

Wyznaczanie rozkładów temperaturowych dla nieboskłonu w oparciu o wyniki pomiaru kamerą termowizyjną

T. Kruczek

Katedra Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice, email: tadeusz.kruczek@polsl.pl

Streszczenie

Celem badań termowizyjnych obiektów znajdujących się w otwartej przestrzeni atmosferycznej, zwłaszcza budynków, jest określenie wielkości strat ciepła lub ocena parametrów jakościowych izolacji ścian, dachów i innych przegród. Na potrzeby badań termowizyjnych rozpatrywanych obiektów oraz obliczeń dotyczących radiacyjnej wymiany ciepła niezbędna jest znajomość parametrów radiacyjnych nieboskłonu. Parametry te obejmują równoważną radiacyjną temperaturę otoczenia potrzebną do pomiarów termowizyjnych (w tym temperaturę nieboskłonu i gruntu) oraz radiacyjną temperaturę otoczenia, która decyduje o stracie ciepła przez promieniowanie z badanej powierzchni. Artykuł zawiera opis metody wyznaczania tych temperatur na podstawie pomiaru temperatury nieboskłonu za pomocą długofalowej kamery termowizyjnej. W celu weryfikacji opracowanej metody porównano wyniki uzyskane za pomocą kamery termowizyjnej z wynikami pomiarów otrzymanymi za pomocą pyrogeometru. Wynik weryfikacji jest satysfakcjonujący.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych badań wykonywanych w ramach audytów energetycznych jest termowizyjny pomiar temperatury na zewnętrznych powierzchniach badanych obiektów. Znajomość strat ciepła z badanych obiektów jest istotna przy opracowywaniu metod poprawy stanu technicznego i sposobów eksploatacji urządzeń pod względem efektywności energetycznej [1].

Na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury wpływa kilka parametrów, m.in. emisyjność badanej powierzchni, temperatura otaczających elementów, parametry termodynamiczne powietrza atmosferycznego. W rzeczywistych sytuacjach emisyjność badanego obiektu jest mniejsza niż 1,0 i w tym przypadku całkowity strumień energii promieniowania emitowanego z badanej powierzchni składa się z dwóch części. Pierwsza część przedstawia strumień emisji własnej, natomiast druga część to strumień promieniowania, który pochodzi z otoczenia i jest odbijany przez badaną powierzchnię. Suma tych dwóch strumieni w teorii wymiany ciepła nazywana jest jasnością powierzchni. Do wyznaczenia temperatury badanego obiektu w sposób bezdotykowy potrzebna jest znajomość emisji własnej badanej powierzchni. Detektor kamery termowizyjnej rejestruje natomiast całkowity strumień promieniowania czyli jasność tej powierzchni. Aby wyznaczyć strumień emisji własnej należy strumień całkowity pomniejszyć o strumień promieniowania pochodzący z otoczenia i odbijany od rozpatrywanej powierzchni. Aby określić strumień promieniowania pochodzący z otoczenia, należy znać temperaturę otoczenia odpowiedzialną za ten strumień.

Problem pojawia się przy określaniu temperatury otoczenia dla obiektów znajdujących się w otwartej przestrzeni atmosferycznej, ponieważ otoczenie takich obiektów składa się z dwóch elementów: hipotetycznej powierzchni nieboskłonu i powierzchni gruntu. Zwykle wartości temperatury tych elementów są zróżnicowane i dlatego nie jest znana wartość temperatury otoczenia, którą należy wprowadzić do systemu pomiarowego kamery termowizyjnej. Aby rozwiązać ten problem, zaproponowano nową metodę wyznaczania równoważnej temperatury otoczenia dla otoczenia nieizotermicznego. Główną zasadą tej metody jest przekształcenie nieizotermicznego wieloelementowego otoczenia w jednoelementowe otoczenie izotermiczne [2].

