

Tadeusz KRUCZEK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

Wyznaczanie radiacyjnej temperatury otoczenia przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni

Dr inż. Tadeusz KRUCZEK

Studia oraz doktorat na Wydziale Mechanicznym Energetycznym Politechniki Śląskiej. Ciągłe, praca w Instytucie Techniki Ciepłej. Działalność naukowa w obszarze doskonalenia gospodarki energetycznej w przemyśle, techniki pomiarów cieplnych i termowizyjnych, diagnostyki cieplnej obiektów. Staże w kilkunastu zagranicznych ośrodkach naukowych. Członek Komisji Energetyki PAN O/Katowice, kierownik Laboratorium Techniki Ciepłej w Instytucie Techniki Ciepłej.

e-mail: tadeusz.kruczek@polsl.pl



Streszczenie

Jednym z parametrów wpływającym na wyniki termowizyjnego pomiaru temperatury jest temperatura otoczenia. W przypadku pomiarów w otwartej przestrzeni (budynki, rurociągi i in.) otoczenie składa się z dwóch elementów: nieboskłonu i gruntu. Elementy te mają na ogół różne temperatury. W pracy przedstawiono sposób pomiaru temperatury nieboskłonu, a następnie metodę wyznaczania temperatury izotermicznego otoczenia badanego obiektu zastępującego układ dwóch elementów otoczenia o różnych temperaturach: podłoża i nieboskłonu. W oparciu o opracowany model przeprowadzono obliczenia numeryczne, a wyniki przedstawiono na wykresach. Umożliwiają one określenie zastępczej temperatury otoczenia przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni.

Słowa kluczowe: pomiary termowizyjne, radiacyjna temperatura otoczenia, termowizyjna diagnostyka rurociągów, pomiary w otwartej przestrzeni.

Determination of radiative ambient temperature during measurements in open air space

Abstract

During the thermovision inspection a few important parameters influence the results of temperature measurements. Among these parameters the emissivity of surface under consideration as well as the temperature of the ambient elements can be specified. In the case of overhead heat pipelines, convective and radiative heat transfers take place between thermal pipeline and its surroundings. Generally, the ambient of the external overhead pipeline consists of two surfaces: hypothetical sky and ground surface, Figs. 1, 2a. The method concerning the determination of apparent temperature of the hypothetical sky surface has been developed. The method is based on radiosity balances formulated for each considered element [1]. In this method the radiation of atmosphere towards the ground surface is substituted by the radiation of the assumed artificial surface, Fig. 1. As a result, the ambient system of two surfaces having different temperatures is obtained, Fig. 2a. Next, this system is converted into one-surface system and a method of expressing the radiation influence of these elements on the measurement result by means of one ambient temperature is developed. The aforementioned temperature is called an equivalent ambient temperature and can be calculated on the basis of equation (22). Numerical calculations have been carried out for the assumed typical data and results are shown in diagrams of Figs. 3, 4, 5. The diagrams allow estimating properly the representative ambient temperature in the case of infrared measurements of temperature in open air space.

Keywords: infrared measurements, radiative ambient temperature, thermovision diagnosis of pipelines, measurements in open air space.

1. Oznaczenia i indeksy

- $\epsilon_{\lambda}(T)$ - spektralna gęstość emisji ciała doskonale czarnego dla temperatury T [1] wynikająca z prawa Plancka, W/m^3
- ϵ - gęstość emisji ciała czarnego w przedziale długości fali $\lambda-\lambda''$ przy danej temperaturze T , W/m^2

- \dot{E}_i, \dot{H}_i - strumień emisji własnej i jasności i -tej powierzchni, W/m^2
- F - pole powierzchni, m^2
- \dot{h} - jednostkowa jasność powierzchni, W/m^2
- ϵ, r - emisyjność i refleksyjność powierzchni, odpowiednio
- α - kąt nachylenia badanej powierzchni w stosunku do płaszczyzny nieboskłonu, $^\circ$
- φ - stosunek konfiguracji
- λ', λ'' - granice spektralne zakresu kamery, m
- τ - transmisyjność warstwy atmosfery
- g - dotyczy gazu
- 1, 2, 3, 4 - dotyczy odpowiednio badanej powierzchni, podłoża, nieboskłonu, umownego nieboskłonu
- $2e$ - dotyczy ekwiwalentnego otoczenia

