

A41111

Prace Naukowe Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej

Seria: Monografie

C1

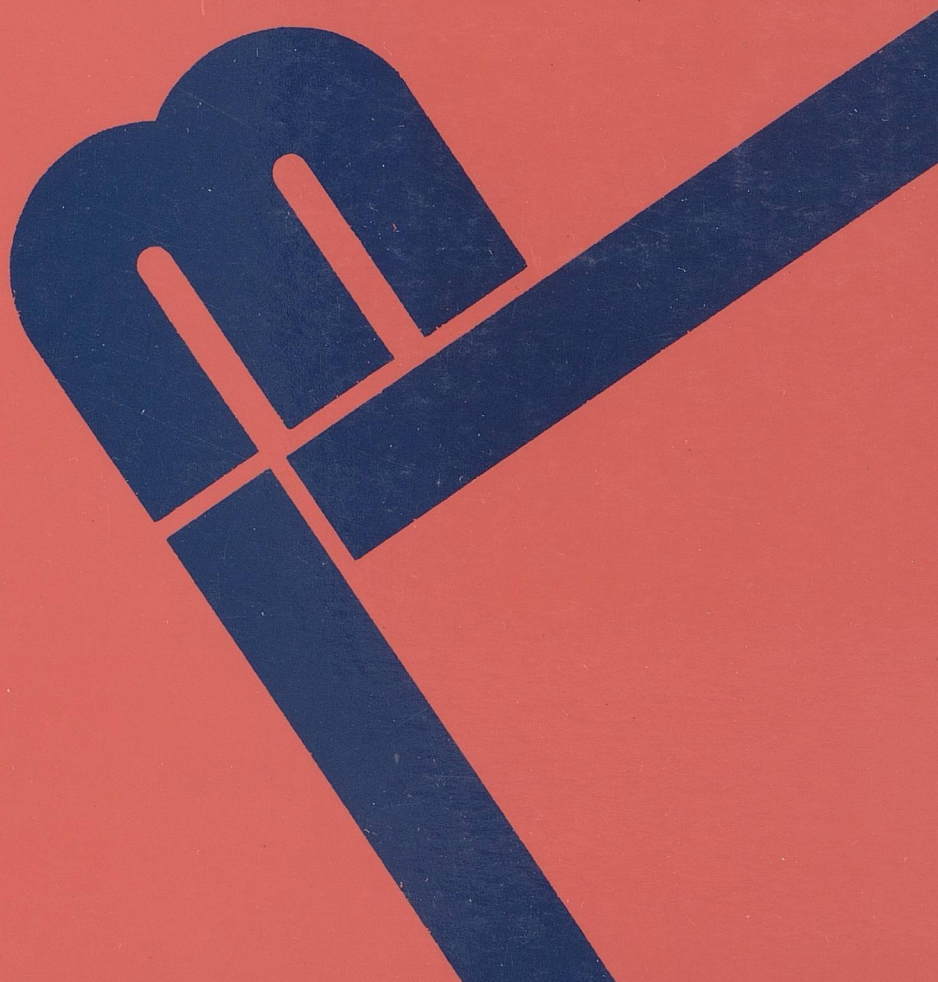
72

31

Henryk Nowak

Oddziaływanie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek

Wrocław 1999



Henryk NOWAK

Interaction of environmental thermal radiation on the building



Henryk Nowak

Oddziaływanie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej · Wrocław 1999

Recenzenci

Piotr KLEMM

Wojciech MARKS

Opracowanie redakcyjne

Maria IZBICKA

Korekta

Zofia JASINA

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

ISSN 0324-9875

Nakład 100+45 egz. Ark. wyd. 14,25. Ark. druk. 12¹/₈. Papier offset. kl. III, 80 g, B1.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 258/99.

*budynek,
środowisko zewnętrzne,
promieniowanie cieplne,
modelowanie*

Henryk NOWAK*

ODDZIAŁYWANIE CIEPLNEGO PROMIENIOWANIA ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO NA BUDYNEK

Przedstawiono zweryfikowany model obliczeniowy oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek. Model umożliwia obliczanie natężenia promieniowania cieplnego docierającego do powierzchni poziomych oraz nachylonych do 90° , dla różnych warunków pogodowych, w funkcji standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych jak temperatura powietrza i stopień zachmurzenia nieba lub alternatywnie w funkcji temperatury punktu rosy. Określono również wpływ promieniowania długofalowego na bilans cieplny przegród budowlanych dla warunków ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła. Przedstawiono możliwość kształtowania bilansu promieniowania, a w konsekwencji bilansu cieplnego przegród budowlanych, poprzez stosowanie powierzchni spektralnie selektywnych w odniesieniu do promieniowania krótko- i długofalowego; wskazano na możliwe do uzyskania efekty ilościowe oraz możliwości techniczne osiągnięcia założonych radiacyjnych charakterystyk powierzchni przegród budowlanych.

Z uwagi na specyficzny rozkład widmowy i kątowy promieniowania cieplnego atmosfery w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, omówiono główne problemy związane z występowaniem zjawiska chłodzenia radiacyjnego rozważanego radiatora, którym jest również przegroda budowlana. Przedstawiono metody wspomagania efektu chłodzenia radiacyjnego, wymagane właściwości radiatorów spektralnie selektywnych dla promieniowania cieplnego oraz zakres zmienności temperatury promieniowania nieboskłonu, ściśle korespondującej z promieniowaniem cieplnym atmosfery.

Do analizy i obliczania bilansu cieplnego przegród budowlanych, dla warunków nieustalonego przenikania ciepła, zaproponowano i zweryfikowano model bilansu cieplnego, oparty w części związanej z przewodzeniem ciepła na metodzie impulsowej funkcji przejścia oraz uwzględniający radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego.

* Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ

- a, b – współczynniki do obliczania pozornej emisyjności atmosfery,
- a_k, c_k, d_k, b_l – współczynniki impulsowej funkcji przejścia,
- a_s – współczynnik absorpcji powierzchni czynnej dla promieniowania słonecznego,
- A, B, C – współczynniki w wyrażeniach do obliczania pozornej emisyjności bezchmurnego nieba, (-),
- cc – stopień zachmurzenia nieba w przedziale $0 \div 1$, (-),
- c_p – ciepło właściwe, ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$),
- e – ciśnienie pary wodnej, (mb),
- $f(cc)$ – funkcja stopnia zachmurzenia nieba,
- $f(\tau)$ – zależność funkcyjna od czasu (wartość w chwili τ),
- F – współczynnik konfiguracji,
- h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$),
- h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$),
- h_o – współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$),
- h_i – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$),
- $q_l(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła przewodzonego przy powierzchni przegrody budowlanej od strony pomieszczenia w chwili τ , (Wm^{-2}),
- $q_k(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję w chwili τ , (Wm^{-2}),
- $q_l(\tau)$ – natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, absorbowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody w chwili τ , (Wm^{-2}),
- $q_o(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła przewodzonego przy zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w chwili τ , (Wm^{-2}),
- $q_r(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody budowlanej w chwili τ , (Wm^{-2}),
- $q_s(\tau)$ – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego absorbowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody w chwili τ , (W m^{-2}),
- R_{ao} – natężenie długofalowego promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą przy bezchmurnym niebie, (Wm^{-2}),
- R_{ac} – natężenie długofalowego promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą przy niebie zachmurzonym, (Wm^{-2}),
- $R(\beta)$ – natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu, (Wm^{-2}),

- $R_A(\beta)$ – natężenie długofalowego promieniowania atmosfery na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu, (Wm^{-2}),
 $R_G(\beta)$ – natężenie długofalowego promieniowania gruntu na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu, (Wm^{-2}),
 R_{net} – natężenie długofalowego promieniowania różnicowego między powierzchnią czynną a otaczającym ją środowiskiem zewnętrznym, (Wm^{-2}),
 s – zmienna zespolona (operator przekształcenia Laplace'a),
 t_a – temperatura powietrza zewnętrznego, ($^{\circ}\text{C}$),
 T_a – temperatura powietrza zewnętrznego, (K),
 t_{dp} – temperatura punktu rosy, ($^{\circ}\text{C}$),
 T_{dp} – temperatura punktu rosy, (K),
 t_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, ($^{\circ}\text{C}$),
 T_i – temperatura powietrza w pomieszczeniu, (K),
 t_r – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, ($^{\circ}\text{C}$),
 T_r – średnia temperatura promieniowania nieboskłonu, (K),
 T_r^* – spektralna temperatura promieniowania nieboskłonu, (K),
 T_s – temperatura powierzchni czynnej, (K),
 Δt – poprawka temperaturowa do wartości obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego dla warunków ustalonego przenikania ciepła, (C),
 ΔT_s – wskaźnik temperatury powierzchni czynnej, (K),
 ΔT_r – wskaźnik temperatury promieniowania nieboskłonu, (K),
 z – kąt zenitalny.

SYMBOLS GRECKIE

- β – kąt pochylenia rozważanej płaszczyzny,
 ε_a – współczynnik emisyjności zachmurzonego nieboskłonu,
 ε_g – współczynnik emisyjności gruntu,
 ε_0 – współczynnik emisyjności bezchmurnego nieboskłonu,
 ε – współczynnik emisyjności powierzchni czynnej,
 λ – długość fali promieniowania, (μm),
 λ – przewodność cieplna właściwa, ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$),
 ρ – gęstość materiału, (kgm^{-3}),
 σ – stała Stefana–Boltzmann, ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$),
 τ – czas, (s),
 $\Theta(0,s)$, $Q(0,s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody,
 $\Theta(d,s)$, $Q(d,s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia.

1. WSTĘP

1.1. Uwagi wprowadzające

Racjonalne użytkowanie oraz oszczędność energii cieplnej w budownictwie, a w tym modyfikowanie i uściślanie modeli obliczeniowych do określania wielkości strat i zysków ciepła przez przegrody budowlane i budynki, jest w dalszym ciągu technicznym i ekonomicznym problemem w wielu krajach, w tym także w Polsce [141, 157]. Wspomniane modele obliczeniowe jako danych wejściowych wymagają, między innymi, odpowiednio przetworzonych i właściwie zinterpretowanych lokalnych danych meteorologicznych [39]. Jedną z wielkości meteorologicznych, mogących z znaczący sposób wpływać na bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych, a w konsekwencji wpływać na jej bilans cieplny, jest promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego w najbliższym otoczeniu budynków. Promieniowanie cieplne (promieniowanie długofalowe, podczerwone), występuje w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm . W rzeczywistości promieniowanie to obejmuje zakres do 100 μm , jednak z uwagi na to, że rozkład intensywności promieniowania długofalowego przypada głównie w przedziale do 50 μm , tę wartość przyjęto uważać za umowną granicę promieniowania cieplnego. Promieniowanie słoneczne (promieniowanie krótkofalowe) występuje natomiast w umownym zakresie długości fal od 0,3 do 3,0 μm . Za granicę między tymi dwoma zakresami widna przyjęto długość fali $\lambda = 3,0 \mu\text{m}$. Źródłem promieniowania długofalowego wokół obiektów budowlanych jest promieniowanie atmosfery (promieniowanie nieboskłonu), promieniowanie gruntu oraz promieniowanie najbliższego otoczenia budynków.

Promieniowanie długofalowe atmosfery jest znaczącym elementem w bilansie cieplnym Ziemi, a pełna znajomość zmienności w czasie tego promieniowania, również przy powierzchni gruntu, jest bardzo istotna i niezbędna przy rozpatrywaniu wielu różnych zagadnień z zakresu szeroko rozumianej meteorologii, agrometeorologii, hydrologii i rolnictwa.

W analizie transportu promieniowania cieplnego atmosfery w kierunku Ziemi i jego oddziaływania na budynki można wyróżnić trzy główne skale uogólnienia. A mianowicie, pierwszą i najbardziej ogólną jest skala makro – procesy radiacyjne w atmosferze, zarówno w zakresie promieniowania krótko- jak i długofalowego, traktowane są globalnie, zwłaszcza pod kątem tworzenia modeli cyrkulacji ogólnej w atmosferze. Prace badawcze w tym zakresie są wspomagane ciągłymi pomiarami satelitarnymi promieniowania atmosfery i powierzchni Ziemi. Pomiary te są również niezbędne przy modelowaniu i analizie trendu zmian klimatu Ziemi. W skali lokalnej, obowiązującej dla obszarów aglomeracji miejskich oraz miast, informacje dotyczące docierającego promieniowania cieplnego atmosfery są wykorzystywane do analizy głównych problemów z zakresu fizyki miasta. W obrębie zagadnień, którymi fizyka

miasta się zajmuje, na uwagę zasługuje bilans energii cieplnej na terenach zurbanizowanych w odniesieniu do powszechnie znanego zjawiska wyspy ciepła. I wreszcie trzecią skalą uogólnienia jest mikroskala, odnosząca się do pojedynczego budynku. Promieniowanie długofalowe atmosfery oraz najbliższego otoczenia budynku powinno być uwzględnione w analizie bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynku obejmującej okres całego roku.

Od ponad dwudziestu lat w literaturze specjalistycznej, dotyczącej bilansowania cieplnego budynków, radiacyjna wymiana ciepła w zakresie promieniowania długofalowego między zewnętrznymi powierzchniami przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów, a ich najbliższym otoczeniem była i jest ujmowana w zdecydowanie mniejszym stopniu w porównaniu z promieniowaniem słonecznym. Z licznych opracowań wynika [92, 93, 179], że pominięcie lub bardzo przybliżone potraktowanie tego sposobu wymiany ciepła budynku z otaczającym go środowiskiem zewnętrznym może doprowadzić do znaczących błędów w obliczaniu bilansu cieplnego. Obliczenia numeryczne unaocznily [196], że około 20% całkowitych strat ciepła w sezonie grzewczym może wystąpić w drodze wymiany ciepła przez promieniowanie między zewnętrznymi powierzchniami przegród budowlanych a ich najbliższym otoczeniem. Ponadto wykazano, że pominięcie lub znaczne uproszczenie opisu radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem może doprowadzić do niedoszacowania zużycia energii cieplnej w sezonie grzewczym do ok. 26% [179].

Zewnętrzne powierzchnie przegród budowlanych równocześnie pochłaniają i emitują energię promieniowania. Na powierzchnie te oddziałuje promieniowanie słoneczne (promieniowanie krótkofalowe) oraz promieniowanie ciepłe atmosfery, gruntu i obiektów otaczających (promieniowanie długofalowe). W zakresie promieniowania długofalowego na poziomą płaszczyznę oddziałuje jedynie promieniowanie nieboskłonu. Gdy kąt pochylenia tej płaszczyzny wzrasta, jej powierzchnia zewnętrzna „widzi” coraz to mniejszą część nieboskłonu i jednocześnie coraz to większą część gruntu i obiekty otaczające, zaś ich łączne oddziaływanie w postaci promieniowania termicznego sumuje się, by dla kąta 90° (płaszczyzna pionowa) osiągnąć wartość maksymalną [35, 122, 132]. W warunkach bezchmurnego nieba w nocy do poziomej lub nachylonej pod niewielkim kątem płaszczyzny dociera najmniejsza wartość natężenia długofalowego promieniowania nieboskłonu, stanowiąc najslabszą rekompensatę dla wypromieniowania energii przez tę płaszczyznę. W związku z tym, straty ciepła przez promieniowanie są wówczas największe, zwłaszcza że atmosfera w zakresie długości fal od 8,0 do 13,0 μm jest prawie całkowicie przepuszczalna dla promieniowania długofalowego („okno atmosferyczne”), a maksimum promieniowania zewnętrznej powierzchni rozważanej płaszczyzny przypada na fale o długości od 10,0 do 12,0 μm [51, 62, 92, 93]. W wyniku tych strat ciepła temperatura zewnętrznej powierzchni rozważanej płaszczyzny (np. stropodachu) może osiągnąć wartość niższą od temperatury otaczającego powietrza, co ściśle koresponduje ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie. Występuje wówczas zjawisko tak zwanego chłodzenia radiacyjnego [24, 61, 124].

W warunkach bezchmurnego nieba w nocy w bilansie cieplnym przegród pionowych (ścian budynków) efekt wymiany ciepła przez promieniowanie ze środowiskiem zewnętrznym jest znacznie mniejszy, co wynika z tego, że straty ciepła przez promieniowanie przegród pionowych kompensowane są porównywalnymi zyskami energii promieniowania pochodzącej od gruntu oraz od obiektów sąsiadujących [59, 124, 160].

Warto również zwrócić uwagę na wartości natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego w najbliższym otoczeniu budynków. Wartości te mogą się zmieniać od około 180 Wm^{-2} do około 320 Wm^{-2} w zimie oraz od około 270 Wm^{-2} do około 440 Wm^{-2} poza sezonem ogrzewczym [42, 136, 137, 138]. Są to zatem wartości porównywalne z wartościami natężenia promieniowania słonecznego i mogą znacząco wpływać na bilans promieniowania, a w konsekwencji na radiacyjne straty ciepła zwłaszcza przegród poziomych (stropodachów) i gruntu przy bezchmurnym niebie w nocy, szczególnie w zimie.

Analizując wymianę ciepła przez promieniowanie należy pamiętać, że stanowi ona jeden ze składników bilansu cieplnego zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej. Jednocześnie bowiem zachodzi wymiana ciepła przez konwekcję tej powierzchni z otoczeniem, a ponadto wpływ na zjawiska cieplne na powierzchni mają struktura przegrody oraz warunki cieplne panujące w pomieszczeniu. Bilans cieplny zewnętrznej powierzchni przegrody jest wypadkową oddziaływań wymienionych elementów.

Niezbędnym warunkiem prawidłowego uwzględnienia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego w bilansie cieplnym przegród budowlanych i budynków jest pełna znajomość zmienności w czasie tego promieniowania dla różnych warunków pogodowych. Powinny to być informacje w zakresie geograficznego rozkładu rocznej, sezonowej, miesięcznej i dziennej zmienności natężenia tego promieniowania w funkcji zmienności elementów meteorologicznych takich, jak stopień zachmurzenia nieba i rodzaj chmur, temperatura i wilgotność względna powietrza, ciśnienie pary wodnej oraz w funkcji kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny.

Dostępne w kraju dane meteorologiczne w zakresie długofalowego promieniowania atmosfery niestety nie spełniają powyższych warunków, a zatem nie można ich bezpośrednio wykorzystać do obliczania strat i zysków ciepła przegród budowlanych i budynków. Ponadto, dane te są niepełne, ponieważ w Polsce, podobnie jak i w innych krajach, nie prowadzi się systematycznych pomiarów natężenia promieniowania cieplnego atmosfery. Niemniej, możliwe jest obliczanie natężenia tego promieniowania przy powierzchni gruntu na podstawie opracowanych modeli empirycznych z uwzględnieniem wielkości meteorologicznych mierzonych standardowo, takich jak temperatura i wilgotność względna powietrza, stopień zachmurzenia nieba, ciśnienie pary wodnej itp. W Polsce od wielu lat podejmowane były próby opisu i przedstawiania rozkładu geograficznego średnich miesięcznych wartości składników bilansu promieniowania, a w tym bilansu promieniowania długofalowego, przede wszystkim dla powierzchni trawiastej. I tak, w 1965 roku Kraujalis [103] przedstawiła dla obsza-

ru Polski, na podstawie empirycznego wzoru Monteith'a, dane liczbowe i mapy rozkładu bilansu promieniowania długofalowego (promieniowanie atmosfery minus promieniowanie powierzchni Ziemi) dla lat 1951–1960. Pierwszą próbą opracowania całego bilansu promieniowania powierzchni Ziemi, z uwzględnieniem bilansu promieniowania słonecznego dla Polski, dla danych meteorologicznych z lat 1951–1960, przedstawiono w postaci *Atlasu bilansu promieniowania w Polsce* pod redakcją Paszyńskiego [151]. Z opracowania kartograficznego zostały wyłączone obszary górskie, położone powyżej 500 m n.p.m. ze względu na skomplikowany charakter kształtowania się stosunków radiacyjnych na tych terenach. Jednak z uwagi na stosunkowo krótki okres, jak i zastosowane metody wyznaczania poszczególnych strumieni bilansu promieniowania, przedstawione w tym opracowaniu wyniki miały znaczenie jedynie orientacyjne, o czym zastrzegli sami autorzy.

Mapy średnich sum rocznych całkowitego bilansu promieniowania w Polsce dla lat 1951–1960 wykreślone na podstawie nowszych i bardziej szczegółowych danych, przedstawił Paszyński w 1972 roku [152].

W 1979 roku Michałowska-Smak [120] podała wartości bilansu promieniowania długofalowego dla lat 1956–1965, stosując empiryczny wzór Brunta z wyznaczonymi przez siebie współczynnikami liczbowymi dla obszaru Polski. W roku 1987 Miara ze współautorami [119] przedstawiła geograficzny rozkład średnich miesięcznych i rocznych wartości składników bilansu promieniowania krótko- i długofalowego powierzchni trawiastej w Polsce dla okresu od 1956 do 1975. Wartości średnie poszczególnych strumieni promieniowania, wyznaczone w MJ/(m²d), na podstawie danych z około 30 stacji meteorologicznych IMGW przedstawiono tabelarycznie oraz na mapach.

Z punktu widzenia cieplnego bilansowania przegród budowlanych i budynków, ani wymienione opracowania, ani niesystematycznie rejestrowane i publikowane przez IMGW wyniki badań bilansu promieniowania długofalowego powierzchni Ziemi, nie spełniają warunku kompleksowości informacji. Nie stwarzają również możliwości wszechstronnej oceny oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na obiekty budowlane, w tym wpływu tego promieniowania na bilans cieplny przegród budowlanych i budynków. Po pierwsze, wyniki tych prac odnoszą się jedynie do płaszczyzn poziomych. Po drugie, przedstawione zostały jedynie wartości różnicowego promieniowania długofalowego między powierzchnią Ziemi a nieboskłonem, bez podania bezwzględnej wartości natężenia docierającego promieniowania atmosfery.

Wartości natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, a w tym promieniowania atmosfery, mierzonego przy powierzchni gruntu, określone dla różnych warunków pogodowych dla dowolnie pochylonych płaszczyzn, powinny być ujęte w modelach obliczeniowych bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków w sezonie grzewczym bądź w skali roku. Dotyczy to zwłaszcza tak zwanych w pełni dynamicznych symulacyjnych modeli obliczeniowych, których przykła-

dem może być model opracowany w Departamencie Energii w Stanach Zjednoczonych (program komputerowy DOE-2 [43, 134]) i na Uniwersytecie Strathclyde w Glasgow (program komputerowy ESP [8, 90, 192]).

Istniejące modele radiacyjnej wymiany ciepła w atmosferze, wykorzystywane przez klimatologów na potrzeby analizy występujących w atmosferze zjawisk fizycznych, chemicznych i dynamicznych w skali globalnej, z uwagi na dużą złożoność oraz skalę opisu (rozpatrywanie zjawisk do wysokości kilkudziesięciu kilometrów ponad powierzchnią Ziemi), w praktyce są nieprzydatne do analizy bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków. Z tego powodu, w ostatnich kilkunastu latach w różnych krajach powstało szereg formuł empirycznych do obliczania natężenia długofalowego promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą przy powierzchni gruntu. Zależności te mogą być również wykorzystywane przez specjalistów z innych dziedzin, np. z agrometeorologii i rolnictwa. Ponieważ promieniowanie cieplne atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, wspomniane modele obliczeniowe wykorzystują wielkości meteorologiczne mierzone rutynowo, takie jak temperatura powietrza, ciśnienie pary wodnej, temperatura punktu rosy i inne. Zasadniczą zaletą modeli empirycznych jest zatem to, że umożliwiają obliczanie natężenia promieniowania długofalowego atmosfery przy powierzchni gruntu na podstawie wymienionych standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych. Ma to również szczególne znaczenie w sytuacji, gdy dla danej lokalizacji dysponujemy archiwalną bazą danych meteorologicznych – możliwe jest wówczas uzupełnienie tej bazy o wartości natężenia długofalowego promieniowania atmosfery docierającego do powierzchni gruntu [138].

Modele promieniowania atmosfery określone na podstawie badań oraz na podstawie danych meteorologicznych dla danej lokalizacji nie mogą być jednak bezkrytycznie użytkowane dla innej lokalizacji, na przykład w innym kraju. I tak, badania przeprowadzone w Szwajcarii wykazały, zarówno dla warunków częściowo jak i całkowicie zachmurzonego nieba, że najlepszą zgodność między zmierzonymi i obliczonymi wartościami natężenia cieplnego promieniowania atmosfery uzyskano dla modeli, które wykorzystują pełną informację o zachmurzeniu [117]. Natomiast badania przeprowadzone w południowej Hiszpanii wykazały, że dla tego regionu najlepsze rezultaty osiągnięto dla zupełnie innych modeli obliczeniowych [4]. Podobne wnioski uzyskano na podstawie badań przeprowadzonych w południowo-zachodniej Holandii [138]. Decyzja zatem, dotycząca tego, który z istniejących empirycznych modeli obliczeniowych promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą oraz pochyloną umożliwia uzyskanie najlepszej zgodności między zmierzonymi i obliczonymi wartościami tego promieniowania dla rozważanej lokalizacji, powinna być dogłębnie uzasadniona stosownymi pomiarami wykonanymi dla danego regionu. W przypadku braku takiej zgodności, należy na podstawie pomiarów sformułować model obliczeniowy właściwy dla danej lokalizacji.