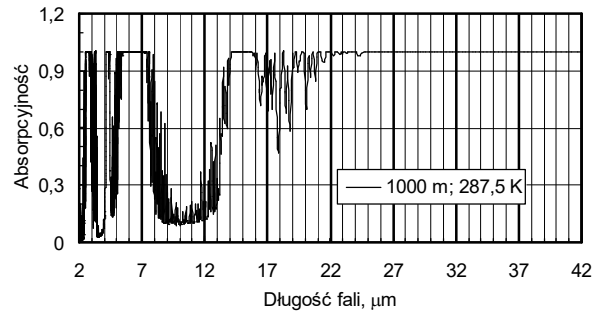
Generalnie w tych badaniach występują dwie jakościowo różne temperatury. Pierwszą temperaturą otoczenia, istotną dla pomiarów termowizyjnych, jest temperatura związana ze strumieniem promieniowania cieplnego w zakresie spektralnym stosowanej kamery termowizyjnej. Temperaturę tę należy mierzyć za pomocą kamery termowizyjnej użytej w prowadzonych badaniach. Druga temperatura to temperatura reprezentująca całkowite promieniowanie ciepłe otoczenia w całym zakresie widmowym promieniowania cieplnego. Temperaturę tę należy stosować podczas obliczeń radiacyjnych strat ciepła z rozpatrywanego obiektu. W przypadku bezchmurnej pogody temperatura nieboskłonu jest niska i zróżnicowana [3, 4]. W tej sytuacji półkulistą powłokę nieboskłonu można podzielić na poziome pasy sferyczne. Do dalszych obliczeń każdy z tych pasów można traktować jako obszar izotermiczny.

2. Otwarta przestrzeń atmosferyczna jako obiekt nieizotermiczny

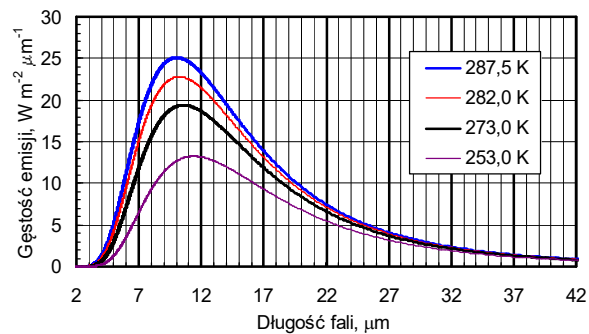
Stosując kamerę termowizyjną do pomiaru temperatury nieboskłonu, należy podkreślić, że badany obiekt jako stała powierzchnia nie istnieje. Obserwowane ciało to powietrze atmosferyczne zawierające pewną ilość gazów aktywnych radiacyjnie. Długofalowe kamery na podczerwień pracują w tzw. oknie atmosferycznym o zakresie $7,5\div 13\ \mu\text{m}$ w którym absorpcja (i emisja) promieniowania cieplnego, jest stosunkowo niska. W przypadku zastosowania kamery termowizyjnej do pomiaru temperatury nieboskłonu uzyskana wartość temperatury nie jest reprezentatywna dla obliczeń dotyczących radiacyjnej wymiany ciepła w otwartej przestrzeni atmosferycznej. Wymiana ciepła odbywa się bowiem w całym zakresie spektralnym, tj. $(0\div+\infty)\ \mu\text{m}$, natomiast kamera wskazuje temperaturę nieboskłonu reprezentatywną dla promieniowania cieplnego w zakresie spektralnym swojej pracy. Rysunek 1 przedstawia przykład rozkładu absorpcyjności (emisyjności) w funkcji długości fali dla powietrza atmosferycznego o zawartości 385 ppm dwutlenku węgla i 1,1% pary wodnej. Prezentowane przebiegi uzyskano na podstawie obliczeń numerycznych wykonanych z wykorzystaniem prążkowego modelu promieniowania gazu [5, 6] do opisu radiacyjnych właściwości gazu. Porównanie wyników obliczeń dla innych przypadków pokazuje, że od pewnej wartości założona grubość warstwy powietrza atmosferycznego ma niewielki wpływ na kształt wykresu. Większe różnice występują tylko przy małych grubościach warstwy powietrza, czego nie pokazano na rysunku. Również temperatura powietrza, w zakresie potencjalnych zmian temperatury atmosfery, ma znikomy wpływ na formę prezentowanych wykresów. Średni spadek temperatury powietrza atmosferycznego wraz z wysokością wynosi około $(0,5\div 0,6)\text{K}/100\ \text{m}$.