2. Wstęp

Termowizyjne metody pomiaru temperatury są nowoczesną, skuteczną i szybką metodą diagnostyki cieplnej. Wraz z ciągłym doskonaleniem samych urządzeń pomiarowych następują coraz to liczniejsze i coraz to bardziej zaawansowane zastosowania tej technologii pomiarów w bardzo wielu dziedzinach [2].

Przy termowizyjnych pomiarach temperatury występuje radiacyjny wpływ otoczenia badanego obiektu na wynik pomiaru [3]. Wpływ ten wynika z opromieniowania badanej powierzchni przez otoczenie, a w praktyce uwzględnia się go przez zadanie temperatury otoczenia. W przypadku termowizyjnych pomiarów temperatury ciał w otwartej przestrzeni, otoczenie badanego obiektu stanowi w części nieboskłon i w części powierzchnia podłoża wraz z ewentualnymi elementami zabudowy. Elementy te mają na ogół zróżnicowane temperatury, natomiast kamery termowizyjne mają możliwość zadawania tylko jednej temperatury otoczenia dla przeprowadzenia wewnętrznej korekty wpływu temperatury otoczenia na wynik pomiaru. Problem ten występuje przy diagnostyce cieplnej napowietrznych rurociągów energetycznych, budynków i wszelkich innych obiektów znajdujących się w otwartej przestrzeni [4, 5].

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania ekwiwalentnej (zastępczej) radiacyjnej temperatury otoczenia badanego obiektu przy termowizyjnym pomiarze jego temperatury w przypadku występowania w jego otoczeniu dwóch izotermicznych powierzchni zamykających przestrzeń jak ma to miejsce w przypadku pomiarów w otwartej przestrzeni. Zaproponowany sposób może być również zastosowany w przypadku występowania większej liczby powierzchni otaczających badany obiekt. Ponadto przedstawiono sposób pomiaru pozornej temperatury nieboskłonu niezbędnej przy wyznaczaniu wymienionej wyżej ekwiwalentnej temperatury otoczenia.

3. Pozorna temperatura nieboskłonu

Przy termowizyjnym pomiarze temperatury w otwartej przestrzeni otoczenie badanej powierzchni stanowi przestrzeń nieboskłonu oraz powierzchnia ziemi. W celu określenia temperatury zastępczego otoczenia niezbędna jest znajomość temperatury jego elementów składowych. O ile w przypadku istniejącej w rzeczywistości powierzchni podłoża określenie jej temperatury nie stanowi żadnej trudności, to problemem jest właściwe wyznaczenie temperatury hipotetycznej powierzchni nieboskłonu.

W celu rozwiązania wymienionego zagadnienia, przeprowadzono przedstawione poniżej rozumowanie. Przyjmuje się, że badany obiekt (np. napowietrzny rurociąg) znajduje się na stosunkowo niewielkiej wysokości nad powierzchnią podłoża. Nad

badanym rurociągiem znajduje się gruba warstwa atmosfery zawierająca pewne ilości gazów aktywnych radiacyjnie, głównie parę wodną. Mimo niskiego stężenia w atmosferze gazów aktywnych radiacyjnie, warstwa ziemskiej atmosfery niemal w całości pochłania promieniowanie (np. słoneczne) w pewnych zakresach długości fali ze względu na stosunkowo dużą jej grubość [1] jak również emituje znaczący strumień promieniowania cieplnego. Przyjęty do analizy schemat zachodzących zjawisk towarzyszących badaniom termowizyjnym (np. rurociągu) w otwartej przestrzeni, przedstawiono na rys. 1. Przyjęto, że badany obiekt znajduje się pomiędzy dwoma nieskończenie rozległymi równoległymi płaszczyznami. Dolną płaszczyznę stanowi powierzchnia gruntu, a górną umowna granica atmosfery, w razie zachmurzenia jako tę granicę można przyjąć powierzchnię warstwy chmur.