1.2. Cel i zakres pracy

Uwzględniając zawarte powyżej uwagi oraz wykazane wcześniej istniejące w Polsce potrzeby wypełnienia luki w zakresie pełnej oceny i wszechstronnego ilościowego opisu oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynki oraz jego wpływu na bilans cieplny przegród budowlanych autor podjął pracę badawczą w tym zakresie. Zasadniczym celem pracy jest sformułowanie kompleksowego modelu oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek oraz określenie ilościowego wpływu tego promieniowania na bilans cieplny przegród budowlanych.

Na wstępie założono, że model powinien umożliwiać obliczanie wartości natężenia promieniowania cieplnego w najbliższym otoczeniu budynku, docierającego do dowolnie pochylonych płaszczyzn (przegród budowlanych) w funkcji wybranych standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych.

Celem aplikacyjnym pracy jest wskazanie metody analizy i oceny bilansu promieniowania układu „zewnętrzna powierzchnia przegrody budowlanej – cieplne środowisko zewnętrzne” w kontekście optymalizacji rozwiązań materiałowych, podporządkowanych kryteriom racjonalnego wykorzystania energii cieplnej w budynkach, w danych warunkach meteorologicznych, z uwzględnieniem wymagań dotyczących utrzymania mikroklimatu pomieszczeń na poziomie komfortu cieplnego.

Istotnym celem pracy jest również wskazanie kierunków i obszarów zastosowania zaproponowanego modelu obliczeniowego cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego w opisie ustalonego i nieustalonego przepływu ciepła przez przegrody budowlane, z wykorzystaniem, między innymi, tzw. spektralnie selektywnych powierzchni radiacyjnych.

W ramach realizacji celów pracy przeprowadzono badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistych. Jak już wspomniano wcześniej, promieniowanie długofalowe atmosfery nie jest wielkością standardowo mierzoną na stacjach meteorologicznych, zarówno w naszym kraju jak i za granicą. Jediną możliwością realizacji podstawowych zamierzeń pracy było zatem wykonanie stosownych pomiarów w różnych porach roku. W dyskusji problemu uwzględniono również wyniki prac innych autorów, głównie zagranicznych.

W celu sformułowania podstaw fizycznych analizowanego zagadnienia w rozdziale drugim przedstawiono wprowadzenie w tematykę problemu, analizę literatury tematu oraz podstawowe pojęcia z zakresu radiacyjnej wymiany ciepła w atmosferze. Przytoczono wybrane dwa istniejące modele obliczeniowe, opisujące radiacyjną wymianę ciepła w atmosferze w skali makro, wskazując jednocześnie, że ze względu na dużą złożoność zagadnienia oraz globalną skalę opisu (do górnych warstw stratosfery) modele te, sformułowane dla realizacji zupełnie innych celów, są praktycznie nieprzydatne w zastosowaniach do analizy i oceny bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków. Wskazano również główne problemy związane

z opisem radiacyjnej wymiany ciepła w dużych aglomeracjach miejskich oraz w najbliższym otoczeniu budynków. Rozdział ten zawiera także wykaz najczęściej cytowanych i pogrupowanych modeli empirycznych promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą dla warunków bezchmurnego i zachmurzonego nieba oraz modeli empirycznych długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę pochyloną.

W rozdziale trzecim przedstawiono systematyczny opis oraz podstawowe pojęcia z zakresu chłodzenia radiacyjnego powierzchni czynnej, tj. obniżania się temperatury tej powierzchni w stosunku do temperatury otaczającego powietrza w wyniku intensywnej wymiany ciepła przez promieniowanie w układzie „powierzchnia czynna – ciepłe środowisko zewnętrzne”. Jako powierzchnię czynną należy w tym wypadku rozumieć zewnętrzną powierzchnię dowolnego radiatora, którym jest również przegroda budowlana. Przyjęto założenia uogólniające do opisu radiacyjnej wymiany ciepła układu w kontekście kształtowania bilansu promieniowania danej powierzchni czynnej, a w konsekwencji wpływu na jej całkowity bilans cieplny. Dotyczy to zarówno doboru odpowiednich radiacyjnych własności powierzchni, tj. własności spektralnie selektywnych w odniesieniu do promieniowania krótko- i długofalowego, metod wspomagania efektu chłodzenia radiacyjnego jak i opisu radiacyjnych elementów środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania długofalowego.

W rozdziale czwartym, na podstawie przeprowadzonych badań w warunkach rzeczywistych w różnych porach roku, sformułowano model obliczeniowy oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na dowolnie pochylone płaszczyzny (przegrody budowlane) przy różnym stopniu zachmurzenia nieba. Przedstawiono opis badań doświadczalnych i przyrządy pomiarowe, wyniki pomiarów oraz wyprowadzone na ich podstawie wyrażenia empiryczne do obliczania wartości natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, w tym promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą, wraz z zakresem ich stosowalności. Przedstawiono ogólne podstawy, założenia oraz postać modelu obliczeniowego, a także porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów. Analizę statystyczną sformułowanego modelu, tj. estymację parametrów modelu i jego weryfikację, wykonano klasycznymi metodami statystyki stosowanej [21]. Zaprezentowano również porównanie wyników obliczeń wg modelu zaproponowanego w pracy z wynikami uzyskanymi wg modelu Cole’a. Oceniono także wrażliwość modelu obliczeniowego na zmianę jego parametrów.

Rozdział piąty zawiera dyskusję wyników pomiarów oraz wyników obliczonych na podstawie zaproponowanego modelu matematycznego cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, a także dyskusję porównania wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi przez innych autorów. Przedstawiono również dyskusję wyników pomiarów i przebiegu zmienności składowych bilansu promieniowania dla zewnętrznej powierzchni stropodachu pomiarowego. Przeanalizowano także wpływ różnych czynników na wartość natężenia docierającego promieniowania długofalowego, takich jak kąt pochylecia płaszczyzny oraz stopień zachmurzenia nieba,

z podaniem przykładów możliwości obliczeniowych modelu dla różnych warunków pogodowych. Przedstawiono również dyskusję ważnego problemu, związanego z bardzo złożonym charakterem radiacyjnej wymiany ciepła występującej w aglomeracjach miejskich i rzutującej na powstawanie w dużych miastach powszechnie znanego już zjawiska wyspy ciepła. Wskazano także na różnorodne obszary możliwych zastosowań sformułowanego modelu obliczeniowego.

W rozdziale szóstym przeprowadzono analizę i ocenę wpływu długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na bilans cieplny przegród budowlanych w warunkach ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła. Do rozwiązania problemu nieustalonego przenikania ciepła przez przegrody budowlane, w części związanej z przewodzeniem ciepła, zastosowano metodę obliczeniową impulsowej funkcji przejścia, wraz z warunkami brzegowymi niezbędnymi do rozwiązania wybranych zagadnień obliczeniowych. Oceniono również zaproponowany model bilansu cieplnego przegrody budowlanej w warunkach nieustalonej wymiany ciepła, w pełni uwzględniający oddziaływanie zmiennych w czasie elementów środowiska zewnętrznego. Przedstawiono także przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń bilansu cieplnego stropodachu pomiarowego dla jednokierunkowego nieustalonego przenikania ciepła przez przegrodę wielowarstwową według przyjętej metody obliczeniowej.

Uwagi końcowe i wnioski oraz postulowane kierunki dalszych prac naukowych przedstawiono w rozdziale siódmym.

Niniejsza praca stanowi podsumowanie kilkuletnich studiów teoretycznych i badań przeprowadzonych przez autora w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

2. PROMIENIOWANIE CIEPLNE ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO

2.1. Wprowadzenie

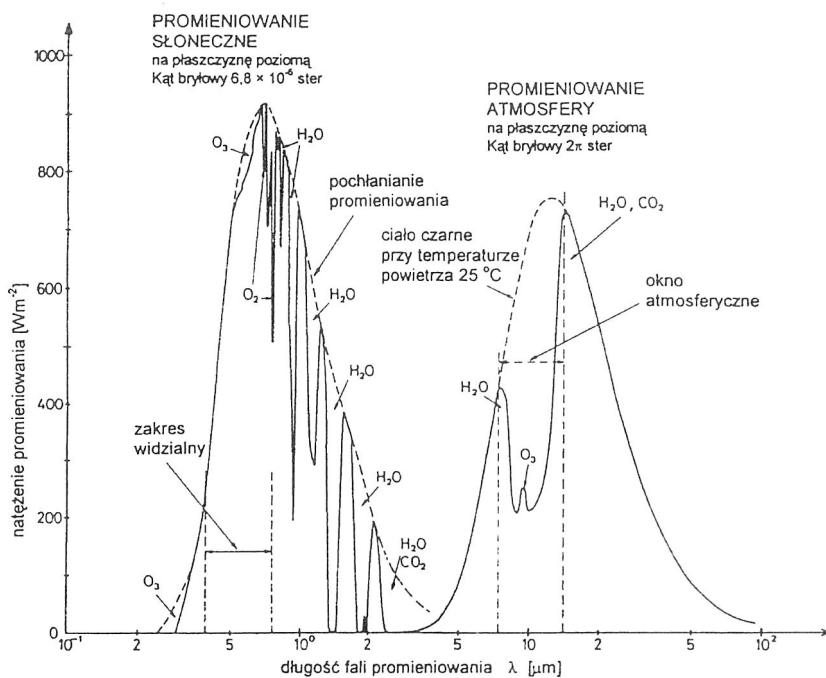
2.1.1. Promieniowanie ciepłe w środowisku naturalnym

Występująca w środowisku naturalnym wymiana ciepła przez promieniowanie odgrywa istotną rolę w naszym życiu codziennym, co związane jest przede wszystkim z oddziaływaniem promieniowania słonecznego, które nagrzewa grunt, budynki, najbliższe otoczenie budynków, powietrze, roślinność itp. Elementy te emitują promieniowanie własne, stając się wtórnym źródłem promieniowania długofalowego, pochłaniając jednocześnie promieniowanie długofalowe pochodzące od atmosfery i obiektów sąsiadujących. Proces ten przebiega w sposób ciągły. Wymiana ciepła przez promieniowanie długofalowe oraz skutki tej wymiany odgrywają również istotną rolę, zwłaszcza gdy chodzi o efekt tzw. chłodzenia radiacyjnego, czyli obniżania się temperatury powierzchni danego ciała poniżej temperatury otaczającego powietrza. Jest wiele przykładów na potwierdzenie występowania tego zjawiska. Najprostszym powszechnie znanym przykładem może być zjawisko tworzenia się rosy lub szronu na trawie przy bezchmurnym niebie w godzinach rannych. Innym przykładem na występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego jest zamarzanie kałuż lub tworzenie się szronu na szybach samochodowych podczas bezchmurnych nocy przy temperaturze powietrza wynoszącej kilka stopni Celsjusza powyżej zera, co jest ściśle związane ze znacznym wypromieniowaniem ciepła do zimniejszego i bezchmurnego nieboskłonu.

Zjawisko chłodzenia radiacyjnego od wieków wykorzystywane jest również w krajach arabskich do pasywnego chłodzenia budynków, tj. do odpowiedniego konstruowania budynków, tak aby w kontrolowany sposób wychładzać pomieszczenia mieszkalne w nocy. I wreszcie spektakularnym przykładem może być, również znany od wieków, sposób produkcji lodu na pustyni, opisany przez Bahadori (w pracy [116]).

Z powyższych uwag wynika, że radiacyjna wymiana ciepła w zakresie promieniowania długofalowego występująca w środowisku naturalnym oraz skutki tej wymiany, od strony jakościowej, znane są od bardzo dawna. Natomiast ilościowe ujęcie zjawiska jest możliwe od momentu odkrycia stratosfery i powstania pierwszych prac naukowych z początkiem tego stulecia. Prawdopodobnie pierwszym naukowcem, który opisał oraz podjął próbę wyjaśnienia zjawiska chłodzenia radiacyjnego był Sir Benjamin Thompson (1753–1814), którego spostrzeżenia zostały opublikowane w *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 94, pp. 77–182, London, 1904 [cyt. w pracy 116].

Na rysunku 2.1 przedstawiono dwa rodzaje promieniowania, determinujące radiacyjną wymianę ciepła w środowisku naturalnym, tj. promieniowanie krótkofalowe (słoneczne), występujące w umownym zakresie długości fal od 0,3 do 3,0 μm oraz promieniowanie długofalowe (cieplne, podczerwone), występujące w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm [55]. Rysunek 2.2 przedstawia natomiast, w innym układzie, radiacyjne własności środowiska naturalnego oraz dla porównania zakres widmowy czułości oka ludzkiego. Oba rysunki pozwalają wyjaśnić istotę radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynki w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego oraz wyjaśnić zasadę doboru odpowiednich własności radiacyjnych (spektralnie selektywnych) zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w kontekście kształtowania jej bilansu promieniowania, a w konsekwencji bilansu cieplnego w skali roku.

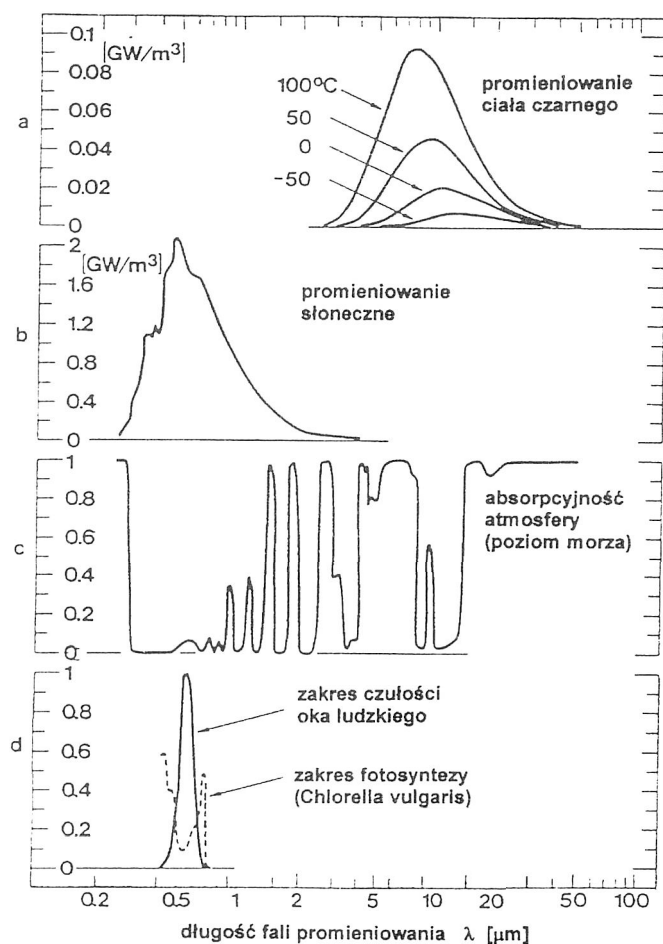


Rys. 2.1. Porównanie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą (temperatura powietrza 25 °C) [55]

Fig. 2.1. Comparison of the intensities of total solar radiation and longwave atmospheric radiation against a horizontal plane (at the air temperature of 25 °C) [55]

Rysunek 2.2a przedstawia spektralny rozkład mocy promieniowania dla ciała doskonale czarnego dla czterech poziomów jego temperatury; maksimum tego promieniowania przypada na zakres długości fal od 8 do 13 μm , tzn. na zakres „okna atmosferycznego”.

ferycznego”, w którym atmosfera jest prawie całkowicie przepuszczalna dla promieniowania ciepłego. Na rysunku 2.2b pokazano spektralny rozkład mocy promieniowania słonecznego – kształt krzywej ściśle koresponduje z temperaturą powierzchni Słońca, tj. ok. 6000 °C. Rysunek 2.2c przedstawia zmienność absorpcyjności atmosfery w funkcji długości fali promieniowania.



Rys. 2.2. Widma: a) promieniowania ciała czarnego dla czterech wartości temperatury, b) promieniowania słonecznego poza atmosferą ziemską, c) absorpcyjności atmosfery na poziomie morza oraz d) zakres czułości ludzkiego oka i zakres długości fal, w którym przebiega proces fotosyntezy alg [62]

Fig. 2.2. Spectra of: a) black-body radiation at four temperatures, b) solar radiation out of the earth's atmosphere, c) typical absorbance across the full atmosphere envelope at a sea-level, and d) the range of the sensitivity of the human eye and the range of the wavelengths at which the photosynthesis of green algae occurs [62]

Można zauważyć, że po pierwsze, zasadnicze spektrum promieniowania słonecznego jest niemal całkowicie przepuszczane przez atmosferę (pomimo że występują pewne spektra absorbowane głównie przez H_2O , CO_2 i O_3). Po drugie, atmosfera jest niemal całkowicie przepuszczalna w zakresie „okna atmosferycznego”, na które przypada maksimum promieniowania ciała doskonale czarnego (rys. 2.2a) oraz ciała szarego, jakim jest przegroda budowlana bądź grunt. W praktyce oznacza to, że w czasie bezchmurnych nocy, zwłaszcza w zimie, radiacyjne straty ciepła płaszczyzn poziomych (grunt, stropodachy) są największe i wówczas najczęściej występuje wspomniane wcześniej zjawisko chłodzenia radiacyjnego danej płaszczyzny.

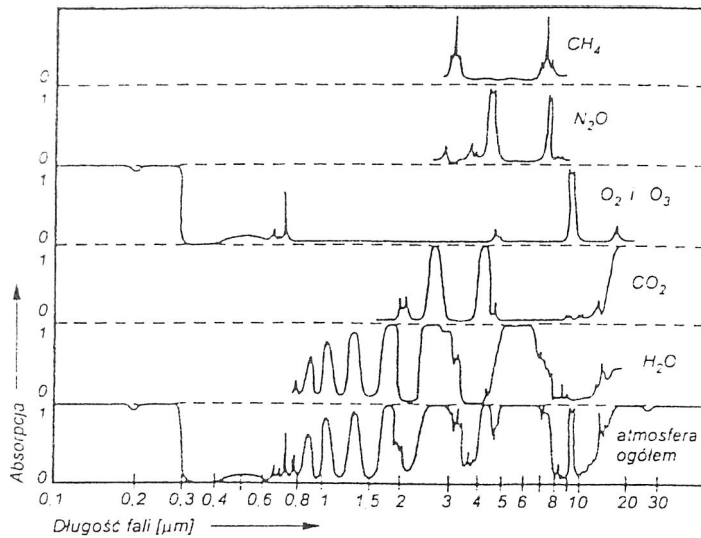
Na rysunku 2.2d dla porównania pokazano zakres widmowy czułości oka ludzkiego, zawarty w wąskim przedziale długości fal od 0,4 do 0,7 μm . Można zauważyć, że niemal ten sam zakres promieniowania jest odpowiedni dla procesów fotosyntezy występującej w roślinach (linia przerywana).

Spektralne zakresy długości fal promieniowania krótko- i długofalowego, absorbyjne właściwości atmosfery oraz zakres czułości oka ludzkiego pokazane na rysunku 2.2 są pomocne do wyjaśnienia zasad kształtowania tak zwanych spektralnie selektywnych właściwości radiacyjnych zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych przezroczystych i pełnych. Problem ten omówiono w rozdziale 3.2 oraz 3.6.2.

2.1.2. Promieniowanie długofalowe atmosfery

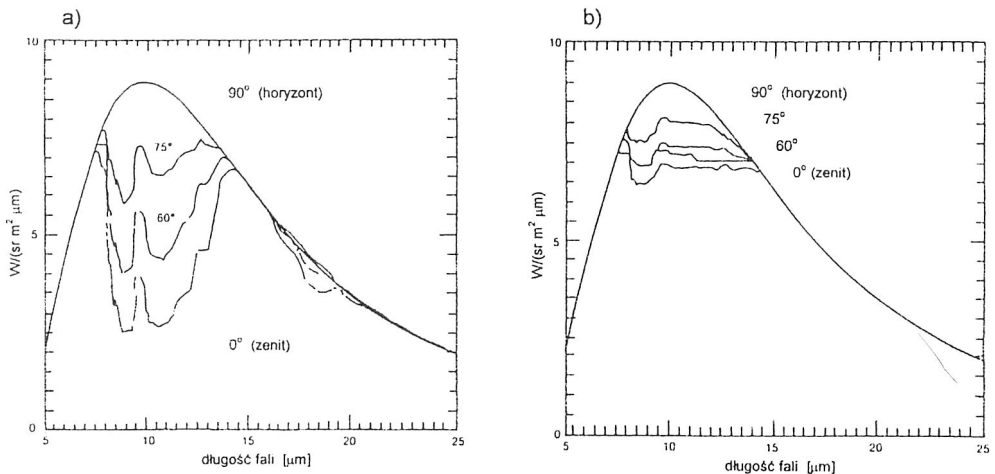
Atmosfera, na skutek pochłaniania promieniowania cieplnego Ziemi i części promieniowania słonecznego oraz otrzymywania ciepła dzięki turbulencyjnemu mieszaninowi się powietrza i kondensacji pary wodnej zawartej w powietrzu ogrzewa się, stając się wtórnym źródłem promieniowania długofalowego w umownym zakresie długości fal od 3,0 do 50,0 μm [93, 94, 122]. Najczęściej zakłada się, że atmosfera jest kompozycją poziomych warstw powietrza, z których każda emituje, absorbuje i transmituje promieniowanie długofalowe w zależności od koncentracji elementów składowych, temperatury i charakterystyk widmowych.

Energia promieniowania długofalowego atmosfery, docierająca do powierzchni Ziemi, jest sumą energii emitowanej przez najniższe warstwy atmosfery i energii przechodzącej przez nie a pochodzącej od warstw wyższych. Większość docierającego do powierzchni Ziemi cieplnego promieniowania nieboskłonu pochodzi od warstw powietrza leżących na wysokości do kilkuset metrów nad Ziemią, natomiast około 90% tego promieniowania występuje w warstwie atmosfery o grubości do pięciu kilometrów nad powierzchnią gruntu [91]. Wprawdzie atmosfera składa się głównie z tlenu i z azotu, jednak związki te są przezroczyste dla promieniowania długofalowego atmosfery, to znaczy ani go nie absorbują, ani nie emitują. Składnikami powietrza, tworzącymi to promieniowanie są natomiast: para wodna, dwutlenek węgla (CO_2) i ozon (O_3), przy czym największe znaczenie ma para wodna (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Zakres spektralny absorpcji podstawowych składników gazowych atmosfery: pary wodnej (H_2O), dwutlenku węgla (CO_2), ozonu (O_3), tlenku azotu (N_2O), metanu (CH_4) oraz powietrza wilgotnego ogółem [110]

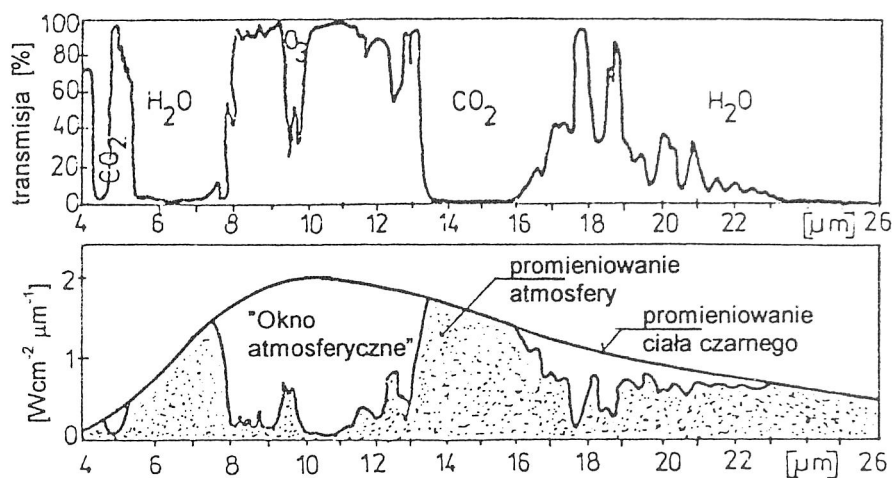
Fig. 2.3. Spectral ranges of the absorptivity of the main components of the earth's atmosphere: water vapour (H_2O), carbon dioxide (CO_2), ozone (O_3), nitrogen monoxide (N_2O), methane (CH_4) and total moist air [110]



Rys. 2.4. Typowe widmo promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza (górna krzywa) oraz promieniowanie długofalowe atmosfery na płaszczyznę poziomą dla trzech kątów zenitalnych: a) przy bezchmurnym niebie, b) przy niebie zachmurzonym [10]

Fig. 2.4. Typical spectrum of the infrared black-body radiation at the air temperature (upper curve) and longwave atmospheric radiation upon a horizontal plane at three zenith angles: a) for a clear sky, b) for overcast sky [10]

Natężenie promieniowania ciepłego atmosfery zależy od pionowego rozkładu temperatury powietrza, od zawartości gazów absorbujących i emitujących promieniowanie (a w tym przede wszystkim pary wodnej i dwutlenku węgla), od długości fali promieniowania i od kierunku z którego promieniowanie jest emitowane. Dwie ostatnie zależności ilustruje rys. 2.4 [114]. Na rysunku 2.5 przedstawiono natomiast spektralny rozkład promieniowania atmosfery ziemskiej i jej transmisyjności.



Rys. 2.5. Spektralna przepuszczalność atmosfery ziemskiej w funkcji długości fali promieniowania oraz spektralny rozkład promieniowania długofalowego atmosfery [37]

Fig. 2.5. Spectral transmittivity of the earth's atmosphere as a function of the radiation wavelength and spectral distribution of the atmospheric longwave radiation [37]

Atmosfera najintensywniej promieniuje z kierunku nad horyzontem (dochodzi tutaj wpływ promieniowania gruntu), najslabiej zaś w zenicie, zwłaszcza w zakresie długości fal od 8,0 do 13,0 μm (tzw. okno atmosferyczne, rys. 2.4). W tym zakresie widma przy bezchmurnym niebie atmosfera ziemska jest prawie zupełnie przepuszczalna dla promieniowania długofalowego, emitowanego przez powierzchnię poziomą, poza tym zakresem można ją zaś traktować praktycznie jako nieprzepuszczalną dla tego promieniowania.