Na rys. 2 przedstawiono rozkład spektralnej gęstości emisji cieplnej wyznaczony na podstawie prawa Plancka dla ciała doskonale czarnego w funkcji długości fali dla kilku wartości temperatury. Porównanie tego wykresu z wykresem na rys. 1 wyjaśnia, dlaczego temperatura rejestrowana przez kamerę w zakresie spektralnym $7,5\div 13\ \mu\text{m}$ jest stosunkowo niska. Wytlumaczeniem jest fakt, że w wymienionym zakresie spektralnym (okna atmosferycznego) promieniowanie ciepłe atmosfery jak również jego pochłanianie jest stosunkowo słabe.

W zaproponowanej metodzie opromieniowanie badanego obiektu przez atmosferę zostaje zastąpione promieniowaniem półsferycznej powierzchni otaczającej obiekt i emitującej radiacyjne strumienie energii o takiej samej intensywności i charakterystyce spektralnej jak promieniowanie atmosfery. Jak wiadomo, promieniowanie ciepłe gazów (a jednocześnie jego pochłanianie) zależy od długości fali, koncentracji gazu, temperatury, a także od grubości warstwy promieniującego gazu. Z tych powodów, przy bezchmurnym nieboskłonie, natężenie promieniowania atmosferycznego w zakresie spektralnym okna atmosferycznego jest najmniejsze, rys. 1. W przypadku powietrza atmosferycznego natężenie promieniowania zależy od kierunku obserwacji co jest związane z grubością obserwowanej warstwy. Najmniejsze natężenie występuje dla kierunku pionowego i wzrasta wraz z powiększaniem kąta zenitalnego obserwacji nieboskłonu, aż do osiągnięcia maksimum dla kierunku poziomego.



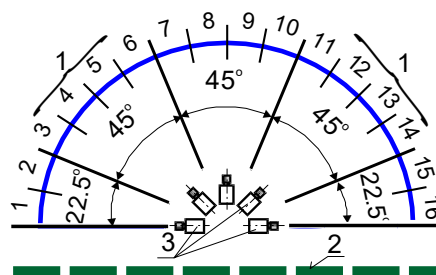
Rys. 1. Zależność absorpcyjności (emisyjności) warstwy powietrza od długości fali promieniowania cieplnego



Rys. 2. Gęstość spektralna cieplnego promieniowania ciała czarnego w funkcji długości fali przy różnych wartościach jego temperatury

3. Opis pomiarów

Równoległe z pomiarami temperatury nieboskłonu za pomocą kamery termowizyjnej do bezpośrednich pomiarów promieniowania atmosfery zastosowano pyrgeometr CGR4 o zakresie spektralnym $4,5 \div 42 \mu\text{m}$. Do pomiarów termowizyjnych stosowano natomiast kamerę Flir SC2000 o spektralnym zakresie pracy $7,5 \div 13 \mu\text{m}$ i poziomym kącie obserwacji 45° . W analizie przyjęto, że rozpatrywana pozioma powierzchnia odniesienia jest otoczona przez półkulistą powierzchnię opromieniowaną przez atmosferę. Z wnętrza tej przestrzeni mierzono temperaturę „półkulistej czaszy” długofalową kamerą termowizyjną. Schemat położenia pomiarowych kamery oraz kątowny podział nieboskłonu przedstawiono na rys. 3. Wszystkie pomiary wykonano w porze nocnej.