Dla celów prowadzonej analizy, w bezpośrednim sąsiedztwie badanego obiektu wprowadza się umowną płaszczyznę podziału przestrzeni atmosferycznej, równoległą do już przyjętej powierzchni podłoża i umownej granicy atmosfery. Powierzchnię tę na rys. 1 oznaczono numerem 4. Powierzchnia ta jest całkowicie przepuszczalna dla padającego na nią promieniowania. W konsekwencji, obserwując powierzchnię podziału od strony przestrzeni A (rys. 1) zaobserwujemy łączny radiacyjny strumień energii \dot{H}_{4A} będący sumą wszystkich strumieni radiacyjnych padających na tę powierzchnię z drugiej strony. Podobnie będzie gdy obserwator znajdzie się w przestrzeni B.

Dla ilościowego opisu tego procesu najlepiej posłużyć się metodą bilansu jasności stosowaną w modelowaniu radiacyjnej wymiany ciepła [1]. Jasność powierzchni jest sumą emisji własnej powierzchni wynikającej z prawa Plancka oraz promieniowania odbitego od badanej powierzchni, a pochodzącego od innych elementów. Wyraża to poniższą zależność zapisaną dla i -tej powierzchni przy j -tych powierzchniach otaczających tę powierzchnię wraz z bryłą gazu wewnątrz:

$$\dot{H}_i = \dot{E}_i + F_i r_i \dot{e}_g + r_i \sum_j \varphi_{ji} \tau_{ji} \dot{H}_j, \quad (1)$$

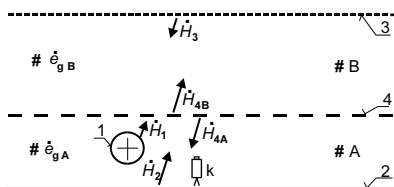
gdzie:

$$\dot{H}_i = F_i \dot{h}_i, \quad \dot{E}_i = F_i \varepsilon_i \dot{e}_i \quad \text{i} \quad \dot{e}_i = \int_{\lambda}^{\lambda''} \dot{e}_\lambda(T_i) d\lambda \quad (2)$$

$$\text{oraz} \quad \dot{e}_\lambda(T_i) = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T_i) - 1],$$

natomiast C_1 , C_2 są pierwszą i drugą stałą promieniowania [1].

Gęstość emisji \dot{e}_g dla gazów powinna być wyznaczana stosownie do przyjętego modelu promieniowania gazów [1]. Zagadnienia tego nie rozwija się tutaj ze względu na jego obszerność oraz głównie jakościowy charakter powyższych rozważań.



Rys. 1. Przyjęty do analizy schemat radiacyjnej wymiany ciepła pomiędzy napowietrznym rurociągiem i elementami jego otoczenia, 1-badany obiekt, 2-podłoże, 3-hipotetyczna granica nieboskładu, 4- pozorna powierzchnia podziału stref, A-warstwa atmosfery otaczająca rurociąg (cienka), B- warstwa atmosfery nad rurociągiem (gruba), k-kamera termowizyjna

Fig. 1. Radiation heat exchange scheme between overhead pipeline and its surroundings assumed for analysis, 1-examined object, 2-ground, 3-hypothetical border of sky space, 4- apparent surface of zones division, A-atmosphere layer surrounding pipeline (thin), B-atmosphere layer over pipeline (thick), k-infrared camera