Istotnym elementem wpływającym na ilość docierającego do powierzchni Ziemi promieniowania atmosfery są chmury. Chmury o gęstości wystarczającej dla tworzenia się cienia na powierzchni Ziemi emitują promieniowanie jak ciało doskonale czarne o temperaturze równej temperaturze kropelek wody i kryształków lodu, z których są zbudowane. Obecność chmur powoduje wzrost natężenia strumienia promieniowania atmosferycznego padającego na powierzchnię Ziemi, gdyż promieniowanie pary wodnej i dwutlenku węgla z dolnych partii atmosfery sumuje się z promieniowa-

niem chmur w paśmie $8\div 13\text{ }\mu\text{m}$, tzn. w tym paśmie, w którym cząsteczki gazów nie emitują żadnego promieniowania. Chmury „zamykają” okno atmosferyczne, wpływając na zmniejszenie radiacyjnych strat ciepła zarówno powierzchni Ziemi jak i przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów.

2.2. Radiacyjna wymiana ciepła w atmosferze

2.2.1. Przyjmowane skale uogólnienia

Charakter oraz specyfika środowiska radiacyjnego dla rozpatrywanej lokalizacji, w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, są wynikiem procesów fizycznych, chemicznych i dynamicznych zachodzących w atmosferze, i mogą być rozpatrywane w różnych skalach uogólnienia. W zależności od typu wymienionych procesów, kształtujących wzajemne radiacyjne oddziaływanie atmosfery i rozpatrywanego miejsca, można wyróżnić trzy główne skale uogólnienia, uwarunkowane przede wszystkim wielkością obszaru oraz wysokością ponad powierzchnię Ziemi, tj. wysokością, do której prowadzi się analizę. Wyróżnia się:

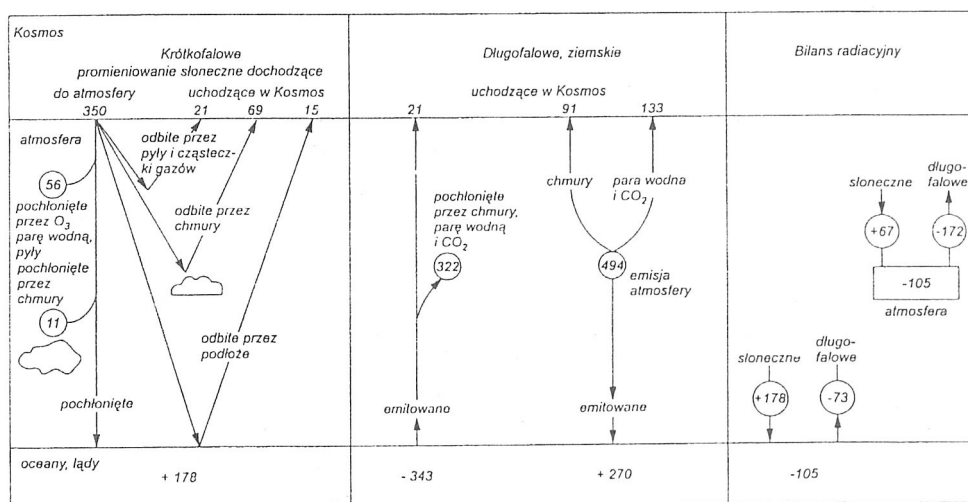
- 1) skalę globalną (makroskalę), obejmującą zagadnienia radiacyjnej wymiany ciepła w atmosferze, dla różnych warunków pogodowych, od powierzchni Ziemi do wysokości kilkudziesięciu kilometrów,
 - 2) skalę lokalną, obejmującą obszar aglomeracji miejskich i miast oraz wysokość od gruntu do umownej górnej krawędzi budynków i powyżej do wysokości tzw. wolnej atmosfery,
 - 3) mikroskalę, w ramach której analizie poddany jest pojedynczy budynek.
- Dalej przedstawiono ogólny opis każdej ze skal uogólnienia.

Skala globalna

Procesy radiacyjne, chemiczne i dynamiczne w atmosferze determinują cyrkulację ogólną mas powietrznych, wpływają na pionową strukturę temperatury powietrza oraz na rozkład poszczególnych składników powietrza w atmosferze Ziemi. W konsekwencji jednoznacznie kształtują klimat Ziemi. Procesy te od lat stanowią przedmiot szczegółowych badań wyspecjalizowanych jednostek naukowych, zwłaszcza pod kątem tworzenia tzw. modeli cyrkulacji ogólnej (General Circulation Models – GCMs) oraz badania trendu zmian klimatu Ziemi. Ponadto, w ostatnim okresie analiza wymienionych wyżej procesów nabrała szczególnego znaczenia w kontekście wzrostu zainteresowania w wielu krajach troską o ochronę środowiska naturalnego.

Modelowanie oraz badania przenoszenia energii promieniowania krótko- i długofalowego w atmosferze w układzie „powierzchnia Ziemi – atmosfera”, z uwzględnieniem wpływu rodzaju zachmurzenia, od lat stanowi działalność priorytetową w wielu ośrodkach naukowo-badawczych. Przykładowo, w Stanach Zjedno-

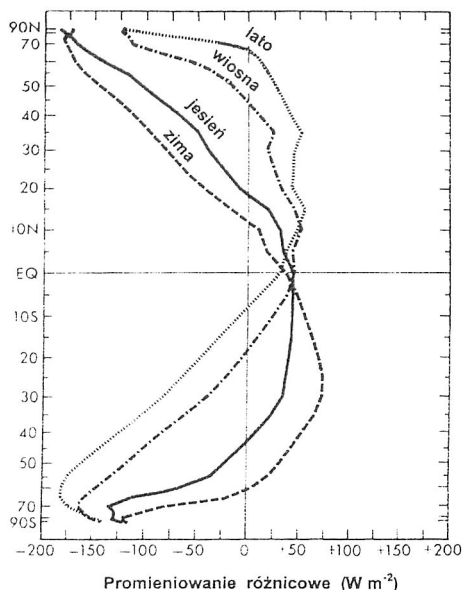
czonych Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej NASA od kilkunastu lat prowadzi i koordynuje jeden z najbardziej naukowo priorytetowych programów badawczych o nazwie CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System, [30]). W jego ramach realizowane są inne programy badawcze, a w tym, między innymi, program o nazwie ERBE (Earth Radiation Budget Eksperyment, [19]) i SARB (Surface and Atmospheric Radiation Budget), wspomagane ciągłymi pomiarami satelitarnymi atmosfery i powierzchni Ziemi. Głównym celem programu CERES jest analiza i modelowanie radiacyjnej wymiany ciepła systemu „Ziemia – atmosfera”, w kontekście badań wpływu zmiany bilansu promieniowania między Ziemią i atmosferą na globalną zmianę klimatu, włączając w to również wpływ dwutlenku węgla na „globalne ocieplenie” atmosfery Ziemi. Ponadto, badany jest również wpływ rodzaju zachmurzenia i właściwości chmur na transport promieniowania i kształtowanie zjawisk cieplnych w atmosferze oraz na bilans promieniowania powierzchni Ziemi. W ramach realizacji celów wymienionych programów badawczych mierzone są dzienna i sezonowa zmienność natężenia promieniowania słonecznego, promieniowania słonecznego odbitego od powierzchni Ziemi, promieniowanie długofalowe emitowane przez Ziemię oraz promieniowanie długofalowe atmosfery. Pomiar globalnego, strefowego i regionalnego bilansu promieniowania krótko- i długofalowego, w przedziałach miesięcznych, są niezbędne do badań modelowych oraz analizowania zmian klimatu Ziemi, a także opracowywania statystycznych zależności między regionalnymi uwarunkowaniami pogody i występującymi tam anomaliami bilansu promieniowania.



Rys. 2.6. Średni roczny bilans promieniowania atmosfery i powierzchni Ziemi (Wm^{-2}) w obszarze krótko- i długofalowym [110]

Fig. 2.6. Average annual radiative balance of the atmosphere and the Earth's (Wm^{-2}) in the range of short- and longwave radiation [110]

Na rysunku 2.6 przedstawiono przykładowy średni roczny bilans promieniowania powierzchni Ziemi i atmosfery dla promieniowania krótko- i długofalowego. Na rysunku 2.7 pokazano natomiast, na podstawie badań satelitarnych, zmienność różnicowego długofalowego promieniowania powierzchni Ziemi (radiacyjnych strat ciepła netto) dla różnych pór roku w funkcji szerokości geograficznej.



Rys. 2.7. Przykładowe średnie roczne radiacyjne straty ciepła netto powierzchni Ziemi (różnicowe promieniowanie długofalowe) w różnych porach roku, w funkcji szerokości geograficznej [66]

Fig. 2.7. Exemplary average annual variability of the Earth's net radiative heat loss (net longwave radiation) for various seasons as a function of latitude [66]

Niezależnie od systematycznie prowadzonych prac naukowych w ramach programów badawczych, wspomaganych pomiarami satelitarnymi, w literaturze tematu istnieje szereg modeli obliczeniowych opisujących radiacyjną wymianę ciepła w atmosferze w skali globalnej. Jednym z najbardziej znanych i cytowanych w literaturze modeli do obliczania natężenia promieniowania długofalowego atmosfery do wysokości 100 km nad powierzchnią Ziemi jest model o nazwie LOWTRAN (obecnie funkcjonuje już wersja nr 7 tego programu), powstały w USA w The Air Force Geophysics Laboratory [91] i zweryfikowany odpowiednimi pomiarami satelitarnymi. Ogólny opis tego modelu przedstawiono w rozdziale 2.2.2.2.

Możliwości wykonywania pomiarów natężenia promieniowania długofalowego atmosfery oraz powierzchni Ziemi w zakresie opisanym wyżej pojawiły się z chwilą wprowadzenia z początkiem lat sześćdziesiątych badań satelitarnych. Niemniej próby matematycznego opisu transportu promieniowania cieplnego w atmosferze podejmowane były od dawna – pierwsze teorie pojawiły się z początkiem naszego stulecia po odkryciu stratosfery. Od strony teoretycznej są to jednak zagadnienia bardzo złożone i opisują je jedynie teorie przybliżone [37, 110, 149]. W obliczeniach modelowych

korzysta się ze znacznych uproszczeń i stosuje różne parametryzacje. Atmosfera jako całość nie jest w stanie równowagi termodynamicznej, jednak w dolnych warstwach atmosfery panują warunki umożliwiające stosowanie założenia o tzw. lokalnej równowadze termodynamicznej. Założenie to umożliwia opis transmisji promieniowania w ośrodku promieniującym jakim jest atmosfera. Przykładem takich równań są równania Schwarzschilda, które stanowią podstawę do modeli pionowego rozkładu promieniowania i temperatury w atmosferze [110].

Inną możliwością określenia wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery, w tym również przy powierzchni gruntu, są tzw. wykresy promieniowania, sporządzone w oparciu o rozważania teoretyczne bądź na podstawie pomiarów w różnych porach roku. Wykresy wykonane w oparciu o rozważania teoretyczne powstały na podstawie analizy emisji promieniowania gazów atmosferycznych w różnym zakresie widma promieniowania oraz na podstawie znajomości, między innymi, zmierzonego dla danej lokalizacji pionowego rozkładu temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej do wysokości około 7 km [35]. Istnieje wiele teoretycznych wykresów promieniowania atmosfery, które mogą być wykorzystane do obliczania natężenia długofalowego promieniowania zarówno atmosfery jak i powierzchni Ziemi. Różnią się one drugorzędnymi szczegółami w niezbędnych założeniach upraszczających do opisu złożonych procesów przepływu i wymiany energii promieniowania w atmosferze.

Wykresy promieniowania, z uwagi na ponad pięćdziesięcioletnią tradycję stosowania, stanowią pewnego rodzaju klasykę z zakresu określania wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery, w tym również przy powierzchni gruntu. W rozdziale 2.2.2.1 zaprezentowano podstawy teoretyczne oraz postać wyrażeń niezbędnych do sporządzania wykresów promieniowania cieplnego, według najczęściej cytowanego w literaturze modelu Elsasser'a [47].

W literaturze tematu funkcjonuje jeszcze kilka innych modeli obliczeniowych opisujących przenoszenie energii promieniowania cieplnego w atmosferze pod kątem tworzenia modeli klimatu Ziemi w skali globalnej. Przykładem może być zaproponowany w 1980 roku przez Aoki [7] wieloparametrowy stochastyczny model transmisji promieniowania cieplnego w atmosferze. Model ten został następnie zmodyfikowany przez Shibata i Aoki [166] i może być stosowany, jak twierdzą autorzy, do opisu przenoszenia energii promieniowania cieplnego również w troposferze i stratosferze.

Opisane wyżej możliwości określania natężenia długofalowego promieniowania atmosfery, tj. wyniki programów badawczych ujmujących zagadnienie w skali globalnej wraz z wynikami badań satelitarnych, wyniki kompleksowych modeli obliczeniowych opisujących zjawiska przenoszenia energii promieniowania do wysokości 100 km nad Ziemią oraz wyniki uzyskane z wykresów promieniowania długofalowego, praktycznie nie mogą być zastosowane do analizy i obliczania bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków. Problem ten omówiono w rozdziale 2.2.2.3.

Skala lokalna

W skali lokalnej rozpatrywane są zagadnienia z zakresu klimatu miejskiego, który zajmuje się, między innymi, problemem radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego, w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, na aglomeracje miejskie i tereny zurbanizowane [144, 145, 146]. Skala lokalna obejmuje również problematykę fizyki miasta [106]. Ogólny opis zagadnień rozpatrywanych w skali lokalnej omówiono w rozdziale 5.4.

Mikroskala

Mikroskala odnosi się do pojedynczego budynku i najczęściej dotyczy obliczania oraz analizy jego bilansu cieplnego. Istotnym problemem jest tutaj odpowiednie przetworzenie i interpretacja miejscowych wieloletnich danych meteorologicznych, pod kątem ich wykorzystania w modelach obliczeniowych bilansu cieplnego budynków w sezonie grzewczym oraz w skali roku. Procesy fizyczne, chemiczne i dynamiczne zachodzące w atmosferze i rozpatrywane w skali globalnej oraz lokalnej mają swoje odwzorowanie w wartościach poszczególnych elementów meteorologicznych w najbliższym otoczeniu budynku. Promieniowanie długofalowe atmosfery oraz najbliższego otoczenia budynku powinno być uwzględnione w analizie i w obliczeniach bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynku, zwłaszcza w sezonie grzewczym.

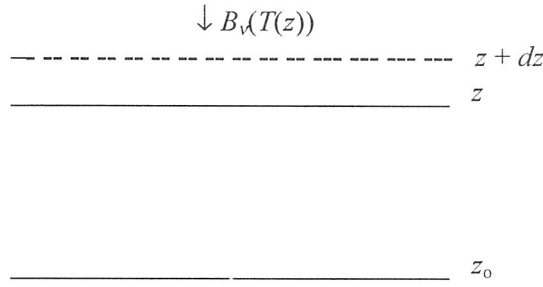
Obliczenia cieplne z zakresu fizyki budowli w naszym kraju, do tej pory, są wykonywane przy założeniu równości temperatury powietrza i temperatury promieniowania najbliższego otoczenia budynku. Równość tych temperatur jest przypadkiem szczególnym, a jak wskazywano wcześniej, temperatura nieboskłonu dla warunków bezchmurnego nieba może być niższa od temperatury powietrza nawet o 20 °C. W konsekwencji, w obliczeniach strat ciepła przez przegrodę budowlaną nie uwzględnia się dodatkowych radiacyjnych strat ciepła, a przez to nie doszacowuje się ilości zapotrzebowania na ciepło w sezonie grzewczym. Metodę obliczania bilansu cieplnego przegród budowlanych z uwzględnieniem rzeczywistego oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, dla warunków ustalonego i niestalonego przenikania ciepła, przedstawiono w rozdziale 6.1 i 6.2.

2.2.2. Wybrane modele obliczeniowe

2.2.2.1. Wykresy promieniowania cieplnego atmosfery – model Elsasser’a

2.2.2.1.1. Równanie transportu promieniowania w atmosferze

Rozważmy warstwę gazu o grubości $z-z_0$ i z rozkładem temperatury zmieniającej się według funkcji $T(z)$ [47]. Załóżmy, że w górnej części tej warstwy występuje izotropowe promieniowanie ciała doskonale czarnego o częstotliwości ν , $B_\nu(T(z))$ (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Oznaczenia przyjęte do obliczeń

Fig. 2.8. Denotations used for calculations

Promieniowanie ciała doskonale czarnego, docierające na poziom z_0 jest wyrażone równaniem:

$$E_v(z_0) = B_v(T(z)) * \tau_{F'}(z - z_0) \quad (2.1)$$

gdzie $\tau_{F'}(z - z_0)$ jest spektralną transmisyjnością warstwy $z - z_0$ dla promieniowania izotropowego. Transmisyjność $\tau_{F'}$ zależy od rozkładu ciśnienia pary wodnej i temperatury w warstwie $z - z_0$. Strumień promieniowania na poziomie z_0 składa się z dwóch elementów: pierwszy jest transmitowanym strumieniem promieniowania ciała doskonale czarnego:

$$B_v(T(z)) * \tau_{F'}(z + dz - z_0) = B_v(T(z)) \left[\tau_{F'}(z - z_0) + \frac{d\tau_{F'}(z - z_0)}{dz} dz \right] \quad (2.2)$$

drugi natomiast jest promieniowaniem emitowanym przez warstwę dz (osiągającym poziom z_0) i oznaczonym przez $dE_v^\downarrow(z_0)$. Chwilowo nie jest rozważane promieniowanie własne emitowane przez warstwę $z - z_0$. Zatem:

$$B_v(T(z)) \left[\tau_{F'}(z - z_0) + \frac{d\tau_{F'}(z - z_0)}{dz} dz \right] + dE_v^\downarrow = E_v(z_0) = B_v(T(z)) \tau_{F'}(z - z_0) \quad (2.3)$$

Stąd:

$$dE_v^\downarrow(z_0) = -B_v(T(z)) \frac{d\tau_{F'}(z - z_0)}{dz} dz \quad (2.4)$$

Powyższe równanie opisuje strumień promieniowania warstwy dz , docierające do poziomu z_0 , a w konsekwencji absorpcję promieniowania przez warstwę $z - z_0$. Stru-

mieñ promieniowania na poziomie z_0 spowodowany emisją i absorpcją promieniowania w warstwie $z-z_0$ jest zatem opisany równaniem:

$$E_v^\downarrow(z_0) = \int_{z_0}^z dE_v(z_0) = - \int_{z_0}^z B_v(T(z')) \frac{d\tau_F(z' - z_0)}{dz'} dz' \quad (2.5)$$

oraz

$$E^\downarrow(z_0) = \int_v dv E_v^\downarrow(z_0) = - \int_v dv \int_{z_0}^z B_v(T(z')) \frac{d\tau_F(z' - z_0)}{dz'} dz' \quad (2.6)$$

Jest to całkowita postać równania transportu promieniowania w atmosferze. Transmisyjność τ_F jest funkcją ciśnienia pary wodnej i temperatury gazu i może być aproksymowana wyrażeniem $\alpha p T^{0.5}$, i dlatego wygodniej jest wyrazić warstwy atmosfery równaniami będącymi funkcją tzw. zredukowanej optycznej grubości u , zdefiniowanej:

$$u(z - z_0) = \int_{z'=z_0}^z \left[\frac{T_0}{T(z')} \right]^{0.5} \frac{p(z')}{p_0} dh(z' - z_0) \quad (2.7)$$

$$h(z' - z_0) = \int_{z_0}^{z'} \rho(z'') dz'' \quad (2.8)$$

Wielkości T_0 oraz p_0 są wielkościami odniesienia, zazwyczaj 293 K oraz 1023 mbar. Wielkość $\rho(z'')$ jest gęstością gazu na poziomie z'' . W praktyce, pionowa grubość warstwy jest wyrażona w cm wytrącającej się wilgoci albo, dla innych gazów, w równoważnej grubości warstwy gazu przy standardowym ciśnieniu (1013 mbar) i temperaturze (293 K). Zależność transmisyjności τ_F od częstotliwości fali promieniowania jest opisywana przez uogólniony współczynnik absorpcji L_v , będący funkcją częstotliwości ν . Wielkość τ_F może być wyrażona jako funkcja zmiennych L_v oraz u :

$$\tau_F = \tau_F(L_v * u) \quad (2.9)$$

Równanie transportu promieniowania może być więc zapisane jako:

$$E^\downarrow(u_0) = - \int_v dv \int_{u_0}^{u_1} B_v(T(u)) \frac{d\tau_F(L_v(u - u_0))}{du} du \quad (2.10)$$

2.2.2.1.2. Modyfikacja Elsasser'a równania transportu promieniowania

Czysty gaz

W roku 1942 Elsasser wprowadził modyfikację równania (2.6), polegającą na zastąpieniu całki podwójnej całką pojedynczą, przez wprowadzenie wielkości $Q(u, T)$ zdefiniowanej następująco:

$$Q(u, T) = \int_0^\infty \frac{dB_\nu(T)}{dT} \tau_F(L_\nu u) d\nu \quad (2.11)$$

Po przekształceniach, równanie transportu promieniowania jest postaci:

$$E^\downarrow(z_0) = \int_0^{T_0} Q(0, T) dT + \int_{T_0}^{T_1} Q(u(T), T) dT + \int_{T_1}^0 Q(u_1, T) dT \quad (2.12)$$

W równaniu tym zmienną całkowania jest T zamiast wielkości u , występującej w równaniu (2.6). Pozostałe wielkości to: $T_0 = T(z = z_0)$, $T_1 = T(z_1)$ oraz $u(T_0) = 0$.

Równanie (2.12) jest podstawowym równaniem Elsasser'a dla wykresów promieniowania długofalowego atmosfery. Pierwszy człon prawej strony równania jest promieniowaniem ciała doskonale czarnego o temperaturze T (co wynika z definicji $Q(u, T)$ i z wyrażenia $\tau_F(0) = 1$). Drugi człon równania może być określony, gdy znany jest profil (zmiennosć) temperatury i wilgotności atmosfery.

Równanie (2.12) można przedstawić również w innej formie, wprowadzając wielkość $R(u, T)$, zdefiniowanej jako:

$$R(u, T) = \frac{dB}{dT} - Q(u, T) \quad (2.13)$$

Wówczas:

$$E^\downarrow = - \left[\int_{T_0}^{T_1} R(u(T), T) dT + \int_{T_1}^0 R(u_1, T) dT \right] \quad (2.14)$$

gdzie $B(T)$ jest promieniowaniem ciała doskonale czarnego o temperaturze T .

Elsasser i Culbertson w roku 1960 [48] przedstawili tabelaryczne wartości R w funkcji wielkości u oraz T , a także dla drugiego składnika sumy w równaniu (2.14) w funkcji u_1 , gdzie $T_1 = 193$ K dla trzech zakresów spektralnych pary wodnej i dla całkowitego zakresu spektralnego H_2O , CO_2 oraz O_3 .

Mieszanka gazów

Promieniowanie atmosfery docierające do powierzchni Ziemi emitowane jest głównie przez parę wodną oraz przez dwutlenek węgla (udział ozonu szacowany jest jedynie na ok. 1÷2%). W roku 1960 Elsasser i Culbertson [48] uwzględnili udział CO₂ przez zastąpienie wyrażenia $\tau_r(\text{H}_2\text{O})$ przez wyrażenie $\tau_r(\text{H}_2\text{O}) * \tau_r(\text{CO}_2)$. Następnie wielkości Q oraz R skorygowano, odpowiednio przez ΔQ oraz ΔR , zdefiniowane:

$$\Delta Q = -\Delta R = \int_0^{\infty} \frac{dB_v(T)}{dT} \tau_r(\text{H}_2\text{O}) [1 - \tau_r(\text{CO}_2)] dv \quad (2.15)$$

Ponieważ w praktyce skorygowanie wpływu dwutlenku węgla ma decydujące znaczenie dla najniższych warstw atmosfery, Elsasser i Culbertson opracowali tablice wartości poprawki ΔR jako funkcji wielkości $u_{\text{H}_2\text{O}}$ oraz u_{CO_2} dla temperatury 293 K. Jednakże dla bardzo niskich temperatur powietrza poprawka ΔR osiąga wartość zerową. Podobne poprawki opracował Yamamoto w roku 1952 [193]; można wykazać, że poprawki Elsasser'a i Culbertson'a oraz Yamamoto formalnie są takie same.

2.2.2.1.3. Promieniowanie powierzchni Ziemi

Promieniowanie ciepłe, mierzone na określonym poziomie wysokości obserwacji, a emitowane z kierunku powierzchni Ziemi do atmosfery jest sumą trzech składowych: promieniowania powierzchni Ziemi, promieniowania atmosfery odbitego od powierzchni Ziemi oraz promieniowania własnego atmosfery skierowanego do góry i mierzonego na poziomie obserwacji. Jeżeli założymy, że współczynnik emisyjności powierzchni Ziemi jest równy jedności, to w obliczeniach uwzględniamy jedynie pierwszą i trzecią składową promieniowania, a gęstość strumienia promieniowania długofalowego skierowanego w kierunku do atmosfery może być obliczona z równania Elsasser'a. Jeżeli założymy, że temperatura T_1 (równanie (2.14)) będzie równa temperaturze powierzchni, to znaczy $u_1(T_1) = \infty$ (ciało doskonale czarne), to:

$$\int_{T_1}^0 R(u_1, T) dT = \int_{T_1}^0 R(\infty, T) dT = \int_{T_1}^0 \frac{dB(T)}{dT} dT = -B(T_1) \quad (2.16)$$

ponieważ $Q(\infty, T) = 0$, jako konsekwencja wyrażenia $\tau_r(\infty) = 0$ (równanie (2.11)).