Rys. 3. Podział półsfery nieboskłonu na sektory pomiarowe. 1-sektory, 2-powierzchnia gruntu, 3-kamera termowizyjna

4. Opis obliczeń

W dalszych rozważaniach promieniującą atmosferę zastępuje się półsferyczną powierzchnią otaczającą badany obiekt. Następnie na tej powierzchni określamy jednostkowy całkowity radiacyjny strumień energii, który jest sumą strumieni emitowanych w ramach każdego z

wyróżnionych pasm, tj. okien i pasm aktywnych radiacyjnie, rys. 1. Można to wyrazić zależnością (1):

$$\dot{e} = \dot{e}_{b,w}(T_{cm}) + \dot{e}_{b,a}(T_{at}) = \sum_{j=1}^{m_w} \int_{\lambda_{w1,j}}^{\lambda_{w2,j}} \dot{e}_{\lambda}(\lambda, T_{cm}) \mathbf{d}\lambda + \sum_{j=1}^{m_a} \int_{\lambda_{a1,j}}^{\lambda_{a2,j}} \dot{e}_{\lambda}(\lambda, T_{at}) \mathbf{d}\lambda \quad (1)$$

gdzie: $\lambda_{w1,j}, \lambda_{w2,j}$ - początkowa i końcowa długość fali dla j -tego okna; $\lambda_{a1,j}, \lambda_{a2,j}$ - początkowa i końcowa długość fali dla j -tego aktywnego pasma promieniowania w atmosferze; T_{at} - rzeczywista temperatura powietrza atmosferycznego, K; T_{cm} - temperatura nieboskłonu mierzona długofalową kamerą termowizyjną w zakresie spektralnym okna atmosferycznego 7,5÷13 μm , K.

W obliczeniach według (1) dla "okien" przyjmowano temperaturę nieboskłonu zmierzoną kamerą termowizyjną natomiast dla pasm aktywnych radiacyjnie przyjmowano temperaturę powietrza otoczenia. W obliczeniach weryfikacyjnych przyjęto skrajne granice zakresu spektralnego odpowiadające zakresowi pracy pyrgeometru tj. 4,5÷42 μm . W tym zakresie wyróżniono okna (4,5÷4,8) μm , (7,5÷13) μm oraz pasma aktywne (4,8÷7,5) μm i (13÷42) μm , rys. 1. W celu weryfikacji zaproponowanej metody obliczania cieplnej emisji nieboskłonu na podstawie wyników pomiarów temperatury nieboskłonu kamerą termowizyjną, wyniki te porównano z wynikami pomiaru emisji nieboskłonu uzyskanymi przy użyciu pyrgeometru.

W tym celu półsferę nieboskłonu podzielono poziomymi płaszczyznami na N sferycznych pasów. Jeżeli rozkład temperatury nieboskłonu jest osiowo symetryczny to utworzone w ten sposób pasy sferyczne, przy odpowiednio dużej ich liczbie można traktować jako powierzchnie izotermiczne, każda o temperaturze T_i .

W celu obliczenia jednostkowego radiacyjnego strumienia energii emitowanego przez nieboskłon i padającego na poziomą powierzchnię detektora pyrgeometru zastosowano metodę bilansu jasności [2, 5]. Równania bilansu jasności sformułowano dla poziomej powierzchni detektora pyrgeometru i wymienionych wyżej poszczególnych pasów sferycznych. Po przyjęciu założenia, że emisyjność nieboskłonu wynosi 1,0 oraz zastosowaniu prawa wzajemności, po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się wyrażenie określające strumień promieniowania cieplnego podający na poziomy detektor pyrgeometru:

$$\dot{e}_{Skp} = \dot{h}_p = \sum_{i=1}^N \dot{e}_i \varphi_{p,i} \quad (2)$$

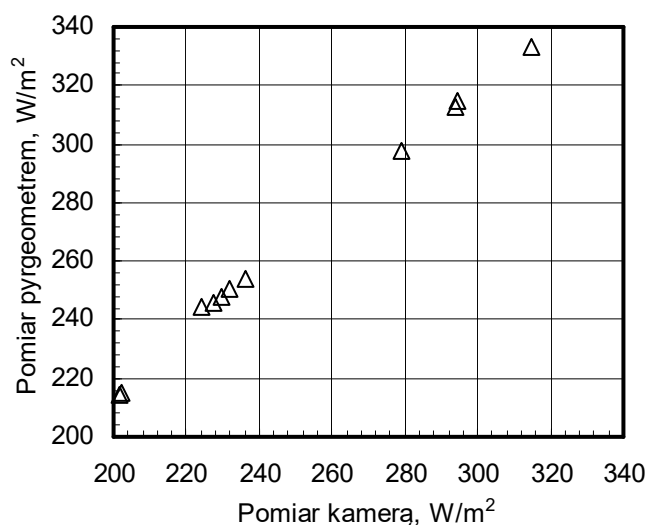
Wartości emisji nieboskłonu dla poszczególnych pasów sferycznych półsfery nieboskłonu, należy obliczyć według równania (1) wykorzystując wyniki pomiarów radiacyjnej temperatury nieboskłonu przy zastosowaniu długofalowej kamery termowizyjnej (rys. 3) oraz wyniki pomiarów temperatury powietrza atmosferycznego. Obliczone w ten sposób wartości dla poszczególnych pasów sferycznych wyrażają całkowitą emisję promieniowania cieplnego gazów atmosferycznych w zakresach spektralnych pasm wysokiej aktywności radiacyjnej wraz z emisją atmosfery w zakresach niskiej aktywności radiacyjnej (w oknach).

5. Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń

Stosując przedstawioną powyżej metodę i wykorzystując wyniki pomiarów temperatury nieboskłonu przeprowadzono obliczenia strumienia promieniowania nieboskłonu docierającego do poziomej powierzchni. Obliczenia te przeprowadzono dla tego samego zakresu spektralnego jak zakres spektralny działania pyrgeometru.

Otrzymane wyniki pomiarów pyrgeometrem i obliczeń natężenia promieniowania nieboskłonu na podstawie pomiarów kamerą w odniesieniu do jednostkowej poziomej powierzchni przedstawiono na rys. 4. Na podstawie pomiarów kamerą i przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że obliczone strumienie emisji nieboskłonu były nieco mniejsze niż te

zmierzone za pomocą pyrgeometru. Stwierdzone różnice nie są duże i zwykle nie przekraczają wartości 20 W/m². Oznacza to, że względne różnice są rzędu 5%. Ocenia się, że istnieją pewne możliwości poprawy zgodności tych wyników po zastosowaniu bardziej zaawansowanych metod analizy.

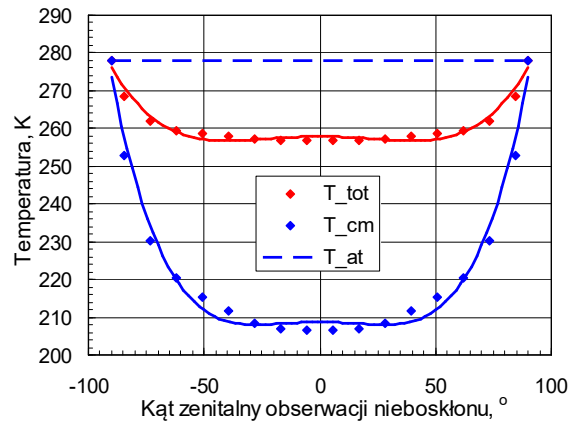


Rys. 4. Ciepłe promieniowanie nieboskłonu zmierzone pyrgeometrem i obliczone w oparciu o wyniki pomiaru temperatury nieboskłonu kamerą termowizyjną