Bilans jasności sporządza się dla każdej powierzchni. W analizowanym przypadku wszystkie rozpatrywane powierzchnie są płaskie lub wypukłe w związku z czym nie wystąpi efekt samo-

opromieniowania. Zakłada się również, że refleksyjność powierzchni badanej za pomocą kamery ma charakter całkowicie dyfuzyjny. Jasności występujących powierzchni należy traktować jako jasności pasmowe gdzie szerokość pasma promieniowania cieplnego odpowiada zakresowi spektralnemu używanej kamery termowizyjnej. Podobnie gęstość emisji gazu \dot{e}_g jest gęstością wyznaczoną dla wymienionego zakresu spektralnego [1]. Wymienione bilanse jasności mają postacie:

$$\dot{H}_1 = \dot{E}_1 + F_1 r_1 \dot{e}_{gA} + r_1 (\dot{H}_2 \tau_{21} \varphi_{21} + \dot{H}_{4A} \tau_{41} \varphi_{41}), \quad (3)$$

$$\dot{H}_2 = \dot{E}_2 + F_2 r_2 \dot{e}_{gA} + r_2 (\dot{H}_1 \tau_{12} \varphi_{12} + \dot{H}_{4A} \tau_{42} \varphi_{42}), \quad (4)$$

$$\dot{H}_3 = \dot{E}_3 + F_3 r_3 \dot{e}_{gB} + r_3 \dot{H}_{4B} \tau_{43} \varphi_{43}, \quad (5)$$

$$\dot{H}_{4B} = F_4 \dot{e}_{gA} + \dot{H}_1 \tau_{14} \varphi_{14} + \dot{H}_2 \tau_{24} \varphi_{24}, \quad (6)$$

$$\dot{H}_{4A} = F_4 \dot{e}_{gB} + \dot{H}_3 \tau_{34} \varphi_{34}, \quad (7)$$

gdzie:

$$\dot{H}_{4A} = F_4 \dot{h}_{4A}, \quad \dot{H}_{4B} = F_4 \dot{h}_{4B}. \quad (8)$$

W trakcie dalszych przekształceń wykorzystano prawo wzajemności i zamkniętości odnośnie stosunków konfiguracji. Ponadto przyjęto uzasadnione założenia upraszczające, że $\varepsilon_2 = 1$ ($r_2 = 0$) oraz $\varphi_{41} = \varphi_{21} = 0$ (ponieważ $F_2 = F_3 = F_4 \gg F_1$), a także ścisłą zależność $\varphi_{43} = \varphi_{34} = 1$ wobec nieskończonej rozległości i równoległości powierzchni 2, 3, 4, rys. 1.

W konsekwencji, po przekształceniach zależności (3÷8), otrzymano wyrażenie ujmujące jasność jednostkową powierzchni 4 obserwowaną od strony strefy A:

$$\dot{h}_{4A} = \dot{e}_{gB} + \varepsilon_3 \tau_{34} \dot{e}_3 + r_3 \tau_{34} (\dot{e}_{gB} + \tau_{43} \dot{e}_{gA} + \tau_{43} \tau_{24} \dot{e}_2). \quad (9)$$

Wielkość \dot{h}_{4A} wyraża gęstość radiacyjnego strumienia energii który dojdzie do obiektywu kamery po skierowaniu jej pionowo w górę.

Pozorna temperatura nieboskładu T_4 wynika z warunku:

$$\int_{\lambda}^{\lambda''} \dot{e}_\lambda(T_4) d\lambda = \dot{h}_{4A}. \quad (10)$$

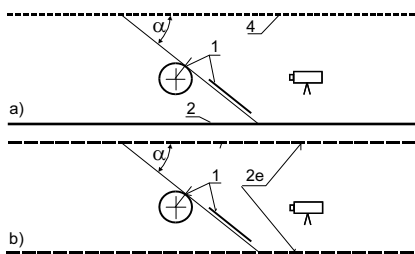
Podsumowując, z przeprowadzonych rozważań wynika, że po zadaniu w kamerze emisyjności równej 1,0 i nastawieniu dystansu równego odległości pomiędzy kamerą i płaszczyzną podziału stref (powierzchnią 4) w rezultacie wykonania pomiaru temperatury nieboskładu otrzyma się wprost wartość jego pozornej temperatury. W praktyce, podczas typowych pomiarów, tym zalecanym dystansem będzie odległość kamery od powierzchni badanego obiektu. Tak zmierzona wartość temperatury nieboskładu będzie ważna tylko w zakresie spektralnym kamery jaką wykonano pomiar. Temperatura ta będzie wykorzystana w rozważaniach przedstawionych w następnym rozdziale.