2.2.2.1.4. Wpływ zachmurzenia

W przypadku obecności chmur na poziomie z_1 , promieniowanie atmosfery skierowane w kierunku Ziemi może być obliczane według identycznego schematu jak pro-

mieniowanie skierowane w kierunku ku górze. Należy założyć, że chmury znajdujące się na poziomie z_1 emitują promieniowanie jak ciało doskonale czarne o temperaturze T_1 , natomiast w równaniu (2.16) należy dokonać podstawienia $u_1(T_1) = \infty$. W przypadku występowania różnego rodzaju chmur (chmur o różnej podstawie) należy udział każdego rodzaju uwzględnić osobno.

2.2.2.1.5. Obliczanie natężenia promieniowania atmosfery

Rozkład H_2O

Występujące w równaniu (2.14) wielkości należy obliczyć dla pary wodnej zawartej w atmosferze. Wielkość $u(T)$ jest funkcją pionowego rozkładu temperatury i wilgotności powietrza oraz ciśnienia pary wodnej. Wielkość $R(u, T)$ jest określana z tablic Elsasser'a i Culbertson'a z wykorzystaniem procedury interpolacji kwadratowej. Wartości u określa się następująco:

- (1) atmosferę dzieli się na warstwy $j = 1, 2, \dots, i$, odzwierciedlające przyjęty krok całkowania w numerycznej metodzie określania pierwszej całki równania (2.14),
- (2) zakłada się, że pionowa zmienność ciśnienia pary wodnej w atmosferze jest taka sama jak dla atmosfery z adiabatycznym rozkładem temperatury, z temperaturą $T_0 + \gamma_d z_0$ i ciśnieniem $p = 1013$ mbar dla $z = 0$:

$$p(z) = p_0 \left(1 - \frac{\gamma_d}{T_0 + \gamma_d z_0} \right)^{7/2} \quad (2.17)$$

gdzie γ_d jest adiabatycznym pionowym gradientem temperatury. Potęgą w równaniu (2.17) jest określona dla c_p/R ; jej dobrą aproksymacją jest wartość $7/2$,

- (3) zredukowana optyczna grubość warstwy u_i między poziomami $j = 1$ oraz $j = i$ obliczana jest z zależności:

$$u_i = \sum_{j=1}^i \Delta u_j, \quad \Delta u_j = \bar{q}_j \frac{\Delta p_j}{g} \frac{\bar{p}_j}{p_0} \left(\frac{T_0}{T_j} \right)^{0.5} \quad (2.18)$$

gdzie $\bar{q}_j = [q(z_j) + q(z_{j-1})]/2$ jest średnią „wymieszania” warstwy j (w jednostkach kg H_2O na kg suchego powietrza), $\Delta p_j = p(z_j) - p(z_{j-1})$ oraz $\bar{p}_j = [p(z_j) + p(z_{j-1})]/2$, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$. Ponieważ $\Delta p_j/g \approx \rho_j(z_j - z_{j-1})$, gdzie ρ_j jest średnią gęstością powietrza warstwy j , $\rho_j(\Delta p_j/g)$ jest sumą wody w warstwie j , w kgm^{-2} .

Rozkład CO_2

Zredukowaną optyczną grubość warstwy między z i z_0 oblicza się z zależności (przy założeniu koncentracji CO_2 na poziomie 0,033% objętościowo):

$$u_{\text{CO}_2}(z - z_0) = 33 \cdot 10^{-5} \int_{z_0}^z \frac{p(z')}{p_0} * \frac{T_0}{T(z')} * \frac{p(z')}{p_0} * \left(\frac{T_0}{T(z')} \right)^{0.5} dz \quad (2.19)$$

Pierwsze dwa wyrażenia podcałkowe wyrażają zmienność zawartości CO_2 z wysokością, dwie następne wielkości są skorygowaniem ciśnienia pary wodnej i temperatury powietrza. Zakładając, że $c_p/R = 7/2$ oraz pomijając w całkowaniu człon z z_0 otrzymujemy:

$$u_{\text{CO}_2} = -33 \cdot 10^{-5} * \frac{2}{13} \frac{T_0}{\gamma} \left[\left(1 - \frac{\gamma_d}{T_0} z \right)^{13/2} - \left(1 - \frac{\gamma_d}{T_0} z_0 \right)^{13/2} \right] \quad (2.20)$$

gdzie u_{CO_2} wyrażone jest w metrach. Pominięcie z_0 w całkowaniu równania (2.20) jest dopuszczalne dla $z_0 \leq 1$ km. Mając wartości u_{CO_2} oraz $u_{\text{H}_2\text{O}}$ można interpolacyjnie określić wielkość ΔR z tablic Elsasser'a i Culbertson'a.

Dodatkowe procedury dla H_2O i CO_2 przy niskich temperaturach

Jak już wspomniano wcześniej, najniższa temperatura obserwowana w atmosferze (T_n) w praktyce będzie wyższa niż $T_1=193$ K. Rozkład przedziału temperatury (T_n, T_1) jest obliczany z zależności:

$$\begin{aligned} \int_{T_n}^{T_1} R(u, T) dT &\approx \int_{T_n}^{T_1} R(u(T_n), T) dT \approx \int_{T_n}^{T_1} R(u(T_n), T_n) \frac{T^3}{T_n^3} dT = \\ &= 0,25 \frac{1}{T_n^3} (T_1^4 - T_n^4) R(u(T_n), T_n) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Pierwszy wyraz w wyrażeniu (2.21) zakłada, że atmosfera jest całkowicie sucha powyżej poziomu n . Jest to realne w przypadku rozpatrywanego poziomu n , zlokalizowanego w tropopauzie. Dla następnego członu równania (2.21) przyjęto założenie, że wielkość $R(u = \text{constant}, T) \approx T^3$. Jest to jedynie przybliżenie, jednakże powstały błąd jest pomijalnie mały. Rozkład CO_2 w przedziale temperatur ($T_1, 0$) nie może być równy $193 \times \Delta R$, ponieważ wartość ΔR drastycznie maleje poniżej temperatury $T = 160$ K. W związku z tym wprowadzono następującą formułę na podstawie krzywej korygującej opracowanej przez Yamamoto [193] dla CO_2 :

$$\int_{T_1}^0 \Delta Q(u_1(\text{H}_2\text{O}), u_1(\text{CO}_2)) dt \approx 60 \Delta Q(u_1(\text{H}_2\text{O}), u_1(\text{CO}_2)) \quad (2.22)$$

2.2.2.1.6. Uwagi do równania Elsasser'a

Równanie Elsasser'a transportu promieniowania długofalowego w atmosferze wywołało wiele komentarzy w prasie technicznej. W 1966 roku Zdunkovski ze współautorami [195] zauważyli, że funkcja transmisji τ_F jest podwójną funkcją temperatury: po pierwsze τ_F jest funkcją uogólnionego współczynnika absorpcji L_v , który głównie zależy od temperatury, a po drugie zależy od wielkości $u(T)$. Elsasser i Culbertson ominęli tę uwikłaną zależność przy konstruowaniu swoich tablic promieniowania. Zdunkovski skorygował zależności Elsasser'a i przedstawił nowe tablice dla wielkości $R(u,T)$ dla całego zakresu spektralnego pary wodnej. Rozbieżność między nowymi tablicami dla $R(u,T)$ i nieskorygowanymi, tj. tablicami Elsasser'a, wynosiła do ok. 10%. W konsekwencji, obliczona gęstość strumienia promieniowania cieplnego atmosfery również różniła się o ok. 10%. Z kolei poprawki zaproponowane przez Zdunkovskiego, w roku 1976 były zakwestionowane przez Charlock'a i Herman'a [31]. Autorzy ci wykazali, że procedury Elsasser'a zawierają dwa błędy matematyczne, które jednakże się znoszą. W rezultacie, formuły matematyczne zaproponowane przez Elsasser'a i Culbertson'a do obliczania natężenia cieplnego promieniowania atmosfery dają prawidłowe wyniki numeryczne, podczas gdy poprawka zaproponowana przez Zdunkovskiego powinna być zmodyfikowana. Następnie, we wspólnym komentarzu, Charlock, Herman i Zdunkovski [32] jeszcze bardziej ograniczyli różnice w podejściu do założeń aproksymacyjnych do równania transportu promieniowania cieplnego w atmosferze, stwierdzając zarazem, że oba rozwiązania (tzn. ich oraz Elsasser'a) są przybliżeniami. Warto również wspomnieć, że w roku 1970 Staley i Jurica [169] wykorzystali oryginalne rozwiązanie Elsasser'a i Culbertson'a do obliczania uogólnionych współczynników absorpcji oraz strumieni promieniowania atmosfery, bez korzystania z modyfikacji funkcji R podanej przez Zdunkovskiego w roku 1966. Wykazali, że otrzymane przez nich wyniki są zbliżone do wyników Zdunkovskiego.

Podsumowując można stwierdzić, że formuły Elsasser'a i Culbertson'a do obliczania strumienia promieniowania cieplnego przenoszonego w atmosferze dają błąd ok. 10% w stosunku do wyników uzyskanych z pomiarów. Wyniki otrzymane przez Zdunkovskiego ze współautorami [195], przez Charlock'a, Herman'a i Zdunkovskiego [32] oraz przez Staley'a i Jurica [169] są na zbliżonym poziomie.

2.2.2.2. Model obliczeniowy LOWTRAN

Jednym z najbardziej znanych modeli obliczeniowych do określania wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery jest model o nazwie LOWTRAN powstały w USA w The Air Force Geophysics Laboratory [91]. W 1992 roku pojawiła się wersja 7 tego programu, bazująca na wersji 6 z roku 1983. Model ten, a właściwie grupa zawartych tam modeli, umożliwia obliczanie spektralnej transmisyjności i emisji promieniowania atmosfery w zakresie długości fal od $0,25 \mu\text{m}$ do $28,5 \mu\text{m}$ (od 350 cm^{-1}

do 40000 cm^{-1}), z uwzględnieniem efektu ciągłego absorbowania promieniowania, molekularnego rozpraszania i osłabienia (tłumienia) przez aerozole. W wersji 7 programu wprowadzono, między innymi, nowe modele promieniowania różnego rodzaju chmur, możliwość uwzględniania położenia geograficznego oraz kolejną modyfikację osłabiania promieniowania przez aerozole.

Podstawowym równaniem wykorzystywanym w obliczeniach promieniowania atmosfery jest równanie transmisji tego promieniowania, opisane równaniem [91]:

$$I(\nu) = \int_{\tau_a^b}^1 d\tau_a L_{bb}(\nu, T) \tau_s + L_{bb}(\nu, T_b) \tau_t^b \quad (2.23)$$

w którym:

τ_a – średnia transmisyjność od analizowanego punktu do obserwatora spowodowana absorpcją,

τ_s – średnia transmisyjność od analizowanego punktu do obserwatora spowodowana rozpraszaniem,

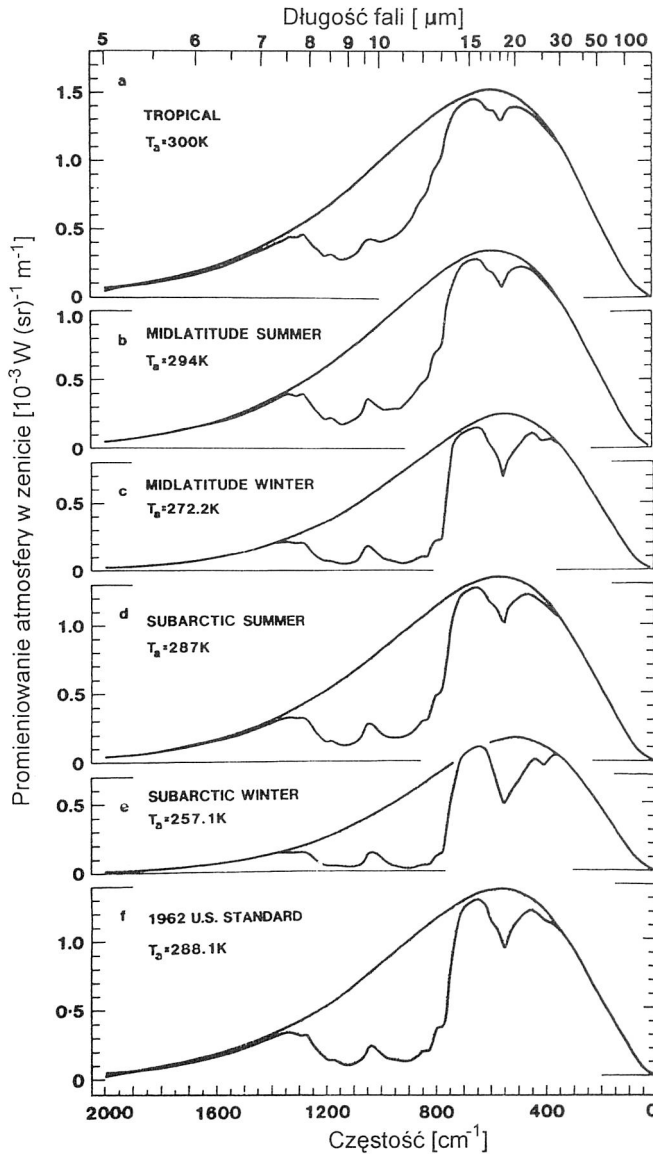
τ_a^b, τ_t^b – średnie transmisyjności od obserwatora do rozpatrywanej granicy,

$L_{bb}(\nu, T)$ – średnia funkcja Planck’a przy częstotliwości ν oraz temperaturze T , dla rozpatrywanej warstwy atmosfery,

T_b – temperatura granicy warstw.

Model obliczeniowy LOWTRAN 7, podobnie jak wersje poprzednie, ma budowę modułową; zawiera modele atmosfery i aerozoli z możliwością zastąpienia ich innymi modelami lub danymi pomiarowymi. Do przeprowadzania obliczeń wymagana jest znajomość panujących warunków meteorologicznych w atmosferze. Kody programu LOWTRAN zawierają dane pomiarowe dla pionowego profilu ciśnienia barometrycznego, temperatury powietrza, gęstości pary wodnej i gęstości ozonu dla sześciu różnych wybranych rodzajów atmosfery i pięciu sezonów. Poszczególne modele atmosfery są odniesione do atmosfery standardowej USA (The 1962 US Standard Atmosphere) i są to (rys.2.9): Tropical (TROP, 15 °N), Midlatitude Summer (MS, 45 °N), Mitlatitude Winter (MW, 45 °N), Subarctic Summer (SS, 60 °N) i Subarctic Winter (SW, 60 °N).

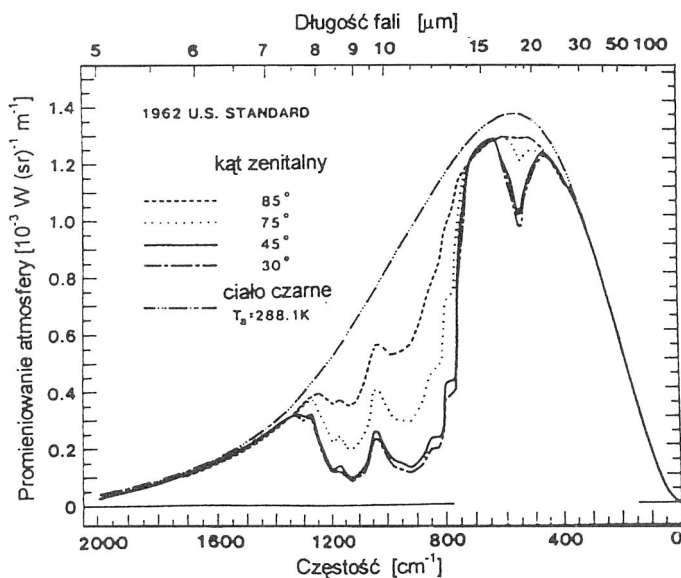
Obliczenia są wykonywane na różnej wysokości według następującego schematu: dla wysokości od 0 do 25 km z krokiem co 1 km, dla wysokości od 25 do 50 km z krokiem co 5 km oraz dla 70 i 100 km ponad powierzchnią Ziemi. W każdym modelu atmosfery zawarte są modele różnych aerozoli w funkcji wysokości poszczególnych warstw powietrza. Zmienność właściwości optycznych aerozoli wraz z wysokością jest zamodelowana poprzez podział atmosfery na cztery warstwy, każda mająca inny typ aerozoli. Podziału dokonano na wysokości od 0 do 2 km, następnie od 2 do 10 km, 10 do 30 km oraz od 30 do 100 km.



Rys. 2.9. Spektralne długofalowe promieniowanie atmosfery na płaszczyznę poziomą, obliczone według modelu LOWTRAN dla sześciu modeli atmosfery [49]. Dolne linie na wykresach (a)–(f) odnoszą się do zenitalnego promieniowania atmosfery, górne linie przedstawiają odpowiadające im promieniowanie ciała czarnego o temperaturze otaczającego powietrza T_a mierzonej przy powierzchni gruntu

Fig. 2.9. Spectral atmospheric longwave radiance upon a horizontal plane for six model atmospheres as obtained from the LOWTRAN model [49]. The lower curves ((a)–(f)) refer to atmospheric zenith radiance and the upper curves show the corresponding black-body radiation spectra for the air temperature T_a measured at the ground level

Rysunek 2.9 przedstawia wyniki obliczeń programu LOWTRAN, ilustrujące zmienność promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą, według sześciu modeli atmosfery dla pierwszego (najniższego) kilometra atmosfery. Można zauważyć, że obok głównego okna atmosferycznego, zawartego w przedziale długości fal $8\div 13\text{ }\mu\text{m}$, istnieje również drugie mniejsze okno atmosferyczne w zakresie długości fal $16\div 22\text{ }\mu\text{m}$, co potwierdziły również badania doświadczalne [10]. Jednak efekt oddziaływania drugiego okna atmosferycznego nie ma praktycznego znaczenia przy doborze spektralnie selektywnych właściwości radiatorów (rozdz. 3).



Rys. 2.10. Wyniki obliczeń programu komputerowego LOWTRAN dla *Standardowej Atmosfery USA 1962* w funkcji czterech kątów zenitalnych. Dla porównania pokazano widmo promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza wynoszącej 288,1 K [51]

Fig. 2.10. Calculated with the LOWTRAN computer program results for *The 1962 U.S. Standard Atmosphere* for four zenith angles. For comparison, a black-body radiation curve corresponding to the ambient air temperature of 288,1 K is included [51]

Na rysunku 2.10 pokazano przykładowe wyniki obliczeń promieniowania długofalowego standardowej atmosfery USA 1962, według modelu LOWTRAN, dla czterech kątów zenitalnych [51].

Z modelu obliczeniowego LOWTRAN korzysta przede wszystkim Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej NASA oraz Powietrzne Siły Zbrojne Stanów Zjednoczonych.

Wielu autorów wskazuje na bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami obliczeń uzyskanymi z modelu obliczeniowego LOWTRAN [10, 49]. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że uzyskane wyniki, z uwagi na globalny opis

przenoszenia promieniowania długofalowego w atmosferze, nie mogą być wykorzystane do opisu lokalnego bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków.

2.2.2.3. Podsumowanie

W rozdziałach 2.2.2.1. i 2.2.2.2. przedstawiono wybrane możliwości określania wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą, do których można zaliczyć badania satelitarne, korzystanie z kompleksowych modeli obliczeniowych bądź z opracowanych wykresów promieniowania. Ze względu jednak na globalne ujęcie skali zagadnienia w tych metodach, a w tym na przykład, pomiar lub obliczanie długofalowego promieniowania atmosfery do wysokości 100 km nad powierzchnią Ziemi, w praktyce powyższe możliwości obliczeniowo-pomiarowe są nieprzydatne do modelowania i analizy bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków, ponieważ zostały opracowane do realizacji zupełnie innych celów naukowo-badawczych. Zaprezentowanie tych możliwości obliczeniowo-pomiarowych miało na celu zilustrowanie złożoności zagadnienia oraz komplikacji opisu matematycznego emisji i transportu energii promieniowania długofalowego w atmosferze.

W przypadku wykresów promieniowania należy dodać, że dostarczają one wiele informacji w zakresie promieniowania cieplnego atmosfery, również przy powierzchni gruntu, niemniej mogą być wykorzystane jedynie dla warunków meteorologicznych takich samych lub podobnych do tych, jakie panowały podczas wykonywania tych wykresów. I wreszcie, korzystanie z wykresów promieniowania atmosfery jest bardzo uciążliwe czasowo oraz żmudne.

2.3. Empiryczne modele promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą

Istnieje kilka powszechnie stosowanych metod określania wartości natężenia promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą przy gruncie, z możliwością zastosowania w praktyce agrotechnicznej i inżynierskiej. Metody te można podzielić na dwie zasadnicze grupy, a mianowicie:

- 1) zależności empiryczne dla promieniowania bezchmurnego nieba,
- 2) zależności empiryczne dla promieniowania częściowo lub całkowicie zachmurzonego nieba.

Poniżej omówiono najczęściej cytowane modele obliczeniowe dla każdej z grup.

2.3.1. Promieniowanie atmosfery w warunkach nieba bezchmurnego

Natężenie promieniowania długofalowego atmosfery $R_{ao}(\lambda, z)$ przy bezchmurnym niebie, będące funkcją długości fali promieniowania λ oraz kąta zenitalnego z , oblicza się ze wzoru [114]:

$$R_{ao}(\lambda, z) = \varepsilon_o(\lambda, z) B_a(\lambda) \quad (2.24)$$

w którym $B_a(\lambda)$ jest funkcją Plancka, wyznaczoną dla temperatury otaczającego powietrza, (K), mierzoną na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu, a $\varepsilon_o(\lambda, z)$ jest emisyjnością nieboskłonu. Funkcję Plancka wyraża równanie:

$$B_a(\lambda) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_a}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.25)$$

w którym h jest stałą Plancka, k_B jest stałą Boltzmanna, natomiast c jest prędkością światła.

Natężenie promieniowania długofalowego atmosfery, docierającego do płaszczyzny poziomej w całym zakresie widma promieniowania, po uwzględnieniu wyrażeń (2.24) i (2.25), oblicza się ze wzoru [114]:

$$R_{ao} = 2\pi \int_0^\infty d\lambda B_a(\lambda) \int_0^1 \cos z d \cos z \varepsilon_o(\lambda, z) \quad (2.26)$$

Ze względu na postać funkcji podcałkowych, wykonywanie obliczeń według zależności (2.26) do celów praktycznych byłoby bardzo uciążliwe. Mając to na uwadze, jak również wnioski wynikające z analizy możliwości wykorzystania dostępnych metod obliczeniowych (komentarz w rozdz. 2.2.2.3), w wielu krajach utworzono szereg formuł empirycznych na obliczanie natężenia promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą, dla warunków bezchmurnego nieba. Wyrażenia te wykorzystują wielkości meteorologiczne standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, takie jak temperatura powietrza, ciśnienia pary wodnej, temperatura punktu rosy i inne.

Istnieje kilkanaście empirycznych modeli matematycznego opisu natężenia promieniowania długofalowego atmosfery przy powierzchni Ziemi dla warunków bezchmurnego nieba. Modele te można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą te, w których emisyjność atmosfery wyrażono w funkcji ciśnienia pary wodnej i/lub temperatury powietrza. Do drugiej grupy natomiast należą te modele, w których ciśnienie pary wodnej (we wzorach na obliczanie emisyjności atmosfery) wyrażono w funkcji temperatury powietrza albo temperatury punktu rosy. Modele te oparte są na metodach statystycznej regresji oraz na pojęciu tak zwanej pozornej emisyjności atmosfery. Emisyjność tę definiuje się jako stosunek natężenia promieniowania atmosfery do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego, którego temperatura jest równa temperaturze otaczającego powietrza oraz zależy od ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu. Natężenie promieniowania cieplnego atmosfery R_{ao} oblicza się więc z zależności:

$$R_{ao} = \varepsilon_o \sigma T_a^4 \quad (2.27)$$

w której:

R_{ao} – natężenie długofalowego promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą przy bezchmurnym niebie, Wm^{-2} ,

ε_o – pozorna emisyjność atmosfery dla warunków bezchmurnego nieba,

σ – stała Stefana–Boltzmann,

T_a – temperatura powietrza, K.

PIERWSZA GRUPA MODELI (emisyjność atmosfery jest funkcją ciśnienia pary wodnej i/lub temperatury powietrza).

W roku 1915 Angström podał zależność [6]:

$$\varepsilon_o = A - B \times 10^{-C e} \quad (2.28)$$

gdzie: e jest ciśnieniem pary wodnej (mb), A , B i C są współczynnikami, których wartości wynoszą: $A = 0,25$, $B = 0,32$, $C = 0,052$.

Brunt wprowadził następującą formułę (1932, [23]):

$$\varepsilon_o = a + b e^{0,5} \quad (2.29)$$

Wartości współczynnika a zmieniają się w zakresie od 0,34 do 0,72, natomiast współczynnika b w zakresie od 0,023 do 0,110 [14] i przykładowo wynoszą:

$a = 0,52$	$b = 0,065$	(Brunt, 1932 [23]),
$a = 0,42$	$b = 0,100$	(Jimenez et al, 1976 [82]),
$a = 0,72$	$b = 0,014$	(Llebot, Jorge, 1984 [108]),
$a = 0,68$	$b = 0,041$	(Wartena, wg Wisse [189]),
$a = 0,53$	$b = 0,067$	(KNMI, wg Wisse [189]).

