych pieców komorowych, tj. poprzez gorącą atmosferę. W tym przypadku detektor kamery będzie odbierał promieniowanie obiektu oraz promieniowanie zakłócające gazów spalinowych czy gorącej atmosfery, będących między kamerą a obiektem. Promieniowanie gazów będzie tym silniejsze, im wyż-

sza będzie ich temperatura. Aby tego uniknąć należy zastosować odpowiedni filtr. W celu określenia pasma przepuszczania filtra, należy znać charakterystykę widmową natężenia promieniowania spalanego gazu. Każdy gaz może mieć inną taką charakterystykę w zależności od rodzaju gazu, zawartości wody i innych cząstek. Dla wyznaczenia temperatury gazu spalinowego wybiera się pasma w których występuje duże natężenie promieniowania gazu – p. 1.3, zaś przy wyznaczaniu temperatury poprzez gazy spalinowe – pasma w których natężenie promieniowania gazu jest minimalne.

Na rys. 5 przedstawiono przykładową charakterystykę widmową względnego natężenia promieniowania gazu spalinowego $M_\lambda=f(\lambda)$ [3] oraz zaznaczono zakres widmowy filtra pasmowo-przepustowego (2), o zakresie przepuszczania 3,75-4,02 μm , w którym zakłócające natężenie promieniowania gazu jest minimalne. Zastosowanie tego filtra umożliwi wyznaczenie temperatury obiektu poprzez gazy spalinowe. Analogicznie jak w przypadku wyznaczania temperatury gazów spalinowych – p. 1.3, także i wyznaczanie temperatury poprzez gazy spalinowe jest niedokładne. Dlatego od eksperymentatora wymagane jest duże doświadczenie.

3. Redukcja wpływu promieniowania słonecznego

Prowadzenie pomiarów na zewnątrz może niekiedy powodować pewne problemy. Promieniowanie słoneczne może zafałszować wynik, szczególnie podczas pomiaru temperatury obiektu o małej emisyjności, np. wypolerowanej powierzchni metalu o niskiej temperaturze.

Promieniowanie słoneczne osiąga swoje maksimum około 0,5 μm , które znajduje się w zakresie widmowym światła widzialnego $\lambda=0,35-0,75\mu\text{m}$. Wynika to z prawa przesunięć Wiena oraz założenia temperatury powierzchni słońca równej 6000K:

$$\lambda_{\text{max}}T = 2896\mu\text{m}\cdot\text{K}, \quad \text{a stad:} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{2896}{6000} = 0,48 \mu\text{m}.$$

Można więc zauważyć, że kamery długofalowe (LWB), pracujące w zakresie 8-12 μm , są znacznie mniej wrażliwe na wpływ promieniowania słonecznego niż kamery krótkofalowe, które pracują w zakresie 2-5 μm . Aby zagwarantować pełną redukcję zakłócającego wpływu promieniowania słonecznego można dodatkowo zastosować odpowiednie filtry: dla kamery SWB o początkowym paśmie przepuszczania $\lambda_{\text{min}}>3,5\mu\text{m}$, a dla LWB – $\lambda_{\text{min}}>7,5\mu\text{m}$.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy przedstawionego materiału, można zauważyć, że:

- Dla pomiarów z dużej odległości kamera LWB jest lepsza. Przepuszczalność idealnie „czystej” atmosfery jest bardziej stabilna w zakresie fal LW – rys. 4. Dla atmosfery rzeczywistej nie zawsze tak jest. Wtedy często lepsza jest kamera SWB.
- Kamera długofalowa daje możliwość pomiaru temperatury w szerszym zakresie. Wynika to ze wzoru na wartość sygnału wyjściowego z detektora:

$$u(T) = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - C}$$

gdzie: A, B, C są stałymi parametrami charakterystycznymi dla danego detektora.

Parametr B dla kamery krótkofalowej wynosi $B_{\text{SW}}=3\cdot 10^3$ i jest większy niż dla kamery długofalowej $B_{\text{LW}}=1,5\cdot 10^3$ [7], co skutkuje większą stromością charakterystyki $u(T)$ detektora. Detektor szybciej się nasyca, a zatem zakres mierzonych kamerą krótkofalową temperatur musi być mniejszy,

- Kamera LWB jest mniej wrażliwa niż SWB na zakłócające promieniowanie słoneczne, które leży w zakresie światła widzialnego 0,35-0,75 μm ,

- Do pomiaru temperatury szkła lepsza jest kamera długofalowa. Najlepsze warunki do jego pomiaru są dla $\lambda=5-8\mu\text{m}$. W tym zakresie szkło jest ciałem szarym, $\epsilon\approx 0,97$ – rys. 1,2, atmosfera między obiektem a kamerą, dla niewielkich odległości, jest przezroczysta oraz omija się główne pasma pochłaniania promieniowania przez CO_2 i parę wodną – rys. 4,
- Do pomiaru temperatury obiektu poprzez szkło zdecydowanie lepsza jest kamera krótkofalowa SWB.