4. Zastępcza temperatura otoczenia przy pomiarach w otwartej przestrzeni

Niniejszy rozdział stanowi kontynuację rozważań zawartych w poprzednim. W rezultacie przeprowadzonych rozważań pierwotny układ elementów sprowadzono do układu składającego się z dwóch powierzchni i badanego obiektu. Mówiąc krótko, po określeniu pozornej temperatury powierzchni 4, co pozwala na

odrzuć tę część obszaru, która znajduje się ponad tą powierzchnią, dalsze rozważania będą dotyczyły dolnego obszaru „A” z rys. 1. W dalszej analizie podtrzymuje się założenie, że każda z powierzchni występujących w obecnym układzie jest izotermiczna. Obecnie układ składa się z powierzchni podłoża, powierzchni nieboskłonu i powierzchni badanego obiektu. Pozorna temperatura nieboskłonu na ogół znacząco różni się od temperatury powierzchni podłoża (gruntu). Podtrzymuje się nadal założenie, że obie te powierzchnie są równoległymi płaszczyznami, nieskończenie rozległymi, rys. 2a.

Z tego względu, że podczas pomiaru termowizyjnego wpływ otoczenia można wyrazić za pomocą tylko jednej temperatury, zaproponowano przekształcenie otoczenia dwuelementowego w izotermiczne otoczenie jednoelementowe przy zachowaniu jego ilościowego radiacyjnego wpływu na badaną powierzchnię, rys. 2b.



Rys. 2. Schemat układu pomiaru temperatury w otwartej przestrzeni, a) otoczenie nieizotermiczne przed przekształceniem, b) otoczenie izotermiczne po przekształceniu; 1-badany obiekt, 2-podłoże, 4-sztuczna powierzchnia zastępująca nieboskłon, 2e-powierzchnia otoczenia jednoelementowego

Fig. 2. Scheme of measurement system in open air space, a) non-isothermal ambient before conversion, b) isothermal ambient after conversion; 1-examined object, 2-ground, 4-artificial surface substituting air sky space, 2e-surface of one-element ambient

W celu opracowania modelu umożliwiającego przekształcenie dwuelementowego nieizotermicznego otoczenia badanej powierzchni w otoczenie izotermiczne jednoelementowe zastosowano ponownie metodę bilansu jasności [1, 3]. W dalszej analizie zaniebano wpływ promieniowania powietrza atmosferycznego oraz pochłaniania w tym powietrzu promieniowania pochodzącego z badanej powierzchni i powierzchni stanowiących jej otoczenie. Nie ma to praktycznie żadnego wpływu na wyniki rozważań ponieważ, dotyczą one niewielkich odległości pomiędzy poszczególnymi elementami układu pomiarowego, a ponadto analiza ta dotyczy wyznaczenia zastępczej temperatury otoczenia mającej z założenia pośredni wpływ na wynik pomiaru.

W tych warunkach przy obserwacji badanej powierzchni za pomocą kamery, do jej obiektywu dochodzi radiacyjny strumień energii składający się z emisji własnej badanej powierzchni oraz promieniowania pochodzącego z otoczenia, odbijającego się od tej powierzchni. Sumę tych dwóch strumieni radiacyjnych nazywa się jasnością [1]. Dla przyjętych warunków, poniżej zapisano w ogólnej postaci zależności opisujące jasności poszczególnych elementów układu pomiarowego w przypadku otoczenia dwuelementowego, rys. 2a:

$$F_1 \dot{h}_1 = F_1 \dot{e}_1 \varepsilon_1 + F_2 \dot{h}_2 \varphi_{21} r_1 + F_4 \dot{h}_4 \varphi_{41} r_1, \quad (11)$$

$$F_2 \dot{h}_2 = F_2 \dot{e}_2 \varepsilon_2 + F_1 \dot{h}_1 \varphi_{12} r_2 + F_4 \dot{h}_4 \varphi_{42} r_2, \quad (12)$$

$$F_4 \dot{h}_4 = F_4 \dot{e}_4 \varepsilon_4 + F_1 \dot{h}_1 \varphi_{14} r_4 + F_2 \dot{h}_2 \varphi_{24} r_4, \quad (13)$$

gdzie dla każdej i -tej powierzchni zachodzi $r_i = 1 - \varepsilon_i$, natomiast wielkości \dot{e}_i są zdefiniowane za pomocą zależności (2).