Można zauważyć, że gdy $e = 0$, pozorna emisyjność nieboskłonu wynosi około 0,5, co oznacza, że powietrze suche promieniuje w przybliżeniu dwa razy mniej energii cieplnej niż ciało doskonale czarne o tej samej temperaturze. Oznacza to, że podczas bezchmurnej nocy suche powietrze atmosferyczne emituje minimalną ilość promieniowania, stanowiąc najslabszą rekompensatę dla wypromieniowania ciepła przez grunt i przegrody budowlane, zwłaszcza przez stropodachy. Jest to tak zwany efekt „zimnego nieba” [24].

Staley i Jurica w 1972 roku zaproponowali formułę [169]:

$$\varepsilon_0 = 0,718 e^{0,0875} \quad (2.30)$$

W 1973 roku Feussner podał wyrażenie [54]:

$$\varepsilon_0 = 1 - 10^{(-0,5 e^{0,2})} \quad (2.31)$$

Idso i Jackson w 1969 roku przedstawili teoretyczną zależność [76]:

$$\varepsilon_0 = 1 - 0,261 \exp(-7,77 \times 10^{-4} t_a^2) \quad (2.32)$$

Powyższe równanie spełnione jest przy założeniu, że efektywna emisyjność atmosfery jest funkcją jedynie temperatury powietrza i osiąga minimalną wartość przy temperaturze 0 °C oraz że zdąża asymptotycznie do jedności.

W 1981 roku Idso [78] zaproponował wyrażenie, w którym emisyjność nieboskłonu jest funkcją temperatury powietrza T_a (K) oraz ciśnienia cząstkowego pary wodnej e (mb):

$$\varepsilon_0 = 0,179 e^{(1/7)} \exp(350/T_a) \quad (2.33)$$

W tym samym roku Idso podał również inną zależność [78]:

$$\varepsilon_0 = 0,70 + 5,95 \times 10^{-5} e \exp(1500/T_a) \quad (2.34)$$

DRUGA GRUPA MODELI (ciśnienie pary wodnej, w wyrażeniach na obliczanie pozornej emisyjności atmosfery, jest funkcją temperatury powietrza lub temperatury punktu rosy).

W tej grupie modeli również powstało wiele empirycznych zależności, których autorami byli, między innymi:

Bliss (1961, [20]):

$$\varepsilon_0 = 0,8004 + 0,00396 t_{dp} \quad (2.35)$$

gdzie t_{dp} jest temperaturą punktu rosy, (°C).

Clark (1981, [33]):

$$\varepsilon_0 = 0,787 + 0,0028 t_{dp} \quad (2.36)$$

W roku 1982 Berdahl i Fromberg wprowadzili zależność [11]:

$$\varepsilon_0 = 0,741 + 0,0062 t_{dp} \quad (2.37)$$

Martin i Berdahl w roku 1984 podali formułę [115]:

$$\varepsilon_0 = 0,711 + 0,56 (t_{dp}/100) + 0,73 (t_{dp}/100)^2 \quad (2.38)$$

Również w roku 1984, Berger zastosował wyrażenie [16]:

$$\varepsilon_0 = 0,770 + 0,038 t_{dp} \quad (2.39)$$

Frank i Punter podali zależność (1986, [56]):

$$\varepsilon_0 = 0,745 + 0,0056 t_{dp} \quad (2.40)$$

Jednym z najczęściej cytowanych autorów jest Swinbank, który w roku 1963 podał zależność [173]

$$R_{ao} = 5,31 \times 10^{-13} T_a^6 \quad (2.41)$$

gdzie T_a jest temperaturą powietrza (K).

W roku 1975 Unsworth i Monteith wprowadzili wyrażenie [184]:

$$R_{ao} = -119 + 1,06 \sigma T_a^4 \quad (2.42)$$

Wzór Cole'a jest następujący (1976, [36]):

$$R_{ao} = 222,0 + 4,94 t_a \quad (2.43)$$

gdzie t_a jest temperatura powietrza, (°C).

I wreszcie Czeplak i Kasten w roku 1987 podali równanie [38]:

$$R_{ao} = 9,9 \times 10^{-6} \sigma T_a^6 \quad (2.44)$$

w którym T_a jest temperaturą powietrza (°C).

Dyskusję wyników obliczeń otrzymanych na podstawie powyższych zależności z wynikami uzyskanymi na podstawie empirycznych formuł obliczeniowych zaproponowanych przez autora niniejszej pracy przedstawiono w rozdziale 5.

Niezależnie od przedstawionych wyżej dwóch grup modeli na obliczanie natężenia promieniowania atmosfery dla bezchmurnego nieba (grupa pierwsza – równania od (2.28) do (2.34) oraz druga – równania od (2.35) do (2.44)), w roku 1982 Centeno [29] wprowadził nieco inne w formie wyrażenie na obliczanie pozornej emisyjności atmosfery. Mianowicie, pozorną emisyjność atmosfery uzależnił od wysokości Z (km) nad poziom morza punktu obserwacyjnego, temperatury otaczającego powietrza T_a (K) oraz od względnej wilgotności powietrza H (%):

$$\varepsilon_0 = [5,7723 + 0,9555(0,6017)^Z] T_a^{1,893} H^{0,0665} \times 10^{-4} \quad (2.45)$$

Równanie (2.45) obowiązuje dla następujących zakresów poszczególnych zmiennych: $(263 < T < 303)$, $(40\% < H < 100\%)$ oraz $(0 < Z < 3 \text{ km})$.

2.3.2. Promieniowanie atmosfery przy niebie zachmurzonym

W modelach empirycznych wpływ zachmurzenia nieba na wartość natężenia promieniowania atmosfery uwzględnia się przez wprowadzenie funkcji stopnia zachmurzenia nieba $f(cc)$ do równań opisujących promieniowanie atmosfery w warunkach bezchmurnego nieba, to znaczy:

$$R_{ac} = R_{ao} f(cc) \quad (2.46)$$

gdzie R_{ac} jest natężeniem długofalowego promieniowania atmosfery, na płaszczyznę poziomą, przy niebie zachmurzonym, (Wm^{-2}), R_{ao} jak wyżej, lecz dla nieba bezchmurnego (Wm^{-2}), natomiast $f(cc)$ jest funkcją stopnia zachmurzenia nieba.

W roku 1975 Unsworth i Monteith wprowadzili zależność [184]:

$$R_{ac} = (1 - 0,84 cc) R_{ao} + 0,84 cc \sigma T_a^4 \quad (2.47)$$

gdzie R_{ao} jest obliczane z zależności (2.42).

Cole wprowadził następującą formułę (1976 [36]):

$$R_{ac} = R_{ao} + (65 + 1,39 t_a) cc \quad (2.48)$$

gdzie R_{ao} jest wyznaczane z zależności (2.43).

Innym wyrażeniem jest wyrażenie zastosowane w tak zwanym Niemieckim Roku Odniesienia (the German Test Reference Year, 1989 [179]):

$$R_{ac} = (1 - cc) 9,36 \times 10^{-6} \sigma T_a^6 + cc \sigma T_{dp}^4 \quad (2.49)$$

gdzie T_a i T_{dp} są temperaturami, odpowiednio, powietrza i punktu rosy (K).

W roku 1984 Martin i Berdahl podali formuły obliczeniowe, w których uwzględnili szczegółowe dane odnośnie zachmurzenia i rodzaju chmur [114]:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_o + (1 - \varepsilon_o) n \varepsilon_c \bar{I} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_o = & 0,711 + 0,56 (t_{dp}/100) + 0,73 (t_{dp}/100)^2 \\ & + 0,013 \cos(\pi t/12) + 0,00012 (p-1000) \end{aligned} \quad (2.51)$$

gdzie ε_0 jest emisyjnością bezchmurnego nieba, n jest współczynnikiem zależnym od rodzaju chmur pokrywających niebo, ε_c jest emisyjnością chmur, Γ jest współczynnikiem zależnym od temperatury podstawy chmur oraz t jest godziną dnia (1, 2, ..., 24).

rodzaj chmur	ε_c	n	Γ	$\varepsilon_c \Gamma$
stratus	1,0	2 km	0,78	0,78
średnie	0,7	5 km	0,54	0,38
cirrus	0,4	8 km	0,38	0,15

Również Czeplak i Kasten w swoim wyrażeniu wprowadzili szczegółowe dane związane z rodzajem chmur (1987, [38]) i podzielili chmury na trzy grupy w zależności od wysokości podstawy chmur:

chmury wysokie (n_H) :	Ci	Cc	Cs		
chmury średnie (n_M) :	Ac	As			
chmury niskie (n_L) :	Sc	St	Ns	Cu	Cb

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0 (1 + a_L n_L^{2,5} + a_M (1 - n_L) n_M^{2,5} + a_H (1 - n_L)(1 - n_M) n_H^{2,5}) \quad (2.52)$$

n_H, n_M, n_L : współczynniki obliczane jak niżej:

$$\begin{aligned} a_L &= -0,007268 T + 2,282 \\ a_M &= -0,007355 T + 2,238 \\ a_H &= -0,008089 T + 2,343 \end{aligned}$$

W roku 1983 Holtslag i Ulden podali zależność [75]:

$$R_{uc} = 5,43 \times 10^{-13} T_a^6 + 61,3 N \quad (2.53)$$

gdzie N jest stopniem zachmurzenia w skali od 0 do 1,0.

Porównanie wyników obliczeń uzyskanych na podstawie powyższych zależności z wynikami otrzymanymi na podstawie wzorów obliczeniowych zaproponowanych przez autora niniejszej pracy dla nieba całkowicie zachmurzonego przedstawiono w dyskusji w rozdziale 5.

W roku 1982 Centeno [29] wprowadził wzór na obliczanie ekwiwalentnej emisyjności zachmurzonego nieba, uzależniając ją od wysokości Z (km) nad poziom morza rozpatrywanego miejsca (punktu pomiarowego), temperatury powietrza T_a (K), wilgotności względnej powietrza H (%) oraz od przejrzystości powietrza N :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + N(A - \varepsilon_0) \quad (2.54)$$

gdzie ε_0 jest ekwiwalentną emisyjnością bezchmurnego nieboskłonu (wyrażenie (2.45)), N jest przezroczystością powietrza ($0 < N < 1$), natomiast A jest współczynnikiem poprawkowym, obliczanym ze wzoru:

$$A = [1 - (D/T_a)]^4 \quad (2.55)$$

w którym:

$$D = (3000 + 1751(Z)^{0,652})/H^{3/2} \quad (2.56)$$

Występująca w równaniu (2.54) wielkość $N(A - \varepsilon_0)$ wyraża wzrost pozornej emisyjności nieboskłonu zachmurzonego w stosunku do nieba bezchmurnego. Wielkość N określamy wizualnie, według danych zawartych w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Wizualne określanie przezroczystości N atmosfery [29]
Table 2.1. Visual determination of the transmittivity N of the atmosphere [29]

N	Obserwacja gwiazd i księżyca
0,000	Bezchmurny nieboskłon
0,075	Księżyc bez widocznej korony
0,115	Mgielka lub smog
0,135	Świecąca mgła
0,157	Księżyc z widoczną koroną, Cirrostratus
0,196	Mgła lub gruby smog
0,240	Cienki mist
0,267	Mist
0,350	Księżyc pokryty cienką warstwą mgły
0,393	Księżyc pokryty warstwą mgły
0,468	Zwarta warstwa mgły
0,517	Księżyc pokryty grubą warstwą mgły
0,597	Niewidoczne gwiazdy
0,625	Zachmurzony księżyc
0,686	Bardzo zachmurzony księżyc
0,770	Niewidoczny księżyc
0,847	Warstwa chmur
1,000	Całkowite zachmurzenie

Biorąc pod uwagę wyrażenia (2.45) oraz (2.51) ÷ (2.56) uzyskujemy:

$$\varepsilon = (1 - N)[5,7723 + 0,9555(0,6017)^Z] \times 10^{-4} T_a^{1,1893} H^{0,0665} + N[1 - (3000 + 1751 Z^{0,652}) H^{-3/2} T_a^{-1}]^4 \quad (2.57)$$

Dla bezchmurnego nieba ($N = 0$) wyrażenie to redukuje się do równania (2.45), dla nieba całkowicie zachmurzonego ($N = 1$) natomiast przekształca się w równanie (2.54).

W roku 1981 Clark [33] wprowadził współczynnik korekcyjny zachmurzenia C_a , zdefiniowany jako stosunek zmierzonego promieniowania nieboskłonu przy niebie zachmurzonym do obliczonej wartości promieniowania nieboskłonu dla warunków bezchmurnego nieba. Na podstawie pomiarów wykonanych przy różnego rodzaju zachmurzeniach określił postać wyrażenia na obliczanie współczynnika C_a :

$$C_a = 1 + 0,0224n - 0,0035n^2 + 0,00028n^3 \quad (2.58)$$

Wówczas natężenie promieniowania długofalowego zachmurzonego nieboskłonu oblicza się ze wzoru:

$$R_{ac} = C_a R_{a0} \quad (2.59)$$

w którym R_{a0} jest promieniowaniem bezchmurnego nieba. Można zauważyć, że dla całkowicie zachmurzonego nieba ($n = 10$) wartość współczynnika korekcyjnego C_a wynosi 1,154, co oznacza, że dla warunków meteorologicznych panujących w miejscu pomiaru, dla którego wyznaczono wartość tego współczynnika, zachmurzenie powodowało zwiększenie zwrotnego długofalowego promieniowania atmosfery niewiele ponad 15% w porównaniu do promieniowania nieba bezchmurnego. Pozornie jest to niewiele, jednak wartość ta ma znaczący wpływ na wielkość promieniowania różnicowego między powierzchnią rozważanego radiatora (np. powierzchnia Ziemi, zewnętrzna powierzchnia stropodachu lub powierzchnia kolektora słonecznego) a promieniowaniem cieplnym atmosfery. Nawet niewielkie zmniejszenie docierającego strumienia promieniowania atmosferycznego, występujące przy bezchmurnym niebie i spowodowane radiacyjnymi właściwościami „okna atmosferycznego”, znacznie zwiększa wartość natężenia długofalowego promieniowania różnicowego (rozdz. 3.4.1).

2.4. Empiryczne modele cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną

Empiryczne modele promieniowania atmosfery przedstawione w rozdziałach 2.3.1 i 2.3.2 obowiązują jedynie dla płaszczyzny poziomej, to znaczy dla powierzchni gruntu lub dla stropodachu o niewielkim kącie nachylenia. Ograniczenie to eliminuje z zastosowania płaszczyzny nachylone pod pewnym kątem, na przykład ściany budynków, strome dachy i kolektory słoneczne. Ponadto, znaczna część tych modeli obowiązuje jedynie dla warunków całkowicie bezchmurnego nieba.

W zakresie promieniowania długofalowego na płaszczyznę poziomą oddziałuje jedynie promieniowanie nieboskłonu. Gdy kąt pochylenia tej płaszczyzny wzrasta, jej powierzchnia zewnętrzna „widzi” coraz to mniejszą część nieboskłonu i jednocześnie coraz to większą część gruntu i obiekty otaczające, ich łączne oddziaływanie zaś,

w postaci promieniowania termicznego sumuje się, by dla kąta 90° (płaszczyzna pionowa) osiągnąć maksymalną wartość [36], [122]. Dlatego w analizie bilansu promieniowania przegród budynku zlokalizowanego w zabudowie miejskiej należy uwzględnić współczynniki konfiguracji, które nie występują w przypadku analizy płaszczyzny poziomej, nie zasłoniętej przez inne obiekty bądź przeszkody naturalne, mogące zakłócić radiacyjną wymianę ciepła z otoczeniem. Mianowicie, ilość docierającego do danej płaszczyzny promieniowania długofalowego jest funkcją, między innymi, współczynnika konfiguracji rozważanej płaszczyzny w układzie płaszczyzna–nieboskłon (wartość tego współczynnika maleje wraz ze wzrostem kąta pochylenia oraz przy obecności naturalnych przeszkód wokół) a także współczynnika konfiguracji w układzie nieboskłon–płaszczyzna. W konsekwencji, docierające do pochylonej powierzchni promieniowanie długofalowe jest sumą promieniowania nieboskłonu, gruntu i obiektów otaczających. Udział poszczególnych składowych promieniowania zależy od emisyjności rozważanych powierzchni, ich temperatury, współczynników konfiguracji, optycznych właściwości powietrza oraz efektów wielokrotnego odbicia promieniowania od obiektów otaczających.

Modelowanie natężenia promieniowania długofalowego docierającego do przegród budynku jest wbrew oczekiwaniom bardziej skomplikowane niż modelowanie promieniowania krótkofalowego. W obu wypadkach należy uwzględnić właściwości radiacyjne powierzchni przegród, ich współczynniki konfiguracji oraz anizotropię nieboskłonu. Jednakże, w analizie radiacyjnej wymiany ciepła w zakresie promieniowania długofalowego powinno uwzględnić się również wartości temperatury rozpatrywanych powierzchni oraz pochłanianie tego promieniowania przez gazy zawarte w powietrzu. Szczególne znaczenie ma także właściwe określenie wartości tak zwanej „temperatury otoczenia”, której znajomość jest niezbędna w analizie wielu zagadnień z zakresu fizyki budowli oraz fizyki miasta [106, 145]. W analizie zagadnień z tego zakresu może pojawić się szereg problemów. I tak na przykład, Siegel i Howell w roku 1981 wykazali [167], że zmierzona emisyjność powierzchni przegród budowlanych może znacznie się różnić od wartości podawanych w zestawieniach tabelarycznych, nawet do 0,60, co spowodowane jest przede wszystkim starzeniem się materiałów. Ponadto, badania oraz różnego typu modelowania odnoszące się do obszarów zurbanizowanych są w swej naturze raczej teoretyczne i nie potwierdzone stosownymi pomiarami. Z drugiej zaś strony, wprowadzenie założeń upraszczających może doprowadzić do zbyt dużych błędów w wynikach końcowych. Todhunter i Terjung [181] wykazali, że modele uwzględniające różny stopień komplikacji w geometrii radiacyjnej wymiany ciepła mogą się różnić w określaniu wartości różnicowego promieniowania długofalowego budynku z najbliższym otoczeniem nawet do 75 W m^{-2} , tzn. do wartości promieniowania różnicowego jakie może wystąpić dla płaszczyzny poziomej (np. stropodachu lub gruntu) w warunkach bezchmurnego nieba w nocy.

W literaturze tematu można napotkać jedynie nieliczne modele długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, umożliwiające obliczanie natężenia tego

promieniowania, docierającego do powierzchni nachylonych pod pewnym kątem do poziomu. Jednym z tych modeli jest model opracowany w 1981 roku przez Clark'a [33], w którym natężenie promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną pod kątem α względem poziomu oblicza się jako sumę promieniowania atmosfery, promieniowania gruntu oraz promieniowania atmosfery odbitego od gruntu:

$$R(\alpha) = F(\alpha) \times R_a(0) + f_g(\alpha)[\varepsilon_g \sigma T_g^4 + r_g R_a(0)] \quad (2.60)$$

gdzie $F(\alpha)$ jest współczynnikiem pochylenia, $R_a(0)$ jest promieniowaniem atmosfery na płaszczyznę poziomą, ε_g , r_g i T_g są odpowiednio współczynnikami emisyjności i refleksyjności oraz temperaturą gruntu, natomiast f_g jest współczynnikiem konfiguracji dla gruntu. Współczynnik ten oblicza się ze wzoru:

$$f_g(\alpha) = 1 - f_a(\alpha) \quad (2.61)$$

w którym $f_a(\alpha)$ jest współczynnikiem konfiguracji dla niebosłonu:

$$f_a(\alpha) = (1 + \cos\alpha)/2 \quad (2.62)$$

Dla całkowicie zachmurzonego nieba współczynnik pochylenia jest równy współczynnikowi konfiguracji $F(\alpha) = f_a(\alpha)$. Dla nieba bezchmurnego natomiast współczynnik pochylenia może być wyrażony wielomianem:

$$F(\alpha) = 1,000 + 0,02725\alpha - 0,25421\alpha^2 + 0,03372\alpha^3 \quad (2.63)$$

w którym kąt α wyrażony jest w radianach. Zasadniczą trudnością w zastosowaniu powyższych wyrażeń jest właściwe przyjęcie rzeczywistych danych dla gruntu, a mianowicie określenie jego emisyjności (ε_g), refleksyjności (r_g) i temperatury (T_g). Z pewnym uproszczeniem można przyjąć, że $\varepsilon_g \approx 0,9$ oraz że $r_g \approx 0,1$. Można też przyjąć założenie, że grunt emituje promieniowanie cieplne jak ciało doskonale czarne o temperaturze otaczającego powietrza. Takie założenie może spowodować błędy w obliczeniach w wysokości $\pm 15\%$ w stosunku do wartości zmierzonych [33].

Najczęściej cytowanym modelem umożliwiającym obliczanie natężenia promieniowania cieplnego, docierającego do pochylonej płaszczyzny, jest jednak model empiryczny zaproponowany przez Cole'a [36]. W modelu tym natężenie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego oblicza się w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego, stopnia zachmurzenia nieba, kąta pochylenia płaszczyzny oraz emisyjności i temperatury otaczającego gruntu. Na podstawie pomiarów, głównie radiometrycznych, wykonanych przez autora niniejszej pracy w różnych porach roku model Cole'a został numerycznie zmodyfikowany i adaptowany do warunków meteorologicznych występujących we Wrocławiu i najbliższej okolicy. Szczegółowy opis badań, wyniki pomiarów, wykaz wygenerowanych wyrażeń empirycznych oraz ostateczną postać modelu przedstawiono w rozdziale 4.

3. CHŁODZENIE RADIACYJNE POWIERZCHNI CZYNNEJ

3.1. Pasywne chłodzenie budynków – istota chłodzenia radiacyjnego

Powstały z początkiem lat siedemdziesiątych tzw. kryzys energetyczny w krajach rozwiniętych wymusił zupełnie inne spojrzenie na zagadnienia energetyczne w skali globalnej. Przede wszystkim ugruntowało się przeświadczenie, że naturalne główne zasoby energetyczne naszego globu, w postaci ropy naftowej i węgla, są ograniczone. Ponadto, krytyczna sytuacja paliwowo-energetyczna spowodowała konieczność skutecznego poszukiwania możliwości oszczędzania i racjonalnego wykorzystywania energii we wszystkich sektorach gospodarki, w tym również w budownictwie. Badania naukowe w tym zakresie, zapoczątkowane w wielu ośrodkach naukowych w krajach zachodnich, ukierunkowano również na wykorzystanie alternatywnych naturalnych źródeł energii, takich jak energia promieniowania słonecznego, energia wiatru, energia geotermalna, biomasy itp. Zatem, zaczęto traktować najbliższe otoczenie budynku nie tylko jako przestrzeń, do której traci się energię, lecz także jako źródło jej pozyskiwania. Z drugiej zaś strony, przeciwnym trendem w badaniach naukowych różnych ośrodków zagranicznych, ale również związanym z oszczędnym i racjonalnym gospodarowaniem energii w budownictwie, było rozpoznanie istniejących możliwości i skuteczności wykorzystania naturalnych niskotemperaturowych źródeł energii do tzw. pasywnego chłodzenia budynków lub ich elementów, do którego zalicza się także wspomniane już wcześniej chłodzenie radiacyjne.

W związku z powyższym, w wielu krajach o klimacie gorącym, w krajach z upalnymi okresami letnimi, jak również w krajach o klimacie umiarkowanym, w ostatnich latach ponownie wzrosło zainteresowanie możliwością zastosowania pasywnego chłodzenia budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej. W krajach rozwiniętych było to uwarunkowane przede wszystkim potrzebą racjonalnej oszczędności energii w budynkach oraz potrzebą zredukowania zużycia energii elektrycznej w urządzeniach klimatyzacyjnych. Z kolei w krajach rozwijających się, w których instalacje klimatyzacyjne stosowane są w stosunkowo małej skali, zainteresowanie pasywnym chłodzeniem budynków wynikało raczej z przyczyn poznawczych.

Główna idea pasywnego chłodzenia budynku sprowadza się do obniżenia temperatury powietrza w budynku przez wykorzystanie naturalnych możliwości chłodzenia, do których zalicza się [60]:

- 1) powietrze zewnętrzne – stwarza możliwość chłodzenia wentylacyjnego („convective cooling”),
- 2) parę wodną zawartą w powietrzu – umożliwia zastosowanie chłodzenia ewaporacyjnego („evaporative cooling”),

3) górne warstwy atmosfery – determinują możliwość chłodzenia radiacyjnego („radiative cooling”),

4) grunt – umożliwia chłodzenie pośrednie bądź bezpośrednie („earth coupling”).

W praktyce najczęściej stosuje się łącznie dwie z wyszczególnionych możliwości, np. chłodzenie wentylacyjne z ewaporacyjnym. Możliwość zastosowania któregoś z wymienionych sposobów chłodzenia uwarunkowany jest przede wszystkim rodzajem budynku i rozwiązaniami architektonicznymi oraz położeniem geograficznym (warunkami klimatycznymi).