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatury nieboskłonu T_{cm} wykonane kamerą termowizyjną oraz wyniki obliczeń zastępczej temperatury nieboskłonu T_{tot} odpowiedzialnej za całkowity radiacyjny strumień emisji nieboskłonu. Wykresy przedstawione na powyższych rysunkach opracowano w oparciu o uśrednione dla każdego pasa sferycznego wartości temperatury T_{cm} . Znajomość kąтового rozkładu tej temperatury jest przydatna do obliczania zastępczej radiacyjnej temperatury otoczenia potrzebnej podczas inspekcji termowizyjnych obiektów w otwartej przestrzeni atmosferycznej [2].

Temperatura T_{tot} reprezentuje całkowity radiacyjny strumień cieplnej emisji nieboskłonu w pełnym zakresie długości fali. Jest ona przydatna do obliczeń radiacyjnych strat ciepła. Obliczenia T_{tot} wykonano w podobny sposób jak obliczenia porównawcze dla pyrgeometru. Główne różnice wystąpiły przy obliczeniach za pomocą wzoru (1), gdzie przyjęto tym razem obecność dwóch okien spektralnych (4,5÷4,8) μm , (7,5÷13) μm , stąd $m_w = 2$ i trzech pasm promieniujących (4÷4,5) μm , (4,8÷7,5) μm i (13÷ λ_{tot}) μm , stąd $m_a = 3$, rys. 1. W obliczeniach przyjęto także, że $\lambda_{tot} = 100 \mu\text{m}$. Wartość ta wynika z przyczyn praktycznych ponieważ dla długości fali $\lambda > 100 \mu\text{m}$ promieniowanie ciepłe nieboskłonu jest pomijalnie niskie. Obecnie całkowita jednostkowa emisja energii promieniowania przez i -ty pas sferyczny może być wyrażona przez (3):

$$\dot{e}_{tot,i} = \sum_{j=1}^{m_w} \int_{\lambda_{w1,j}}^{\lambda_{w2,j}} \dot{e}_{\lambda}(\lambda, T_{cm,i}) d\lambda + \sum_{j=1}^{m_a} \int_{\lambda_{a1,j}}^{\lambda_{a2,j}} \dot{e}_{\lambda}(\lambda, T_{at}) d\lambda \quad (3)$$



Rys. 5. Zenitalny rozkład temperatury T_{cm} otrzymany przez pomiar kamerą i temperatury T_{tot} reprezentującej całkowitą emisję cieplną nieboskłonu dla przypadku „niskiej” temperatury nieboskłonu

Na podstawie wartości emisji $\dot{e}_{tot,i}$ i potraktowaniu nieboskłonu jako ciała czarnego, wartości temperatury $T_{tot,i}$ dla poszczególnych pasów sferycznych obliczano za pomocą wyrażenia (4) wynikającego z prawa Stefana-Boltzmann'a:

$$T_{tot,i} = \sqrt[4]{\dot{e}_{tot,i} / \sigma} \quad (4)$$

Jak wynika z rysunku, dla każdej z wymienionych temperatur, ich wartości w zakresie kąta zenitalnego $\pm 45^\circ$ są stosunkowo stabilne. Powyżej tych kątów, wartości temperatury zbliżają się do temperatury atmosferycznej [7]. Przeprowadzona analiza wykazała, że aproksymacja za pomocą wielomianu czwartego stopnia z parzystymi wykładnikami dość dobrze odwzorowuje charakter zmian analizowanych rozkładów temperatury.