Wykorzystując następnie prawo wzajemności i zamkniętość dla stosunków konfiguracji oraz przyjmując uzasadnione założenie, że $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 1,0$, z układu równań (11, 12, 13) otrzymuje się:

$$\dot{h}_1 = \dot{e}_1 \varepsilon_1 + \dot{h}_2 \varphi_{12} (1 - \varepsilon_1) + \dot{h}_4 \varphi_{14} (1 - \varepsilon_1), \quad (14)$$

$$\dot{h}_2 = \dot{e}_2, \quad (15)$$

$$\dot{h}_4 = \dot{e}_4. \quad (16)$$

W zależności od kąta zorientowania badanej powierzchni względem powierzchni nieboskłonu stosunki konfiguracji będą zmienne. Lokalne wartości stosunków konfiguracji można wyznaczyć z poniższych zależności, rys. 2:

$$\varphi_{14} = 0,5(1 + \cos \alpha), \quad (17)$$

$$\varphi_{12} = 0,5(1 - \cos \alpha). \quad (18)$$

Po przekształceniach z równań (14-16) otrzymuje się zależność:

$$\dot{h}_1 = \dot{e}_1 \varepsilon_1 + \dot{e}_2 \varphi_{12} (1 - \varepsilon_1) + \dot{e}_4 \varphi_{14} (1 - \varepsilon_1). \quad (19)$$

Opisując w podobny sposób za pomocą metody bilansów jasności układ z otoczeniem jednoelementowym otrzymuje się:

$$\dot{h}_1 = \dot{e}_1 \varepsilon_1 + \dot{e}_{2e} (1 - \varepsilon_1). \quad (20)$$

Aby zachować równowagę otoczenia dwuelementowego nieizotermicznego z izotermicznym otoczeniem jednoelementowym, jasności badanej powierzchni w obydwu przypadkach muszą być identyczne. Porównanie prawych stron wyrażeń (19) i (20) prowadzi do zależności będącej podstawą do wyznaczenia poszukiwanej ekwiwalentnej temperatury otoczenia:

$$\dot{e}_{2e} = \dot{e}_2 \varphi_{12} + \dot{e}_4 \varphi_{14}, \quad (21)$$

która po zastosowaniu zależności (2) i rozwinięciu ma postać przydatną do praktycznych obliczeń temperatury T_{2e} :

$$\int_{\lambda'}^{\lambda''} \dot{e}_{\lambda} (T_{2e}) d\lambda = \varphi_{12} \int_{\lambda'}^{\lambda''} \dot{e}_{\lambda} (T_2) d\lambda + \varphi_{14} \int_{\lambda'}^{\lambda''} \dot{e}_{\lambda} (T_4) d\lambda. \quad (22)$$

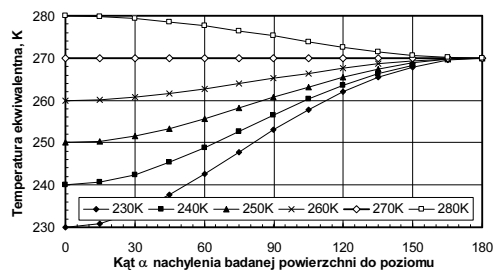
Przedstawione wyniki rozważań są również słuszne dla przypadku gdyby powierzchnie 2 i 4 oraz 2e (rys. 2) nie były płaskie ale wklęsłe i gdyby zamykały przestrzeń dookoła badanego obiektu. Musi być jednak wtedy spełniony warunek, że badana powierzchnia (obiekt) znajduje się na wysokości płaszczyzny na której następuje styk krawędzi wklęsłych powierzchni 2 i 4. W praktyce, przy pomiarach w otwartej przestrzeni, warunek ten jest spełniony, ponieważ linia widnokregu jest w praktycznie na tej samej wysokości co badany obiekt.