Podsumowując należy stwierdzić, że wybór kamery LWB czy SWB zależy od konkretnej sytuacji pomiarowej i jest uwarunkowany czynnikami takimi jak: rodzaj obiektu, jego temperatura, odległość, rodzaj atmosfery między obiektem a kamerą i wieloma innymi. Typ nie ma znaczenia, pod warunkiem, że zastosowana kamera spełnia stawiane wymagania dotyczące rozdzielczości temperaturowej i przestrzennej. Przykładowo, konieczność zastosowania określonego filtra lub zakresu widmowego pochłaniania promieniowania narzuca typ kamery, który należy zastosować. Generalną wadą stosowania filtrów przy pomiarze temperatury obiektów „półprzezroczystych” jest utrata czułości systemu, spowodowana zawężeniem zakresu widmowego. Czułość systemu zmniejsza się w przybliżeniu proporcjonalnie do stosunku:

$$\frac{\text{zakres} \cdot \text{widmowy} \cdot \text{filtra}}{\text{zakres} \cdot \text{widmowy} \cdot \text{kamery}}$$

Metodami termowizyjnymi można mierzyć temperatury ciał czarnych, szarych i nieszarych (promieniujących selektywnie), które posiadają odpowiednią wartość współczynnika emisyjności ϵ . Pomiar temperatury ciał o małym ϵ jest bardzo trudny i niedokładny.

Podziękowanie

Pragnę podziękować Panu mgr inż. Pawłowi Rutkowskiemu, przedstawicielowi Firmy FLIR w Polsce, za dyskusję maszynopisu pierwszej wersji artykułu i cenne uwagi, które podniosły wartość merytoryczną publikacji.

Literatura

- [1] Z. BIELECKI, A. ROGALSKI: Detekcja sygnałów optycznych, WNT, Warszawa, 2001,
- [2] K. CHRZANOWSKI: Non-contact thermometry – Measurement errors, Wydawnictwo SPIE (Society of Photooptical Instrumentation Engineers) – oddział w Polsce, Warszawa 2000,
- [3] IR-BOOK, Materiały szkoleniowe Firmy FLIR, Level II (Infrared Training Center – itc, International), 2000,
- [4] IRCON Inc.: Glass temperature measurement, Technical Note TN 101, 1997
- [5] X. MALDAQUE: Non destructive evaluation of materials by infrared thermography, London, Springer-Verlag, 1993,
- [6] L. MICHALSKI, K. ECKERSDORF, J. KUCHARSKI: Termometria – przyrządy i metody, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998,
- [7] W. MINKINA, P. RUTKOWSKI, W. WILD: Podstawy pomiarów termowizyjnych, część I – istota termowizji i historia jej rozwoju oraz, część II – współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, błędy metody, Pomiary Automatyka Kontrola 46 (2000) Nr 1, str. 7-10 (cz. I) oraz str. 11-14 (cz. II),
- [8] W. MINKINA: Podstawy pomiarów termowizyjnych, część III – problemy metrologiczne, interpretacja wyników, Pomiary Automatyka Kontrola 47 (2001) Nr 11, str. 5-8,
- [9] PN-85/N-01103 „Promieniowanie optyczne – oznaczenia wielkości fizycznych” Wydawnictwa Normalizacyjne, 1986,
- [10] PN-90/E-01005 „Technika świetlna, terminologia” Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1991,
- [11] Prospekty firmy LAND Infrared, Dronfield, Sheffield S18 6DJ, England,
- [12] G. RUDOWSKI: Termowizja i jej zastosowanie, WKiŁ, Warszawa, 1978,
- [13] TECHNISCHE MESSEN, 66 (1999) Nr 3, Nr 9 mon tematyczne zeszyty pod redakcją G. Gerlacha, w całości poświęcone tematyce pomiarów termowizyjnych.