Pasywne chłodzenie budynków jest przeciwieństwem pasywnego ogrzewania budynków za pomocą energii promieniowania słonecznego. Zarówno jeden jak i drugi sposób kształtowania bilansu cieplnego budynku, w zależności od warunków klimatycznych lokalizacji, powinien zapewnić warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach, przy jednoczesnym racjonalnym wykorzystaniu energii cieplnej w budynku w skali roku. Historia pasywnego chłodzenia budynków w krajach o gorącym klimacie sięga kilkunastu wieków wstecz. Już wtedy budynki wznoszono w taki sposób, aby dzięki naturalnym możliwościom chłodzenia, opisanym wyżej, w sposób kontrolowany wychładzać pomieszczenia w nocy. Z tego okresu pochodzi również, między innymi, metoda produkcji lodu na pustyni polegająca na wykorzystaniu efektu chłodzenia radiacyjnego, opisana przez Bahadori (w pracy [116]). Obecnie w krajach o klimacie gorącym w domach mieszkalnych i użyteczności publicznej stosuje się urządzenia klimatyzacyjne, ale także korzysta się z doświadczeń przodków i wielowiekowych tradycji w zakresie radiacyjnego chłodzenia budynków. Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę naturalnych sposobów chłodzenia budynku:

Chłodzenie wentylacyjne – koncepcja nocnego chłodzenia wentylacyjnego, polegająca na tym, aby w ciągu nocy wychłodzić budynek chłodnym powietrzem zewnętrznym, „zmagazynować” chłód, a następnie wykorzystać go do chłodzenia budynku w ciągu dnia. W ten sposób w ciągu dnia można uzyskać obniżenie temperatury powietrza w budynku o około 15% w stosunku do temperatury powietrza w budynku nieschładzanego nocą [60].

Chłodzenie ewaporacyjne – wykorzystuje się zjawisko pobierania energii przez odparowującą wodę. Znane są dwa podstawowe sposoby chłodzenia ewaporacyjnego. Pierwszy z nich to chłodzenie bezpośrednie, które polega na bezpośrednim wprowadzaniu schłodzonego powietrza do budynku (ten sposób powoduje wzrost zawartości wilgoci w powietrzu). Sposób drugi to chłodzenie pośrednie – polega on na ewaporacyjnym chłodzeniu przegrody budynku, która z kolei obniża ilość ciepła przenikającego do wnętrza budynku. Przykładem zastosowania może być zalanie kilkunastocentymetrową warstwą wody stropodachu pełnego, którego temperatura od strony pomieszczenia obniża się, co z kolei powoduje obniżanie się temperatury powietrza w pomieszczeniu. Takim sposobem można obniżyć temperaturę powierzchni stropu od strony pomieszczenia o 3 °C, natomiast temperaturę powietrza w pomieszczeniu o 2 °C [60, 168].

Chłodzenie gruntem – źródłem chłodzenia budynku może być również grunt pod i wokół budynku, a czasami również nad częścią lub nad całym budynkiem. Możliwe jest także wprowadzenie w grunt zespołu rur do wymuszonego przepływu powietrza pochodzącego z budynku; po schłodzeniu w gruncie powietrze ponownie jest wprowadzane do budynku. Rozwiązaniem alternatywnym do chłodzących i tłumiących przepływ ciepła właściwości gruntu jest zastosowanie masywnych przegród budowlanych (ściany, stropy) o dużej bezwładności cieplnej.

Chłodzenie radiacyjne – zjawisko to zostało częściowo omówione w rozdziale 2.1.1. Polega ono na obniżeniu się temperatury danego ciała poniżej wartości temperatury otaczającego powietrza w wyniku intensywnego wypromieniowania ciepła do chłodniejszego nieboskłonu (atmosfery). Kluczem do chłodzenia radiacyjnego jest poznanie istoty spektralnego charakteru promieniowania długofalowego atmosfery. Chłodzenie radiacyjne dotyczy przede wszystkim płaszczyzn poziomych (stropodachy, grunt) i występuje w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, ponieważ wówczas do płaszczyzny poziomej dociera najmniejsza wartość natężenia promieniowania długofalowego atmosfery, stanowiąc najslabszą rekompensatę dla wypromieniowania ciepła przez tę płaszczyznę. W wyniku znacznych radiacyjnych strat ciepła temperatura zewnętrznej powierzchni danego radiatora (stropodach, grunt) może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza – w przypadku stropodachów to obniżenie może wynosić $4\div 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24, 92, 124] a nawet $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ [109].

Na chłodzenie radiacyjne narażone są również przegrody budowlane budynków zlokalizowanych w klimacie umiarkowanym. Dotyczy to zwłaszcza stropodachów o niewielkim kącie pochylenia, których temperatura powierzchni zewnętrznej w wyniku wypromieniowania ciepła do bezchmurnego nieboskłonu może osiągnąć temperaturę niższą od temperatury otaczającego powietrza. Jak już sygnalizowano w rozdziale 1, radiacyjne straty ciepła z budynku mogą stanowić ok. 20% całkowitych strat ciepła. Pominięcie lub uproszczone potraktowanie radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem może natomiast spowodować niedoszacowanie zużycia energii cieplnej do około 26% w sezonie grzewczym [179].

Intensywność chłodzenia radiacyjnego danego radiatora może być kształtowana stosowaniem powierzchni o odpowiednich własnościach radiacyjnych w odniesieniu do promieniowania długofalowego, tzw. powierzchni spektralnie selektywnych (rozdz. 3.6.2). W przypadku stropodachów pokrytych materiałami powszechnie stosowanymi w budownictwie, z uwagi na własności radiacyjne ich powierzchni zewnętrznej (powierzchnia „szara”), zjawisko chłodzenia radiacyjnego może występować jedynie w nocy. Jeżeli jednak zewnętrzna powierzchnia stropodachu zostanie wykonana z materiału o współczynniku refleksyjności dla promieniowania słonecznego powyżej 0,95 oraz współczynniku emisyjności (dla promieniowania długofalowego) równym co najmniej 0,90, to chłodzenie radiacyjne może wystąpić również w ciągu dnia [12].

Zjawisko chłodzenia radiacyjnego może być wykorzystane do sezonowego chłodzenia pomieszczeń w budynkach w lecie w sposób pośredni. System chłodzący powinien mianowicie ochładzać wodę zmagazynowaną w zbiornikach podziemnych w miesiącach od kwietnia do czerwca, a następnie schłodzona woda może być zastosowana do chłodzenia pomieszczeń w okresie lata. Przy odpowiednim dobraniu objętości wody w stosunku do kubatury pomieszczeń chłodzonych, taki system może działać przez dwa miesiące bez wspomagania innymi systemami mechanicznymi bądź elektrycznymi [164].

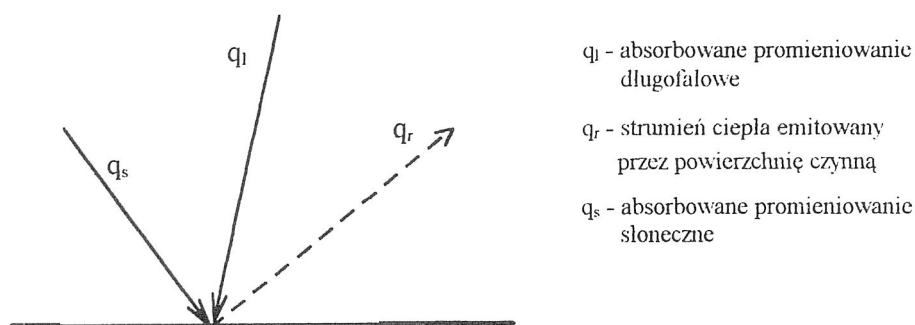
Ocena możliwości zastosowania chłodzenia radiacyjnego do wychładzania pomieszczeń w okresie lata w budynkach zlokalizowanych w klimacie umiarkowanym, w tym również w Polsce, wymaga szczegółowego poznania oraz dogłębnej analizy danych meteorologicznych dla danej lokalizacji. Możliwe jest bowiem wykorzystanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego również w regionach o stosunkowo wysokiej wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza zewnętrznego [59]. Pełna analiza powinna również uwzględniać aspekty ekonomiczne oraz ekologiczne.

W dotychczas wykonywanych obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli, w naszym kraju, obliczenia przeprowadza się przy założeniach znacznie upraszczających wpływ radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania długofalowego na bilans cieplny przegród budowlanych, zwłaszcza stropodachów. W obliczeniach tych, między innymi, nie uwzględnia się możliwości wystąpienia zjawiska chłodzenia radiacyjnego stropodachów. W konsekwencji prowadzi to do pewnych błędów obliczeniowych, polegających na niedoszacowaniu ilości ciepła traconego przez przegrodę. Proponowaną metodę przeprowadzania obliczeń bilansu cieplnego przegród budowlanych z uwzględnieniem rzeczywistego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, dla warunków ustalonego oraz nieustalonego przenikania ciepła, przedstawiono w rozdziałach, odpowiednio, 6.1 i 6.2.

3.2. Powierzchnie spektralnie selektywne

Przedstawiony w rozdziale 2.1.1 rysunek 2.1 ilustruje radiacyjne właściwości środowiska zewnętrznego, co pozwala wyjaśnić zarówno istotę radiacyjnego oddziaływania środowiska na budynki w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, jak i wyjaśnić zasadę kształtowania tzw. spektralnie selektywnych radiacyjnych właściwości zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych przezroczystych i pełnych.

W radiacyjnej wymianie ciepła powierzchni czynnej, którą może stanowić na przykład zewnętrzna powierzchnia przegrody budowlanej lub gruntu, biorą udział: bezpośrednie i rozproszone promieniowanie krótkofalowe (słoneczne), długofalowe promieniowanie nieboskłonu oraz promieniowanie cieplne odbite i emitowane przez powierzchnię czynną (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Główne strumienie radiacyjne wpływające na procesy cieplne na powierzchni czynnej
 Fig. 3.1. Main radiative fluxes determining thermal processes on an operative surface

Dla nieprzezroczystej powierzchni czynnej wartość współczynnika absorpcyjności oraz refleksyjności dla promieniowania długofalowego, w przypadku ogólnym, jest funkcją długości fali promieniowania, temperatury powierzchni oraz kąta emisji promieniowania, co można wyrazić równaniem [165, 190] :

$$a_l(\lambda, z, \Phi, T) + \rho_l(\lambda, z, \Phi, T) = 1 \quad (3.1)$$

w którym a_l , ρ_l i T są odpowiednio absorpcyjnością i refleksyjnością powierzchni dla promieniowania długofalowego oraz temperaturą powierzchni radiatora; natomiast λ , z i Φ oznaczają długość fali promieniowania, kąt zenitalny oraz kąt azymutu dla docierającego promieniowania. Można przyjąć, że dla stosunkowo wąskiego zakresu zmienności temperatury powierzchni radiatora, w tym przegród budowlanych, jaka występuje w okresie zimy i lata, wartości współczynników a_l oraz ρ_l nie zależą od temperatury powierzchni [167]. Ponieważ promieniowanie długofalowe atmosfery dochodzi z całej półsfery, można również założyć, że wartości współczynników a_l i ρ_l nie zależą od kątów z oraz Φ . Ponadto, z uwagi stosunkowo dużą chropowatość powierzchni przegród budowlanych (z wyjątkiem szyb) w odniesieniu do długości fal docierającego promieniowania długofalowego, można je uznać za reflektory dyfuzyjne. Równanie (3.1) można zatem zapisać:

$$a_l + \rho_l = 1 \quad (3.2)$$

Zgodnie z prawem Kirchhoffa, dla ciał szarych przy tej samej temperaturze, wartość półsferycznego współczynnika absorpcyjności dla promieniowania cieplnego jest równy półsferycznemu współczynnikowi emisyjności:

$$\varepsilon = a_l \quad (3.3)$$

oraz

$$\varepsilon = 1 - \rho_L \quad (3.4)$$

Dla nieprzezroczystej powierzchni czynnej, w odniesieniu do promieniowania krótkofalowego, podobnie jak do promieniowania długofalowego, można zapisać następującą zależność między absorpcyjnością i refleksyjnością powierzchni:

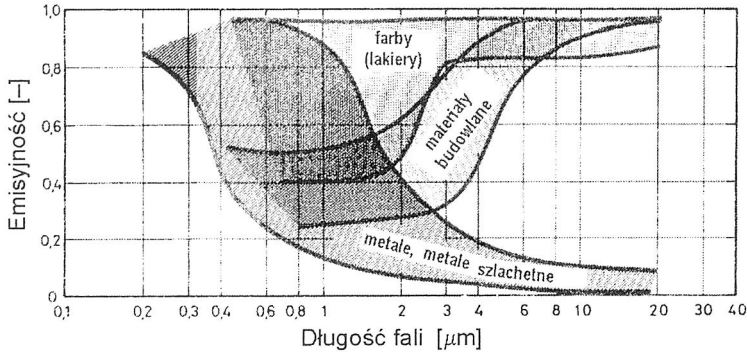
$$a_s(\lambda, z, \Phi, T) + \rho_s(\lambda, z, \Phi, T) = 1 \quad (3.5)$$

Ponieważ zewnętrzne powierzchnie nieprzezroczystych przegród budowlanych można uznać za chropowate dla promieniowania słonecznego (podobnie jak dla ciepłego), wartości współczynników a_s oraz ρ_s są niezależne od kąta padania promieniowania. Można również założyć, podobnie jak w przypadku charakterystyk radiacyjnych powierzchni dla promieniowania długofalowego, że są one niezależne od zmian temperatury powierzchni [167]. Zależność współczynnika refleksyjności powierzchni w funkcji długości fali promieniowania słonecznego może mieć natomiast znaczenie dla różnych materiałów. Jeżeli jednak refleksyjność rozważanej powierzchni mierzona jest w warunkach naturalnych (nie w laboratorium), z uwzględnieniem konfiguracji otaczających budynków, to można założyć, że uzyskana wartość refleksyjności aproksymuje spektralny rozkład dochodzącego promieniowania słonecznego [167]. Zatem:

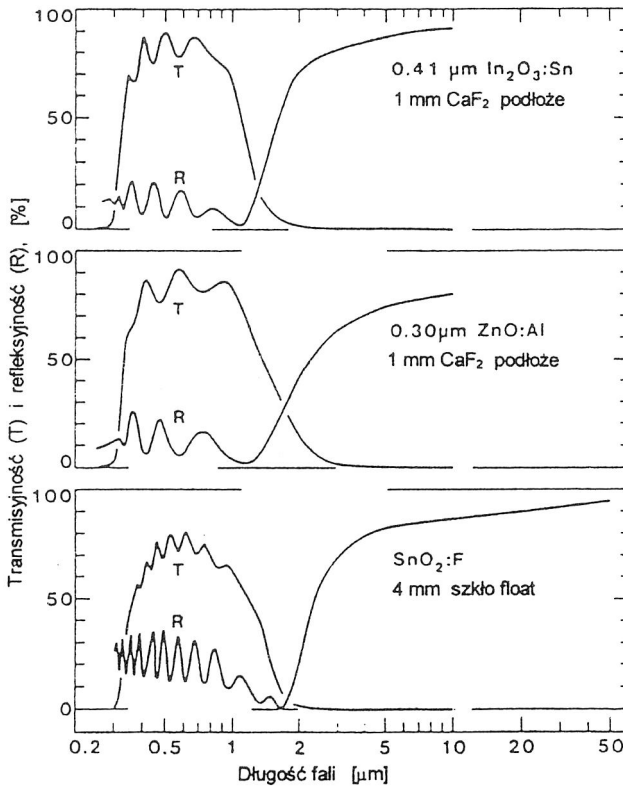
$$a_s + \rho_s = 1 \quad (3.6)$$

Z powyższych uwag wynika, że dla rozważanej powierzchni czynnej najistotniejszymi własnościami radiacyjnymi są: półsferyczny współczynnik absorpcji a_s dla promieniowania słonecznego oraz półsferyczny współczynnik emisyjności ε , z uwagi na emisję i absorpcję promieniowania długofalowego docierającego z całej półsfery. Wielkości te w dalszej części pracy będą nazwane: współczynnik absorpcji a_s dla promieniowania krótkofalowego i współczynnik emisyjności ε . Współczynniki te odnoszą się do różnych zakresów promieniowania i decydują o tak zwanych spektralnie selektywnych własnościach radiacyjnych danej powierzchni. Sposób przeprowadzania badań wartości współczynników a_s oraz ε dla wybranych materiałów budowlanych przedstawiono, między innymi w pracach [57, 67, 68, 86, 161].

Wartość współczynnika a_s jest funkcją długości fali promieniowania słonecznego, wartość współczynnika emisyjności ε natomiast zmienia się wraz ze zmianą długości fali w zakresie widma promieniowania ciepłego. Współczynniki a_s oraz ε są charakterystyczne dla danej grupy materiałów, a charakterystyki radiacyjne powierzchni są różne dla różnych grup materiałowych (rys. 3.2). Powierzchnie spektralnie selektywne, stosowane jako zewnętrzne warstwy przegród budowlanych, umożliwiają kształtowanie bilansu promieniowania tych przegród i w konsekwencji bilansu ciepłego przegród oraz całego budynku.



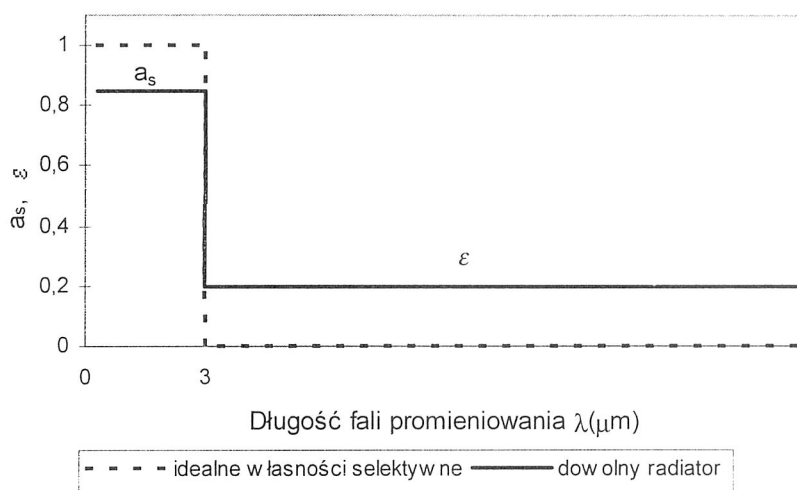
Rys. 3.2. Wartości współczynników absorpcyjności a_s dla promieniowania krótkofalowego oraz współczynniki emisyjności ε dla promieniowania długofalowego dla różnych grup materiałów [57]
 Fig. 3.2. Absorptivity coefficients a_s for the shortwave radiation and emissivity coefficients ε for longwave radiation for various materials' groups [57]



Rys. 3.3. Przykładowe właściwości radiacyjne powierzchni szyby pokrytej warstwami spektralnie selektywnymi [63]
 Fig. 3.3. Exemplary radiative properties of a glass covered with spectral-selective materials [63]

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykładowe rzeczywiste charakterystyki radiacyjne dla szyby pokrytej warstwą tlenków metali.

W analizach obliczeniowych przyjmuje się najczęściej stałą wartość współczynnika a_s w całym zakresie długości fal promieniowania słonecznego oraz stałą wartość współczynnika ε w zakresie promieniowania długofalowego [44]. Wynika to z dużych trudności w uwzględnianiu zmian wartości tych współczynników w funkcji długości fali w odpowiadających im zakresach widma promieniowania. Dowolną powierzchnię, dla której przyjęto stałe wartości współczynników a_s oraz ε nazywa się również „półszarą” [44], ponieważ można ją rozpatrywać jako szarą w zakresie widma promieniowania słonecznego i jako szarą w zakresie widma promieniowania długofalowego, co pokazano na rys. 3.4. Natomiast na rys. 3.5 pokazano przykładowe charakterystyki radiacyjne przyjmowane do analiz numerycznych.

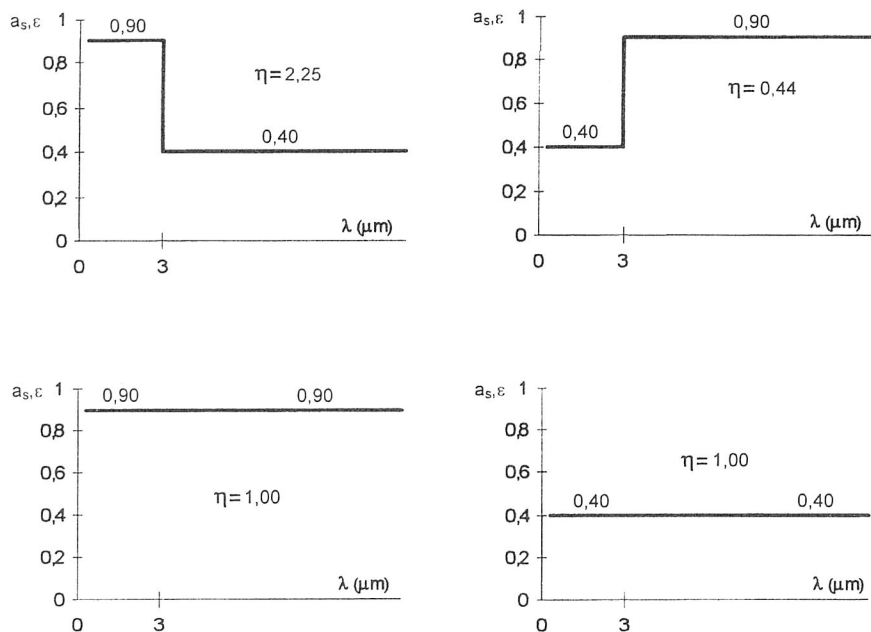


Rys. 3.4. Spektralnie selektywne właściwości radiacyjne powierzchni idealnej oraz rzeczywistej
Fig. 3.4. Spectral selective properties of an ideal surface and of a real one

Miarą spektralnie selektywnych właściwości radiacyjnych danej powierzchni jest współczynnik selektywności opisany równaniem [44]:

$$\eta = a_s / \varepsilon \quad (3.7)$$

Im większa jest wartość współczynnika selektywności η dla danej powierzchni, tym większa jest jej zdolność do absorpcji promieniowania słonecznego oraz tym mniejsza zdolność do pochłaniania i emitowania promieniowania długofalowego. Gdy natomiast wartość współczynnika η maleje, wzrasta wielkość pochłanianego i emitowanego promieniowania długofalowego oraz maleje ilość promieniowania słonecznego pochłanianego przez tę powierzchnię.



Rys. 3.5. Przykładowe radiacyjne właściwości zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, przyjmowane do obliczeń bilansu cieplnego w odniesieniu do promieniowania krótko- i długofalowego (współczynnik selektywności η oblicza się z równania (3.7))

Fig. 3.5. Exemplary radiative properties of the outer surface of the building envelopes used to the heat balance calculation, in the range of the short- and longwave radiation (selectivity coefficient η is calculated from Eq. (3.7))

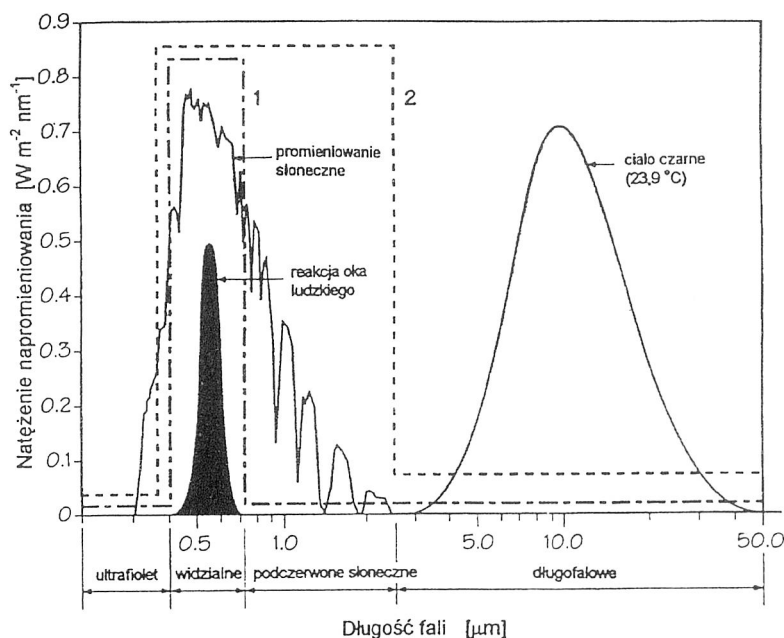
Od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych krajowych i zagranicznych prowadzone są prace teoretyczne i eksperymentalne nad wykorzystaniem powierzchni spektralnie selektywnych, w tym również do kształtowania bilansu cieplnego budynków w skali roku. Poniżej przedstawiono ogólny opis bieżącego trendu w zastosowaniach powierzchni o specjalnych właściwościach radiacyjnych, a mianowicie:

- 1) powierzchnie przezroczyste będące lustrem dla części podczerwonej promieniowania słonecznego,
- 2) powierzchnie o selektywnej absorpcji promieniowania słonecznego,
- 3) powierzchnie spektralnie selektywne dla promieniowania cieplnego.