5. Wyniki obliczeń numerycznych

W oparciu o przedstawiony algorytm przeprowadzono obliczenia numeryczne. W rezultacie wyznaczono wartości ekwiwalentnej temperatury otoczenia dla występujących w rzeczywistości wartości temperatur podłoża oraz nieboskłonu. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach, rys. 3, 4, 5.

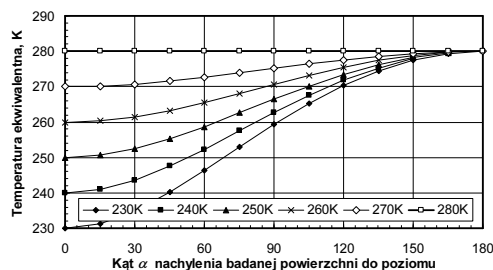
Na rysunkach 3, 4 przedstawiono wartości ekwiwalentnej temperatury otoczenia dla podanych w podpisach rysunków temperatur podłoża, natomiast poszczególne krzywe dotyczą wartości pozornej temperatury nieboskłonu podanych w legendzie rysunku. Obliczone wartości ekwiwalentnej temperatury otoczenia przedstawiono w funkcji kąta nachylenia badanej powierzchni do poziomu (płaszczyzny nieboskłonu). Dzięki temu wykresy mają

charakter uniwersalny, ponieważ mogą być stosowane w przypadku badania powierzchni o różnym kącie nachylenia do poziomu. Przykładem takich elementów mogą być dachy domów lub elementy instalacji przemysłowych. W przypadku badania rurociągów napowietrznych pojęcie nachylenia powierzchni do poziomu ma charakter lokalny. Wymieniony kąt nachylenia w każdym punkcie na połowie obwodu rurociągu jest inny (zmienia się w przedziale od 0° do 180°).



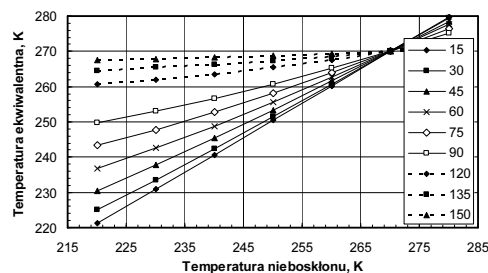
Rys. 3. Temperatura ekwiwalentna jednoelementowego otoczenia dla temperatury podłoża $T_2 = 270\text{K}$ i pozornych temperatur nieboskłonu T_4 wyszczególnionych w legendzie rysunku

Fig. 3. Equivalent temperature of one-element ambient for ground temperature $T_2 = 270\text{K}$ and apparent sky temperatures specified in the diagram legend



Rys. 4. Temperatura ekwiwalentna jednoelementowego otoczenia dla temperatury podłoża $T_2 = 280\text{K}$ i pozornych temperatur nieboskłonu T_4 wyszczególnionych w legendzie rysunku

Fig. 4. Equivalent temperature of one-element ambient for ground temperature $T_2 = 280\text{K}$ and apparent sky temperatures specified in the diagram legend



Rys. 5. Temperatura ekwiwalentna jednoelementowego otoczenia przedstawiona w funkcji temperatury nieboskłonu dla temperatury podłoża $T_2 = 270\text{K}$ i wartości kąta α podanych w legendzie

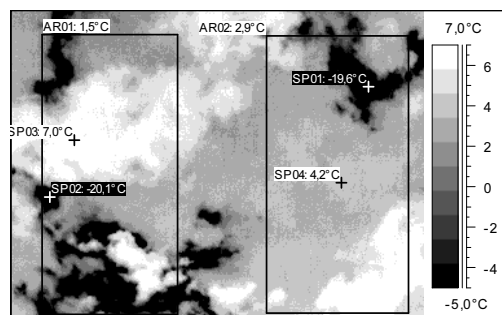
Fig. 5. Equivalent temperature of one-element ambient presented as a function of sky temperature, ground temperature $T_2 = 270\text{K}$ and values of angle α specified in the legend

Na rys. 5 przedstawiono wyznaczone wartości ekwiwalentnej temperatury jednoelementowego otoczenia w funkcji temperatury nieboskłonu przy różnych kątach nachylenia (podanych w legendzie) badanej powierzchni do poziomu. Rysunek ten pozwala łatwo prześledzić zmiany wyznaczanej temperatury wraz ze zmianą temperatury nieboskłonu.