6. Uwagi końcowe

Podczas inspekcji termowizyjnych i analiz radiacyjnego przepływu ciepła dla obiektów znajdujących się na otwartej przestrzeni powietrznej należy wyróżnić dwie radiacyjne temperatury nieboskłonu. Jako temperaturę nieboskłonu, która jest użyteczna do wyznaczenia ekwiwalentnej temperatury otoczenia i ma zastosowanie w pomiarach termowizyjnych [2], należy przyjąć temperaturę T_{cm} nieboskłonu uzyskaną bezpośrednio z pomiaru kamerą termowizyjną. Przykładowe wyniki pomiarów tej temperatury przedstawiono na rys. 5. W przypadku obliczeń z zakresu radiacyjnej wymiany ciepła, która zachodzi zawsze w pełnym zakresie spektralnym promieniowania cieplnego, należy stosować temperaturę T_{tot} obliczoną według (4). Przykłady takich wyników obliczeń przedstawiono również na rys. 5. Głównym celem niniejszej pracy jest opracowanie metod posiadających praktyczne cechy, które mogą być przydatne w diagnostyce cieplnej z zastosowaniem techniki termowizyjnej.

Oznaczenia i indeksy

- $\dot{e}_\lambda(\lambda, T)$ - gęstość spektralna emisji własnej ciała czarnego dla temperatury T wynikająca z prawa Plancka, $W \cdot (\mu m \cdot m^2)^{-1}$
- \dot{e} - gęstość emisji własnej w zadanym zakresie spektralnym, $W \cdot m^{-2}$
- \dot{h} - jasność powierzchni, $W \cdot m^{-2}$
- m_a - liczba rozpatrywanych pasm radiacyjnych dla powietrza atmosferycznego
- m_w - liczba uwzględnianych okien radiacyjnych w atmosferze

N	- liczba pasów sferycznych dla półsfery nieboskłonu
T	- temperatura, K
T_{at}	- temperatura powietrza atmosferycznego, K
T_{cm}	- temperatura nieboskłonu zmierzona kamerą termowizyjną, K
a, w	- dotyczy aktywnego radiacyjnie pasma lub nieaktywnego okna w atmosferze
at	- dotyczy atmosfery
b	- dotyczy ciała czarnego
cm	- dotyczy pomiaru kamerą termowizyjną
p	- dotyczy pyrgeometru
Sk	- dotyczy nieboskłonu
tot	- dotyczy całkowitej emisji cieplnej nieboskłonu

Symbole greckie

ε	- emisyjność powierzchni
φ	- stosunek konfiguracji
λ	- długość fali, μm
σ	- stała promieniowania ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$)

Podziękowania

Praca wspierana w ramach Rektorskiego grantu projałościowego 08/060/RGJ20/0256 w obszarze badań rozwojowych oraz badań statutowych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Bibliografia

- [1] Kruczek T., *Determination of annual heat losses from heat and steam pipeline networks and economic analysis of their thermomodernisation*, "Energy", Vol. 63, 2013, 120-131, DOI: 10.1016/j.energy.2013.08.019.
- [2] Kruczek T., *Wyznaczanie radiacyjnej temperatury otoczenia przy pomiarach termowizyjnych w otwartej przestrzeni*, "Pomiary Automatyka Kontrola", Vol. 55, Nr 11, 2009, 882-885.
- [3] Jin Z., Zhang Y., Del Genio A., et al., *Cloud scattering impact on thermal radiative transfer and global longwave radiation*, "Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer", Vol. 239, Art. No UNSP 106669, Dec. 2019, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.106669.
- [4] Li M., Jiang Y., Coimbra C.F.M., *On the determination of atmospheric longwave irradiance under all-sky conditions*, "Solar Energy", Vol. 144, Mar. 2017, 40-48, DOI: 10.1016/j.solener.2017.01.006.
- [5] Howell J.R., Siegel R., Mengüç M.P., *Thermal radiation heat transfer*, CRC Press Taylor&Francis Group, New York, 2011.
- [6] Rothman L. S., Gordon I. E., Barber R., J. i in.: *HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database*, "Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer", Nr 15, 2010, 2139-2150, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.05.001.
- [7] Awanou C.N., *Clear sky emissivity as a function of the zenith direction*, "Renewable Energy", Vol 13, 1998, 227-48, DOI: 10.1016/S0960-1481(97)00070-0.