Powierzchnie przezroczyste będące lustrem dla części podczerwonej promieniowania słonecznego

Powierzchnie przezroczyste dla części widzialnej promieniowania słonecznego oraz stanowiące lustro dla promieniowania podczerwonego promieniowania słonecznego są stosowane do pokrywania szyb okiennych. W zależności od potrzeb w zakresie efektywnego i racjonalnego wykorzystania energii cieplnej w budynku, po-

wierzchnie szyb powinny być pokryte materiałem o wysokim współczynniku przepuszczalności promieniowania słonecznego, przy długości fali $\lambda < \lambda_{pr}$ i jednocześnie o wysokim współczynniku refleksyjności dla $\lambda > \lambda_{pr}$, gdzie λ_{pr} jest pewną progową długością fali. I tak, jeżeli okno ma za zadanie maksymalnie pozyskiwać energię słoneczną, to $\lambda_{pr} = 3 \mu\text{m}$, co na rys. 3.6 odpowiada charakterystyce radiacyjnej nr 2. Taki rodzaj szyb okiennych jest zalecany do stosowania w klimacie umiarkowanym i zimnym. Jeżeli natomiast okno ma zminimalizować zyski ciepła od promieniowania słonecznego, to $\lambda_{pr} = 0,7 \mu\text{m}$, co oznacza, że promieniowanie podczerwone promieniowania słonecznego jest niemal całkowicie odbijane od powierzchni szyby, a to na rys. 3.6 odpowiada charakterystyce radiacyjnej nr 1. Taki rodzaj szyb jest zalecany do stosowania w klimacie gorącym. Długość fali $0,7 \mu\text{m}$ jest granicą zakresu promieniowania widzialnego (zakres czułości oka ludzkiego mieści się w przedziale $0,4 \div 0,7 \mu\text{m}$, rys. 2.1), co w praktyce oznacza, że zastosowanie szyb o właściwościach radiacyjnych jak wyżej, umożliwi przebywanie ludzi w pomieszczeniach bez konieczności używania sztucznego oświetlenia. Można również zauważyć (rys. 3.6), że obie rozważane szyby charakteryzują się bardzo niskim współczynnikiem emisyjności (wysokim współczynnikiem odbicia) i odbijają przeważającą część promieniowania cieplnego z powrotem do pomieszczenia, znacznie ograniczając jego straty ciepła.



Rys. 3.6. Idealna spektralna przepuszczalność szyby w różnych warunkach klimatycznych [25]
(opis charakterystyk spektralnych nr 1 i 2 w tekście)

Fig. 3.6. Ideal spectral transmittance of a glazing in various climates [25]
(description of the spectral characteristic No. 1 and 2 in the text)

Powierzchnie o selektywnej absorpcji promieniowania słonecznego

Powierzchnie z maksymalną wartością współczynnika absorpcji promieniowania słonecznego dla $\lambda < 3,0 \mu\text{m}$ oraz z minimalną możliwością emisji promieniowania długofalowego własnego dla $\lambda > 3,0 \mu\text{m}$ (rys. 3.4, charakterystyka powierzchni o idealnych własnościach selektywnych) są wykorzystywane do pozyskiwania i konwersji promieniowania słonecznego. W literaturze tematu, w zakresie zagadnień związanych z konwersją energii promieniowania słonecznego, można spotkać wiele różnych określeń dotyczących rodzajów i klasyfikacji konwersji. W zasadzie można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje konwersji:

- 1) konwersję fototermiczną – przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na ciepło (kolektory słoneczne),
- 2) konwersję fotowoltaiczną (lub fotoelektryczną) – przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną,
- 3) konwersję fotochemiczną (w tym fotobiochemiczną, a zwłaszcza fotosyntezę) – przetwarzanie energii promieniowania słonecznego na energię związaną z procesami chemicznymi.

W ostatnich kilkunastu latach, w literaturze anglojęzycznej pojawiło się bardzo wiele artykułów naukowych w zakresie wymienionych zagadnień – szacuje się, że w połowie lat osiemdziesiątych ukazywało się na ten temat średnio około stu artykułów rocznie [51]. Zdecydowana większość z nich dotyczyła zagadnień związanych z pozyskiwaniem energii słonecznej, a tylko niewielka część nawiązywała do problemu zabezpieczania się przed nadmiernym oddziaływaniem promieniowania słonecznego.

Gdy zachodzi potrzeba ochrony przed niekorzystnym wpływem promieniowania słonecznego (dotyczy to np. zabezpieczenia zewnętrznej powierzchni stropodachu przed nadmiernym wzrostem temperatury) rozważana powierzchnia powinna charakteryzować się minimalną wartością współczynnika absorpcji promieniowania słonecznego dla $\lambda < 3,0 \mu\text{m}$ oraz maksymalną wartością współczynnika emisyjności dla $\lambda > 3,0 \mu\text{m}$.

Powierzchnie spektralnie selektywne dla promieniowania cieplnego

Powierzchnie te są wykorzystywane, między innymi, do radiacyjnego chłodzenia budynków lub jego elementów. Zasady kształtowania niezbędnych cech radiacyjnych oraz możliwości wykorzystania powierzchni spektralnie selektywnych dla promieniowania cieplnego zostały przedstawione w rozdziale 3.6.2.

Powierzchnie spektralnie selektywne pokrywające przegrody przezroczyste (w tym szyby okienne) są obecnie stosowane w budownictwie na szeroką skalę; aktualnie jest możliwe uzyskanie niemalże dowolnej charakterystyki radiacyjnej warstw spektralnie selektywnych dla szyb okiennych i szklanych fasad elewacyjnych. W przypadku przegród nieprzezroczystych (ściany, stropodachy) zasadniczym problemem są jednak trudności w pokrywaniu znacznych powierzchni przegród oraz zapewnienie trwałości cech optycznych w czasie. Ze względu na przeciwstawne wymagania co do radiacyjnych cech zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych,

pełnych i przezroczystych, w okresie letnim i zimowym (ochrona przed nasłonecznieniem w lecie oraz pozyskiwanie energii promieniowania słonecznego w zimie) dobór właściwości spektralnie selektywnych dla danej powierzchni powinien być przedmiotem optymalizacji wielokryterialnej (polioptymalizacji). Przy formułowaniu i rozwiązywaniu zagadnienia optymalizacji muszą być przyjęte kryteria optymalizacji, tj. funkcje celu oraz określone zmienne decyzyjne i ograniczenia nałożone na zmienne decyzyjne [1, 80, 81, 111–113, 148]. Niezależnie od doboru optymalnych charakterystyk spektralnie selektywnych, należy zapewnić trwałość i stabilność charakterystyk radiacyjnych w czasie, w warunkach eksploatacji przegród.

3.3. Temperatura promieniowania nieboskłonu

3.3.1. Kalorymetryczna temperatura nieboskłonu

W obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli, np. przy obliczaniu bilansu promieniowania zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych (lub gruntu) często wygodniej jest, zamiast natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, stosować wielkość zwaną średnią temperaturą promieniowania nieboskłonu T_r lub krótko „temperaturą nieba” [11, 61, 128], przy czym poprawnie należałoby ją określić jako „kalorymetryczna temperatura nieba”. Jest ona definiowana jako temperatura hipotetycznego ciała doskonale czarnego, które promieniowałoby w kierunku płaszczyzny poziomej w całym zakresie widma promieniowania taki sam strumień ciepła jaki wypromieniowuje atmosfera przy panujących warunkach meteorologicznych. Wartość temperatury promieniowania nieboskłonu ściśle zatem koresponduje z wartością natężenia promieniowania długofalowego atmosfery. Wartość temperatury nieboskłonu zależy głównie od stopnia zachmurzenia nieba oraz od temperatury i wilgotności względnej powietrza. Jej wartość zmienia się również, podobnie jak wartość natężenia promieniowania długofalowego atmosfery, wraz ze zmianą kąta zenitalnego; najmniejszą wartość przyjmuje w zenicie, największą natomiast nad horyzontem, gdzie praktycznie równa jest temperaturze otaczającego powietrza. W praktyce oznacza to, że temperatura nieboskłonu jest najniższa dla płaszczyzny poziomej, np. dla stropodachu i gruntu, dla których radiacyjne straty ciepła są największe (występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego), najwyższa zaś dla płaszczyzny pionowej.

Z definicji wynika, że średnia temperatura promieniowania nieboskłonu T_r opisana jest wyrażeniem:

$$R_a = \sigma T_r^4 \quad (3.8)$$

w którym R_a jest promieniowaniem atmosfery (dla bezchmurnego nieba jest to R_{a0} , dla nieba zachmurzonego R_{ac}). Natężenie promieniowania cieplnego atmosfery dla całego zakresu widma promieniowania może być również wyrażone równaniem (patrz także równanie (2.27)):

$$R_a = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (3.9)$$

w którym ε_a jest emisyjnością nieboskłonu (dla nieba bezchmurnego ε_0), T_a natomiast jest temperaturą powietrza [K]. Powyższy zapis oznacza, że nieboskłon zachowuje się jak ciało szare o emisyjności ε_a i temperaturze T_a . Strumienie promieniowania długofalowego atmosfery opisane równaniami (3.8) i (3.9) są równoważne, dlatego zależność między emisyjnością nieboskłonu ε_a i temperaturą nieba T_r jest następująca:

$$T_r = \varepsilon_a^{0,25} T_a \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_a = (T_r / T_a)^4 \quad (3.11)$$

Koncepcja temperatury promieniowania nieboskłonu w swych założeniach nie uwzględnia spektralnego charakteru promieniowania atmosfery, traktując atmosferę jak ciało doskonale czarne. Z drugiej jednak strony, temperatura nieboskłonu jest wygodną i intuicyjną miarą natężenia promieniowania długofalowego atmosfery i może być z powodzeniem stosowana w analizie radiacyjnej wymiany ciepła dowolnej poziomej powierzchni o stałym współczynniku emisyjności w całym zakresie widma promieniowania cieplnego. W analizie bilansu cieplnego radiatorów selektywnie emitujących promieniowanie cieplne (rozdział 3.6.2) należy uwzględnić zależność zmiany wartości współczynnika emisyjności atmosfery w funkcji długości fali promieniowania ($\varepsilon_a(\lambda)$).

W warunkach bezchmurnego nieba w zimie (i również w lecie na obszarach pustynnych) temperatura promieniowania nieboskłonu może być niższa od temperatury powietrza o około 20÷25 °C [13, 61, 128]. W tych warunkach, radiacyjne straty ciepła z zewnętrznej powierzchni stropodachu (i z gruntu) są największe i w konsekwencji temperatura tej powierzchni może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza nawet o 11 °C [109].

3.3.2. Spektralna temperatura nieboskłonu

Analiza niektórych zagadnień z zakresu fizyki budowli wymaga niekiedy zastosowania zamiast „kalorymetrycznej temperatury nieba” T_r , obowiązującej dla całego zakresu promieniowania cieplnego, tak zwanej „spektralnej temperatury nieba” T_r^* ,

obowiązującej dla wybranego zakresu długości fal promieniowania, od λ_1 do λ_2 . Spektralna temperatura nieboskłonu T_r^* jest definiowana jako temperatura hipotetycznego ciała doskonale czarnego, które promieniowałoby w kierunku płaszczyzny poziomej taką samą ilość energii jaka w warunkach rzeczywistych dociera do rozważanej płaszczyzny, w zakresie długości fal promieniowania od λ_1 do λ_2 , co można zapisać:

$$R_{\lambda_1-\lambda_2} = C (T_r^*)^n \quad (3.12)$$

gdzie $R_{\lambda_1-\lambda_2}$ jest natężeniem promieniowania cieplnego atmosfery w zakresie długości fal od λ_1 do λ_2 , (Wm^{-2}), C jest współczynnikiem proporcjonalności.

Z definicji wynika, że spektralna temperatura nieboskłonu T_r^* jest znacznie niższa od kalorymetrycznej temperatury nieboskłonu T_r (tabela 3.1).

Przykładem zastosowania spektralnej temperatury nieba T_r^* może być analiza obliczeniowa bilansu cieplnego i efektów ilościowych zastosowania radiatorów selektywnych dla zakresu promieniowania cieplnego (rozdz. 3.6.2). Innym przykładem może być interpretacja obrazów termalnych uzyskanych kamerą termowizyjną, pracującą w zakresie długości fal od $\lambda_1 = 8 \mu\text{m}$ do $\lambda_2 = 14 \mu\text{m}$ (zakres „okna atmosferycznego”), przy pomiarze rozkładu temperatury na zewnętrznych powierzchniach stropodachów o niewielkim kącie pochylenia. Promieniowanie cieplne zewnętrznej powierzchni stropodachu ($B_{\lambda_1-\lambda_2}$) jest sumą emitowanego promieniowania własnego oraz promieniowania cieplnego atmosfery odbitego od powierzchni stropodachu, co wyraża równanie [61]:

$$B_{\lambda_1-\lambda_2} = \varepsilon C T_s^n + \rho_r C (T_r^*)^n \quad (3.13)$$

gdzie ρ_r jest współczynnikiem refleksyjności, ε współczynnikiem emisyjności, T_s temperaturą zewnętrzną powierzchni stropodachu. Zakładając, że zewnętrzna powierzchnia stropodachu jest szara i nieprzezroczysta można zapisać:

$$\rho_r = 1 - \varepsilon \quad (3.14)$$

Równanie (3.13) można zatem wyrazić następująco:

$$B_{\lambda_1-\lambda_2} = C \left[\varepsilon T_s^n + (1 - \varepsilon) (T_r^*)^n \right] \quad (3.15)$$

Źródłem odniesienia w pomiarach termowizyjnych najczęściej jest ciało czarne umieszczane w polu widzenia kamery, dla którego zachodzi związek:

$$B_{cz,\lambda_1-\lambda_2} = C T_{cz,s}^n \quad (3.16)$$

lub

$$T_{cz,s} = (B_{cz,\lambda_1-\lambda_2} / C)^{1/n} \quad (3.17)$$

Analiza omawianego zagadnienia wymaga wprowadzenia pojęcia tzw. pozornej temperatury promieniowania $T_{s,app}$ rozpatrywanej powierzchni. Definiuje się ją jako temperaturę hipotetycznego ciała doskonale czarnego, przy której ilość energii ciepłej wypromieniowanej przez to ciało jest równe sumie energii wypromieniowanej przez analizowaną powierzchnię oraz odbitego od tej powierzchni promieniowania ciepłego atmosfery. Równanie ogólne na obliczanie pozornej temperatury promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu jest następujące [61]:

$$T_{s,app} = (B_{\lambda_1-\lambda_2} / C)^{1/n} \quad (3.18)$$

Po podstawieniu równania (3.15) otrzymujemy:

$$T_{s,app}^n = \varepsilon T_s^n + (1 - \varepsilon)(T_r^*)^n \quad (3.19)$$

w którym T_r^* jest spektralną temperaturą niebosłonu, natomiast T_s temperaturą zewnętrzną powierzchni stropodachu. Występujący w równaniach (3.12)÷(3.19) wykładnik potęgi n przyjmuje wartości [61]:

dla	$0 < \lambda < \infty$	$n = 4$
	$8 \mu\text{m} < \lambda < 14 \mu\text{m}$	$n = 5$
	$8 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$	$n = 5,4$
	$3 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$	$n = 11,2$

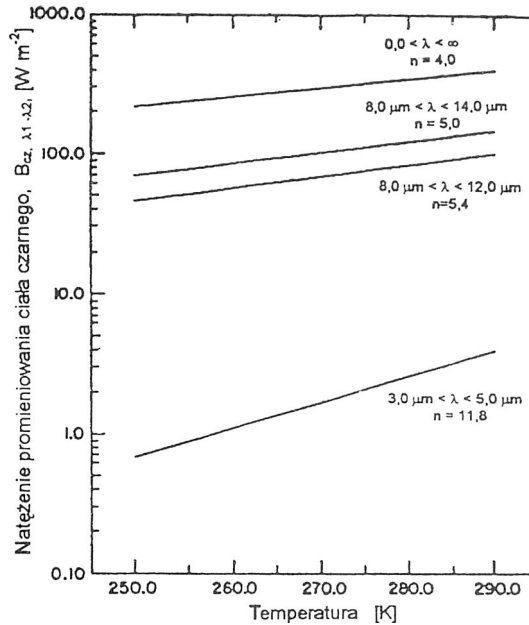
Na rysunku 3.7 przedstawiono zmienność wartości natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego w funkcji temperatury dla różnych zakresów długości fal promieniowania.

Dla zakresu pomiarowego urządzenia termowizyjnego (zakres widmowy $8\div 14 \mu\text{m}$) równanie (3.19) będzie miało postać:

$$T_{s,app}^5 = \varepsilon T_s^5 + (1 - \varepsilon)(T_r^*)^5 \quad (3.20)$$

Wprowadźmy oznaczenie:

$$\beta = (T_r^*) / T_s \quad (3.21)$$



Rys. 3.7. Natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego dla różnych zakresów długości fal promieniowania [61]

Fig. 3.7. Black-body emissive power for various radiation wavelengths [61]

Pozorna temperatura promieniowania rozpatrywanej powierzchni wyniesie wówczas:

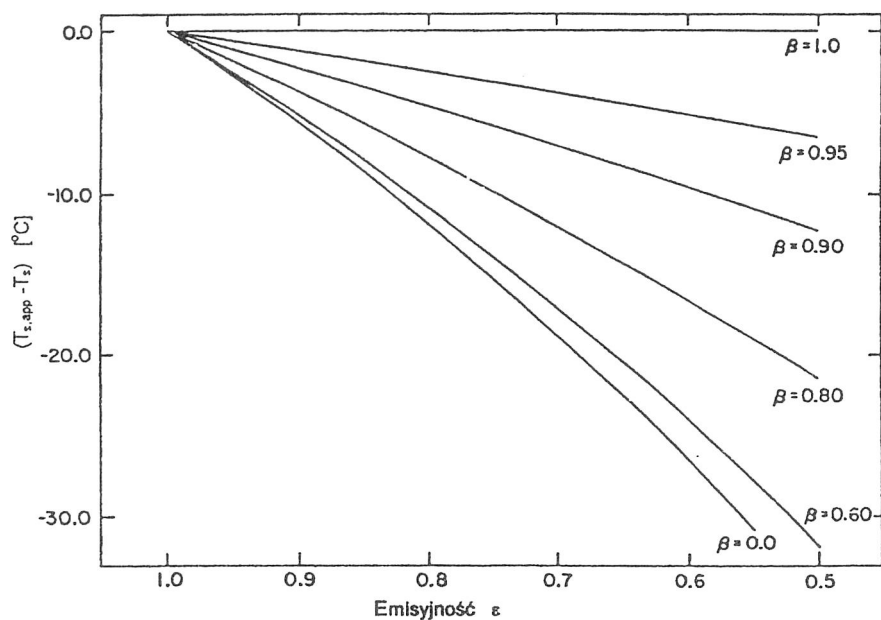
$$T_{s,app} = T_s \times [\varepsilon + (1 - \varepsilon) \times \beta^5]^{1/5} \quad (3.22)$$

Można zauważyć, że gdyby spektralna temperatura nieba była ekstremalnie niska, co mogłoby nastąpić jedynie w przypadku całkowicie przepuszczalnej atmosfery (idealne okno atmosferyczne), współczynnik β osiągnąłby wartość zero i wówczas:

$$T_{s,app} = T_s \times [\varepsilon]^{1/5} \quad (3.23)$$

Na rysunku 3.8 przedstawiono zmienność różnicy temperatury ($T_{s,app} - T_s$) w funkcji współczynnika emisyjności dla zewnętrznej powierzchni stropodachu, dla różnych wartości współczynnika β .

Z równania (3.22) wynika, że ustalenie wartości pozornej temperatury promieniowania zewnętrznej powierzchni przegrody wymaga uwzględnienia spektralnej temperatury nieboskłonu. Spektralna temperatura nieba jest niższa niż kalorymetryczna temperatura nieba, ponieważ atmosfera w zakresie długości fal „okna atmosferycznego” jest niemal całkowicie przepuszczalna dla promieniowania cieplnego. Porównanie przykładowych wartości obu temperatur przedstawiono w tabeli 3.1.



Rys. 3.8. Wpływ spektralnej temperatury promieniowania nieboskłonu i współczynnika emisyjności powierzchni na pozorną temperaturę promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu dla $n = 5$ ($8\mu\text{m} < \lambda < 14\mu\text{m}$) [61]

Fig. 3.8. Effect of spectral sky temperature and surface emissivity on an apparent outer surface temperature of a flat roof for $n = 5$ ($8\mu\text{m} < \lambda < 14\mu\text{m}$) [61]

Tabela 3.1. Przykładowe wartości spektralnej i kalorymetrycznej temperatury promieniowania nieboskłonu [24]

Table 3.1. Exemplary values of spectral and calorimetric sky temperature [24]

Temperatura powietrza	Temperatura promieniowania nieboskłonu	
	kalorymetryczna (T_r)	spektralna (T_r^*)
°C	°C	°C
-18,0	-48,0	-85,0
-12,0	-40,0	-74,0
-6,7	-33,0	-64,0
1,1	-25,0	-54,0
4,4	-18,0	-47,0

W dalszej części rozważań będzie wykorzystywana jedynie kalorymetryczna temperatura nieba (dla całego zakresu widma promieniowania cieplnego), zwana dalej temperaturą nieba lub nieboskłonu.

3.3.3. Wskaźnik temperatury promieniowania nieboskłonu

Promieniowanie długofalowe atmosfery, zarówno w Polsce jak i w innych krajach, nie jest standardowo mierzone w stacjach meteorologicznych. Praktycznie jedyną możliwością uzyskania danych w zakresie geograficznego rozkładu oraz sezonowej zmienności tej wielkości jest zatem wykonanie stosownych obliczeń według modelu obliczeniowego adekwatnego dla danej lokalizacji. Takie podejście, między innymi, było podstawą realizacji celów niniejszej pracy. Sformułowany dla danej lokalizacji model obliczeniowy promieniowania długofalowego atmosfery umożliwia obliczenie natężenia tego promieniowania na podstawie standardowo mierzonych wielkości takich, jak temperatura powietrza, temperatura punktu rosy i stopień zachmurzenia nieba.

Niezależnie od możliwości obliczeniowych modelu, w analizie radiacyjnej wymiany ciepła danego radiatora z otoczeniem oraz w innych zastosowaniach praktycznych, często wygodnie jest wprowadzić pojęcie tzw. wskaźnika temperatury promieniowania nieba. Wskaźnik ten jest miarą efektywności chłodzenia radiacyjnego dla danej lokalizacji i jest definiowany jako różnica między temperaturą powietrza, mierzoną na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu i temperaturą nieboskłonu, co można wyrazić wzorem:

$$\Delta T_r = T_a - T_r \quad (3.24)$$

Korzystając ze wzoru (3.10) powyższe równanie można zapisać:

$$\Delta T_r = (1 - \varepsilon_a^{0,25}) T_a \quad (3.25)$$

gdzie T_a i T_r są odpowiednio, temperaturą powietrza (K) i temperaturą nieboskłonu (K), ε_a jest współczynnikiem emisyjności atmosfery.

Na podstawie wyników modelu obliczeniowego promieniowania długofalowego atmosfery oraz bieżących i archiwalnych standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych, możliwe jest opracowanie map geograficznego rozkładu i sezonowej zmienności wskaźnika temperatury promieniowania nieba dla analizowanej lokalizacji. Przykładowo, wartość tego wskaźnika dla Wrocławia, w różnych sezonach w warunkach bezchmurnego nieba, na podstawie danych pomiarowych wynosiła od 7,8 °C do 28,1 °C (rozdz. 4.2.1). Dla porównania, dla wybranych miast w USA wskaźnik ten wynosi w granicach od 5 °C do 25 °C [11].

3.4. Bilans promieniowania długofalowego

3.4.1. Promieniowanie różnicowe

Określanie wartości natężenia długofalowego promieniowania różnicowego między powierzchniami przegród budowlanych dla różnej konfiguracji budynków i otą-

czającym je środowiskiem zewnętrznym jest od lat interesującym i nie do końca rozwiązany problem absorbującym uwagę inżynierów i architektów, zwłaszcza w krajach zachodnich. Wieloletnie doświadczenia różnych jednostek naukowo-badawczych tych krajów, w formułowaniu klasycznych zagadnień z zakresu modelowania obciążenia ogrzewania bądź chłodzenia budynków, pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że różnicowe promieniowanie cieplne między obudową budynków a ich najbliższym otoczeniem może znacząco wpływać na wielkość strat i zysków ciepła, zwłaszcza przez stropodachy (i dachy). W konsekwencji, składowa długofalowego promieniowania różnicowego może stanowić znaczny udział w całkowitym bilansie cieplnym zewnętrznej powierzchni przegród. Powierzchnie zewnętrzne poziomych przegród budowlanych (stropodachów), nieosłoniętych innymi wyższymi budynkami lub obiektami naturalnymi, mogącami zakłócić radiacyjną wymianę ciepła z otoczeniem, wymieniają ciepło przez promieniowanie jedynie z nieboskłonem. Przegrody nachylone natomiast oraz ściany budynków wymieniają ciepło przez promieniowanie z nieboskłonem, gruntem oraz z najbliższym otoczeniem budynku.

Różnicowe promieniowanie cieplne (R_{net}) rozpatrywanej poziomej powierzchni czynnej (stropodach, grunt) jest różnicą między promieniowaniem cieplnym emitowanym przez tę powierzchnię i docierającym promieniowaniem długofalowym atmosfery, które jest częściowo pochłaniane a częściowo odbite od tej powierzchni:

$$R_{\text{net}} = (\varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) R_a) - \varepsilon_s R_a \quad (3.26)$$

gdzie ε_s jest emisyjnością powierzchni czynnej, R_a jest natężeniem promieniowania atmosfery (dla nieba bezchmurnego R_{ao} , dla nieba zachmurzonego R_{ac}), T_s jest temperaturą (K) powierzchni czynnej.

Drugi wyraz w nawiasie równania (3.26), tzn. promieniowanie odbite, dla większości powierzchni stanowi wartość pomijalnie małą. Równanie (3.26) może więc być zapisane w postaci:

$$R_{\text{net}} = \varepsilon_s (\sigma T_s^4 - R_a) \quad (3.27)$$

Dla poziomego ciała szarego (np. stropodach lub grunt) o nieselektywnych właściwościach radiacyjnych powierzchni różnicowe straty ciepła przez promieniowanie długofalowe można również zapisać:

$$R_{\text{net}} = \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_r^4) \quad (3.28)$$

Długofalowe promieniowanie różnicowe R_{net} rozpatrywanej powierzchni czynnej jest miarą chłodzenia radiacyjnego tej powierzchni (tzw. moc chłodzenia radiacyjnego).