6. Przykładowy wynik pomiaru

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy wynik termowizyjnego pomiaru temperatury nieboskłonu stosownie do podanych wcześniej zaleceń (przyjęto emisyjność równą 1,0 oraz odległość

1,0m). Wybrano nieboskłon o zróżnicowanym pokryciu chmurami. Pomiar wykonano w maju, temperatura powietrza wynosiła 21°C . Dla przedstawionego pomiaru temperatura w poszczególnych punktach waha się od wartości $-20,1^\circ\text{C}$ (punkt SP02) do wartości $+7,0^\circ\text{C}$ (punkt SP03). Wysokie wartości temperatury obserwuje się w miejscach o dużym pokryciu chmurami, natomiast najniższe w miejscach cienkiej warstwy lub braku chmur. Na podstawie innych pomiarów kamerą LW stwierdzono, że wartości tej temperatury w okresie nocnym w zależności od stanu pogody zawierają się najczęściej w przedziale od $+10^\circ\text{C}$ do -50°C .



Rys. 6. Przykładowy wynik termowizyjnego pomiaru temperatury nieboskłonu

Fig. 6. Exemplary result of infrared measurement of sky temperature

7. Wnioski i uwagi końcowe

W pracy przedstawiono sposób pomiaru pozornej temperatury nieboskłonu, a także metodę wyznaczania i wyniki obliczeń ekwiwalentnej temperatury otoczenia, użytecznej przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni. Wprowadzenie pojęcia ekwiwalentnej radiacyjnej temperatury otoczenia pozwala na zastąpienie wieloelementowego nieizotermicznego otoczenia otoczeniem izotermicznym.

Obliczenia przeprowadzono dla kamery termowizyjnej długofalowej (LW) o zakresie spektralnym $7,5\text{-}14\ \mu\text{m}$.

Opracowane wykresy podczas pomiarów termowizyjnych umożliwiają określenie ekwiwalentnej temperatury otoczenia dla powierzchni o różnej orientacji geometrycznej w stosunku do nieboskłonu i powierzchni gruntu. Jest to istotne przy diagnostyce termowizyjnej budynków, rurociągów energetycznych i innych obiektów zlokalizowanych w otwartej przestrzeni.

W przypadku rurociągów ekwiwalentna temperatura otoczenia ma charakter lokalny, jej wartość zależy od miejsca położenia rozpatrywanego punktu na obwodzie zewnętrznego poszycia rurociągu. Opracowane wykresy pozwalają na wyznaczenie lokalnych wartości tej temperatury i w konsekwencji na poprawę dokładności wyników termowizyjnych badań rurociągów.

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego NN513 311735 wspieranego finansowo przez MNiSzW ze środków na lata 2008-2011 za co autor wyraża podziękowanie.

8. Literatura

- [1] E. Kostowski: Promieniowanie ciepłe. PWN, Warszawa, 1993.
- [2] H. Madura (red.): Pomiary termowizyjne w praktyce. Redakcja PAK, Warszawa, 2004.
- [3] T. Kruczek: Analiza wpływu czynników zewnętrznych na wyniki termowizyjnego pomiaru temperatury, [w] Więcek B. (red.): Mat. Konf. „Termografia i Termometria w Podczzerwieni”, Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej, Łódź-Ustroń, 2002.
- [4] T. Kruczek: Possibilities of infrared thermography measurements application for evaluation of thermal insulation quality of overhead heat pipelines, [w] Z. Gnutek, W. Gajewski (red.): Termodynamika w nauce i gospodarce, tom 1, Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
- [5] Acta Metallurgica Slovaca, TU Koszyce, Nr 1, 2009.