Równoważnym do równań (3.27) i (3.28) jest wyrażenie:

$$R_{\text{net}} = h_r (T_s - T_r) \quad (3.29)$$

w którym h_r jest współczynnikiem przejmowania ciepła przez promieniowanie, wyrażonym w ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$). Współczynnik h_r można zatem obliczyć ze wzoru:

$$h_r = \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_r^4) / (T_s - T_r) \quad (3.30)$$

który może być również przedstawiony w postaci:

$$h_r = \varepsilon_s \sigma (T_s^2 + T_r^2) (T_s + T_r) \quad (3.31)$$

Niekiedy stosowane jest również wyrażenie:

$$h_r = 4\varepsilon_s \sigma T_m^3 \quad (3.32)$$

w którym T_m jest średnią arytmetyczną z temperatury T_s i T_r .

Badania wykazały, że różnicowe straty ciepła przez promieniowanie dla gruntu w zimie, w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, mogą wynosić od 75 do 125 Wm^{-2} , ze średnią wartością 100 Wm^{-2} [145, 184]. Dla poziomego lub o niewielkim pochyleniu stropodachu, z typową powierzchnią zewnętrzną, straty te mogą wynosić do około 70 Wm^{-2} [58, 61, 124].

Różnicowe straty ciepła przez promieniowanie długofalowe rozważanej powierzchni czynnej maleją wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia nieba i wilgotności względnej otaczającego powietrza.

3.4.2. Wskaźnik temperatury powierzchni czynnej

Analogicznie do wskaźnika temperatury promieniowania niebosłonu, wskaźnik temperatury powierzchni czynnej można zdefiniować jako różnicę między temperaturą powietrza T_a i temperaturą powierzchni czynnej T_s :

$$\Delta T_s = T_a - T_s \quad (3.33)$$

Wskaźnik temperatury powierzchni czynnej, na przykład zewnętrznej powierzchni stropodachu, jest miarą chłodzenia radiacyjnego tej powierzchni. Informuje on o ile stopni temperatura powierzchni obniżyła się w stosunku do temperatury otaczającego powietrza w wyniku intensywnego wypromieniowania energii cieplnej do chłodniejszego otoczenia. Jak sygnalizowano wcześniej, w przypadku stropodachów, wskaźnik temperatury stropodachu może wynosić $4 \div 7 \text{ }^\circ\text{C}$, a nawet $11 \text{ }^\circ\text{C}$.

Równanie (3.29) może być przedstawione równoważnym wzorem:

$$R_{\text{net}} = h_r (\Delta T_r - \Delta T_s) \quad (3.34)$$

w którym ΔT_r jest wskaźnikiem temperatury promieniowania nieba, ΔT_s wskaźnikiem temperatury radiatora (powierzchni czynnej).

3.5. Bilans cieplny powierzchni czynnej

Analizując zjawisko chłodzenia radiacyjnego należy pamiętać, że radiacyjne straty ciepła zewnętrznej powierzchni danego radiatora zależą nie tylko od wielkości długofalowego promieniowania różnicowego między promieniowaniem własnym a docierającym promieniowaniem cieplnym atmosfery (promieniowanie netto), ale również od konwekcyjnej wymiany ciepła danej powierzchni z otaczającym powietrzem.

Ogólne równanie bilansu cieplnego powierzchni czynnej można przedstawić w postaci:

$$Q_{\text{net}} = R_{\text{net}} \pm K \quad (3.35)$$

gdzie Q_{net} jest różnicowym chłodzeniem powierzchni, R_{net} jest promieniowaniem różnicowym, K konwekcyjną wymianą ciepła radiatora z otaczającym powietrzem (wszystkie wielkości w (Wm^{-2})).

Konwekcyjna wymiana ciepła może osłabiać bądź wzmacniać efekt chłodzenia radiacyjnego. Gdy temperatura zewnętrznej powierzchni radiatora jest wyższa od temperatury powietrza, występująca konwekcyjna wymiana ciepła wspomaga wychładzanie powierzchni – konwekcja powoduje straty ciepła do otoczenia, natomiast gdy temperatura zewnętrznej powierzchni radiatora osiągnie wartość niższą od temperatury otaczającego powietrza, konwekcyjna wymiana ciepła stanowi zyski ciepła dla radiatora i przeciwdziała chłodzeniu radiacyjnemu. Radiacyjna wymiana ciepła zewnętrznej powierzchni radiatora z otoczeniem zależy zatem nie tylko od czynników bezpośrednio determinujących tę wymianę, tzn. od temperatury powietrza, od temperatury powierzchni radiatora, od stopnia zachmurzenia nieba i zawartości wilgoci w powietrzu, ale również od współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję, który jest funkcją głównie prędkości wiatru. Im niższa jest prędkość wiatru w trakcie występowania zjawiska chłodzenia radiacyjnego, tym większa pozostaje różnica między temperaturą radiatora a temperaturą powietrza.

W trakcie występowania zjawiska chłodzenia radiacyjnego, przy ustabilizowanych warunkach wymiany ciepła (stała prędkość wiatru, bezchmurne niebo) radiacyjne straty ciepła radiatora są równoważone zyskami ciepła przez konwekcję. Radiator osiąga wówczas najniższą temperaturę jaką można uzyskać w danych warunkach

wymiany ciepła, co występuje, gdy wynikowe chłodzenie powierzchni (równanie (3.35)) spełnia warunek $Q_{\text{net}} = 0$. Równanie bilansu cieplnego można wtedy zapisać:

$$R_{\text{net}} = K = h_c (T_a - T_{rs}) \quad (3.36)$$

R_{net} – promieniowanie różnicowe (W m^{-2}),

h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$),

T_a – temperatura powietrza (K),

T_{rs} – ustabilizowana temperatura radiatora (K).

Ustabilizowaną temperaturę radiatora można zatem obliczyć ze wzoru:

$$T_{rs} = T_a - R_{\text{net}} / h_c \quad (3.37)$$

Drugi wyraz prawej strony równania (3.37) określa wartość temperatury o jaką obniży się temperatura zewnętrznej powierzchni radiatora w stosunku do temperatury otaczającego powietrza. Do wykonania obliczeń niezbędne są dane dotyczące wartości temperatury powietrza, temperatury punktu rosy, stopnia zachmurzenia nieba i prędkości wiatru.

Miarą chłodzenia radiacyjnego rozważanej powierzchni (danego radiatora) jest natężenie długofalowego promieniowania różnicowego R_{net} tej powierzchni oraz wskaźnik temperatury powierzchni ΔT_s (równanie (3.33)). Obliczoną zależność zachodzącą między promieniowaniem różnicowym i wskaźnikiem temperatury zewnętrznej powierzchni radiatora w postaci ciała doskonale czarnego oraz spektralnie selektywnego przedstawiono w rozdziale 3.6.2 na rys. 3.14.

3.6. Metody wspomagania efektu chłodzenia radiacyjnego

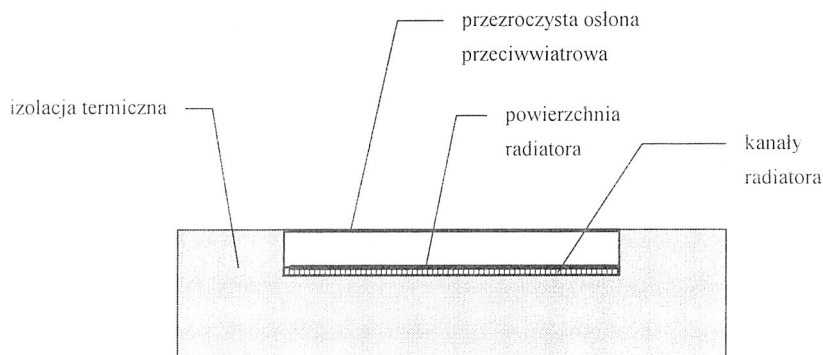
W celu zwiększenia efektywności chłodzenia radiacyjnego poprzez wzrost wskaźnika temperatury radiatora, tzn. poprzez wzrost różnicy pomiędzy temperaturą powietrza i temperaturą radiatora, najczęściej stosuje się oddzielnie lub łącznie dwie następujące metody:

- 1) w celu ograniczenia konwekcyjnych zysków ciepła stosuje się osłony przeciwwiatrowe, przezroczyste dla promieniowania cieplnego, umieszczane kilka centymetrów nad powierzchnią radiatora,
- 2) na zewnętrzne powierzchnie radiatora stosuje się tzw. powierzchnie selektywne, które emitują maksymalną ilość energii w zakresie długości fal „okna atmosferycznego” ($8\div 13 \mu\text{m}$), natomiast poza tym zakresem nie emitują prawie żadnego promieniowania (współczynnik emisyjności jest bliski zeru).

3.6.1. Redukowanie konwekcyjnej wymiany ciepła

W celu uzyskania maksymalnego efektu chłodzenia radiacyjnego należy ograniczyć konwekcyjne zyski ciepła zewnętrznej powierzchni radiatora. Można to uzyskać przez zastosowanie osłony przeciwwiatrowej, przezroczystej dla promieniowania długofalowego, w odległości kilku centymetrów od radiatora, na przykład w postaci folii polietylenowej. Ideę tego rozwiązania przedstawiono na rys. 3.9.

Od wielu lat prowadzone są liczne badania eksperymentalne dotyczące efektywności chłodzenia radiacyjnego radiatorów poziomych zaizolowanych termicznie od spodu i po bokach, z folią polietylenową o odpowiednich właściwościach radiacyjnych (rys. 3.9). Niektóre z tych badań dotyczyły folii pokrytej barwnikami lub warstwą refleksyjną albo absorbcyjną dla promieniowania słonecznego [12]. Badano również radiatory pokryte warstwą materiału o selektywnych właściwościach radiacyjnych a wyniki odnoszono do radiatorów z materiałami nieselektywnymi [64, 71, 72, 74, 105, 121]. Ponadto, niektóre z prac traktowały o doborze optymalnych właściwości radiacyjnych zarówno radiatora jak i osłaniającej folii przezroczystej [116].



Rys. 3.9. Schemat radiatora z przezroczystą dla promieniowania ciepłego osłoną przeciwwiatrową
Fig. 3.9. Scheme of a radiator with infrared transparent wind screen

Jako osłonę transparentną dla promieniowania długofalowego można zastosować folię polietylenową grubości ok. 50 μm . Folia osłania powierzchnię radiatora przed działaniem wiatru, redukując konwekcyjne zyski ciepła oraz stwarza bardziej stabilne warunki wymiany ciepła między radiatorem a otoczeniem. Ponieważ folia nie jest idealnie przezroczysta, ogranicza również emitowane na zewnątrz promieniowanie ciepłe radiatora, zmniejszając jego radiacyjne straty ciepła. Jednakże wypadkowy efekt, wynikający z redukcji konwekcyjnych zysków ciepła powoduje, że temperatura zewnętrznej powierzchni radiatora obniża się bardziej w porównaniu z radiatorem nieosłoniętym folią, a zatem większy jest efekt chłodzenia radiacyjnego.

Głównym problemem przy stosowaniu folii polietylenowej jest zmienność jej własności radiacyjnych w czasie, zwłaszcza współczynnika przepuszczalności dla promieniowania ciepłego. Ponadto, niewielka zmiana grubości folii w stosunku do grubości przewidywanej powoduje znaczne obniżenie wartości tego współczynnika.

Alternatywnym materiałem dla folii polietylenowej jest szyba o odpowiednich własnościach radiacyjnych dla promieniowania długofalowego. W najprostszym przypadku, gdy współczynnik przepuszczalności szyby τ_{sz} i jej współczynnik emisyjności ε_{sz} są niezależne od długości fali promieniowania ciepłego oraz gdy powierzchnia radiatora nie posiada radiacyjnych właściwości selektywnych, wypadkowe różnicowe chłodzenie poziomej powierzchni radiatora można przedstawić w postaci wzoru [116]:

$$Q_{net} = \tau_{sz} \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_r^4) + \varepsilon_{sz} \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_{sz}^4) + h_r (T_s - T_a) + h_{r,sz} (T_s - T_{sz}) \quad (3.38)$$

w którym:

T_a, T_s, T_r, T_{asz} – temperatury, odpowiednio, powietrza, zewnętrznej powierzchni radiatora, promieniowania niebosłonu i szyby, K,

ε_{sz} – współczynnik emisyjności szyby,

ε_s – współczynnik emisyjności radiatora,

τ_{sz} – współczynnik przepuszczalności szyby dla promieniowania ciepłego,

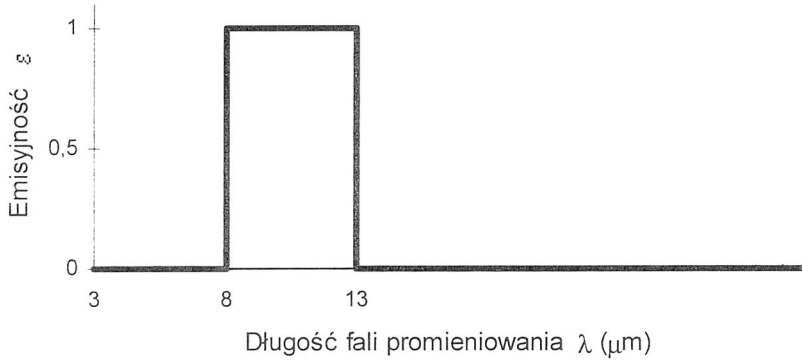
$h_{r,sz}$ – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie radiatora dla radiacyjnej wymiany ciepła z szybą,

Badania i doświadczenia eksperymentalne przeprowadzone w różnych krajach wykazały, że zastosowanie osłon transparentnych w celu poprawienia charakterystyki chłodzenia radiacyjnego dla ciała czarnego pozwalają obniżyć temperaturę takiego radiatora w granicach od 7 do 12 °C w stosunku do radiatora nieosłoniętego [62].

3.6.2. Radiatory spektralnie selektywne dla promieniowania ciepłego

Promieniowanie długofalowe atmosfery w warunkach bezchmurnego nieba nie jest ciągle w funkcji długości fali promieniowania – bezchmurna atmosfera nie emituje promieniowania ciepłego tak jak ciało doskonale czarne. To istotne spostrzeżenie stało się podstawą do skonstruowania radiatora spektralnie selektywnego, dla którego w pewnym zakresie długości fal różnicowe radiacyjne straty ciepła są większe niż ciała doskonale czarnego przy tej samej temperaturze otaczającego powietrza. Idealny radiator spektralnie selektywny powinien charakteryzować się maksymalnym współczynnikiem odbicia (refleksyjności) w zakresie długości fal, w którym atmosfera promieniuje najintensywniej oraz maksymalnym współczynnikiem emisyjności (minimalnym współczynnikiem odbicia) w zakresie „okna atmosferycznego”

($8\div 13\mu\text{m}$), tzn. w zakresie w którym atmosfera jest niemal całkowicie przepuszczalna dla promieniowania ciepłego (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Charakterystyka właściwości radiacyjnych idealnego radiatora promieniowania ciepłego
Fig. 3.10. Radiative properties characteristic of an ideal IR-selective radiator

Zatem idealny radiator selektywny powinien być ciałem doskonale czarnym dla zakresu długości fal „okna atmosferycznego” ($\lambda = 8\div 13\mu\text{m}$) oraz idealnym lustrem dla promieniowania ciepłego poza tym zakresem. Ponadto, w celu zwiększenia efektywności chłodzenia radiacyjnego, radiator powinien być dodatkowo osłonięty materiałem przezroczystym dla promieniowania ciepłego, redukującym niekorzystny wpływ konwekcji na bilans cieplny radiatora.

W analizie możliwości zastosowania jako radiatora materiałów o określonych własnościach spektralnie selektywnych (w zakresie promieniowania ciepłego), wygodnie jest zdefiniować dwie charakterystyki materiałowe, które jednoznacznie określają możliwości chłodzenia radiacyjnego danego materiału. Mianowicie:

1. Współczynnik emisyjności powierzchni ε_{sr} dla zakresu długości fal okna atmosferycznego ($8\div 13\mu\text{m}$), obliczany ze wzoru [63]:

$$\varepsilon_{sr} = \frac{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} d\lambda R_{cz}(\lambda, T_a) [1 - \tau(\lambda, T_a)]}{\int_{8\mu\text{m}}^{13\mu\text{m}} d\lambda R_{cz}(\lambda, T_a)} \quad (3.39)$$

gdzie:

R_{cz} – natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego,

τ – półsferyczny współczynnik odbicia dla materiału (refleksyjność półsferyczna),

2. Współczynnik selektywności materiału η_s dla promieniowania ciepłego:

$$\eta_s = \varepsilon_{sr} / \varepsilon_s \quad (3.40)$$

gdzie ε_s jest półsferycznym współczynnikiem emisyjności materiału dla całego zakresu promieniowania ciepłego.

Można zauważyć, że postać równania (3.40) na obliczanie wartości współczynnika selektywności η_s danej powierzchni dla promieniowania ciepłego jest bardzo zbliżona do równania (3.7) na obliczanie wartości współczynnika selektywności η materiału w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego.

Parametry ε_{sr} oraz η_s razem jednoznacznie charakteryzują możliwości danej powierzchni do chłodzenia radiacyjnego, a ponadto, oba te parametry powinny mieć możliwie jak największą wartość. Wysoka wartość współczynnika emisyjności ε_{sr} umożliwia uzyskiwanie przez radiator dużej wartości promieniowania różnicowego, natomiast wysoka wartość współczynnika selektywności η_s umożliwia osiągnięcie przez daną powierzchnię temperatury znacznie niższej od temperatury otaczającego powietrza. Teoretyczna maksymalna wartość współczynnika selektywności η_s wynosi 3,39 przy temperaturze powietrza 0 °C [51].

Poniżej zostaną przeanalizowane możliwości trzech powierzchni spełniających wymóg maksymalnych wartości charakterystyk ε_{sr} oraz η_s , a mianowicie: ciała doskonale czarnego, doskonałego lustra dla promieniowania ciepłego i doskonałej powierzchni spektralnie selektywnej dla promieniowania ciepłego.

Ciało doskonale czarne:

Współczynnik emisyjności jest równy jedności dla całego zakresu promieniowania ciepłego:

$$\varepsilon_{cz}(\lambda) = 1 \quad \text{dla wszystkich } \lambda \quad (3.41)$$

Doskonałe lustro dla promieniowania ciepłego:

Można zauważyć, że największa intensywność emisji promieniowania atmosfery występuje przy długości fali promieniowania powyżej 13 μm (rys. 2.10). Jest zatem oczywiste, że ta część promieniowania atmosfery powinna być odbita od powierzchni radiatora, aby zmniejszyć ilość promieniowania absorbowanego przez powierzchnię. Dlatego idealne lustro dla promieniowania ciepłego powinno mieć następującą charakterystykę radiacyjną:

$$\varepsilon_l(\lambda) = 1 \quad \text{dla } \lambda \leq 13 \mu\text{m} \quad (3.42)$$

$$\varepsilon_l(\lambda) = 0 \quad \text{dla } \lambda > 13 \mu\text{m} \quad (3.43)$$

Doskonała powierzchnia spektralnie selektywna dla promieniowania ciepłego:

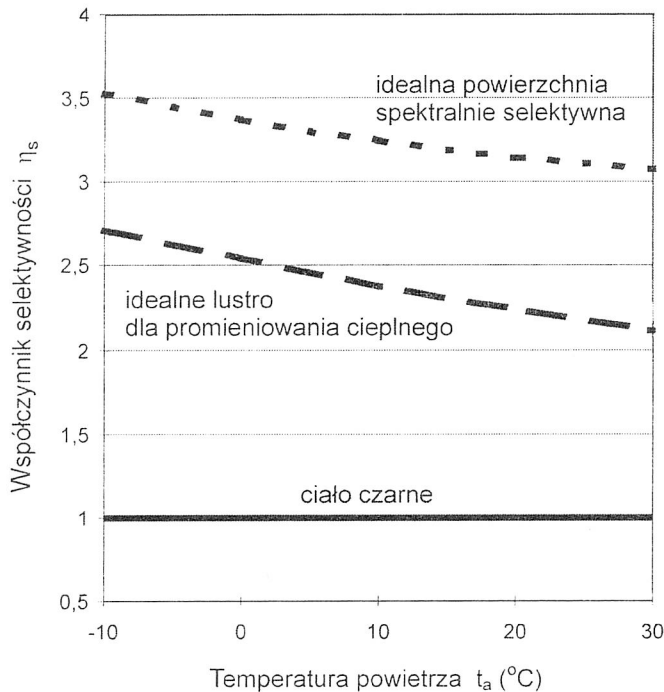
Definicję idealnego radiatora spektralnie selektywnego podano na wstępie tego rozdziału. Idealny radiator powinien charakteryzować się następującymi cechami optycznymi (rys. 3.10):

$$\varepsilon_R(\lambda) = 0 \quad \text{dla } \lambda < 8 \mu\text{m} \quad (3.44)$$

$$\varepsilon_R(\lambda) = 1 \quad \text{dla } 8 \leq \lambda \leq 13 \mu\text{m} \quad (3.45)$$

$$\varepsilon_R(\lambda) = 0 \quad \text{dla } \lambda > 13 \mu\text{m} \quad (3.46)$$

Na rysunku 3.11 przedstawiono zmienność współczynnika selektywności materiału η_s w funkcji temperatury powietrza dla opisanych wyżej powierzchni idealnych.



Rys. 3.11. Współczynnik selektywności η_s powierzchni idealnych w funkcji temperatury powietrza [51]

Fig. 3.11. Selectivity coefficients η_s for ideal surfaces as a function of the air temperature [51]

Współczynnik selektywności materiału η_s dla ciała doskonale czarnego jest równy jedności i nie zależy od temperatury powietrza. Dla idealnego lustra w odniesieniu do promieniowania cieplnego współczynnik ten jest większy i zmienia się od około 2,7 dla temperatury powietrza -10 °C do około 2,2 dla temperatury powietrza $+30$ °C. Największą wartość parametru η_s można uzyskać dla idealnej powierzchni spektralnie selektywnej. Jest to zgodne z intuicją, gdyż znaczna część promieniowania cieplnego powierzchni przypada na zakres „okna atmosferycznego”. Podobnie jak dla idealnego lustra, wpływ temperatury powietrza na wartość η_s dla idealnej powierzchni spektral-

nie selektywnej jest niewielki; wartość współczynnika η_s zmienia się od około 3,5 dla temperatury powietrza $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do około 3,1 dla temperatury powietrza $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 3.11).

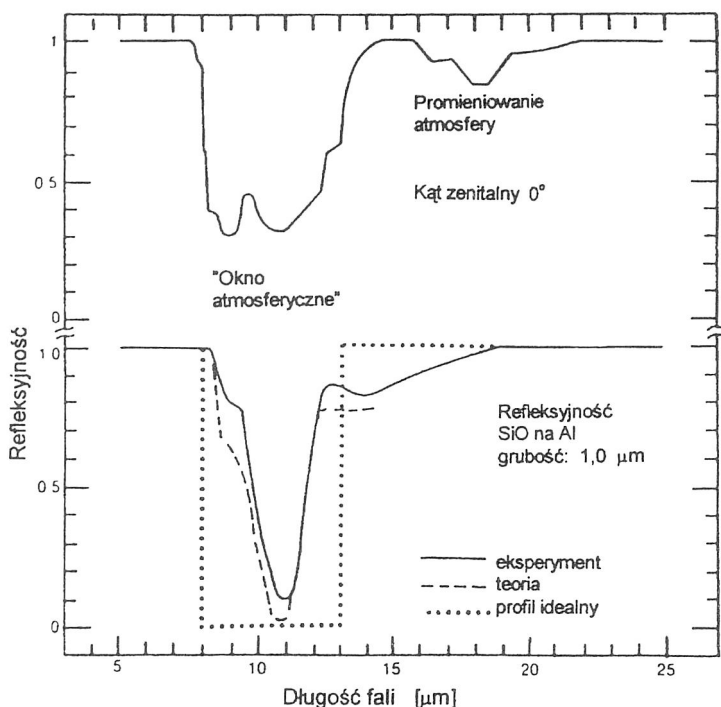
Pierwsze prace teoretyczne oraz eksperymentalne nad wykorzystaniem powierzchni spektralnie selektywnych, w zakresie promieniowania cieplnego, do wspomaganie efektu chłodzenia radiacyjnego zostały zapoczątkowane pod koniec lat pięćdziesiątych. I tak, jako jeden z pierwszych szczegółową dyskusję zagadnienia przeprowadził Head, który w roku 1959 opatentował urządzenie do chłodzenia radiacyjnego [73], w którym radiatorem była powierzchnia aluminiowa pokryta cienką warstwą oksydowanego silikonu. Powierzchnia radiatora była zabezpieczona folią polietylenową, zmniejszającą wpływ wymiany ciepła przez konwekcję. Niestety, Head nie przeprowadził żadnych badań doświadczalnych swojego systemu chłodzenia.

W latach od 1962 do 1967 Trombe (cyt. w pracy [51]) ze współpracownikami przeprowadzili eksperymenty, w których badali różne materiały, takie jak oksydowane aluminium, malowany oksydowany tytan, poliwinyl oraz szkło. W celu uzyskania lepszego efektu chłodzenia radiacyjnego, stosował również gaz CO_2 , który wprowadzał w kilkucentymetrową szczelinę między radiatorem a osłoną transparentną, ograniczającą wpływ konwekcyjnej wymiany ciepła. W trakcie eksperymentów Trombe uzyskał maksymalną wartość promieniowania różnicowego dla radiatora około 130 Wm^{-2} oraz obniżenie temperatury radiatora w stosunku do temperatury otaczającego powietrza prawie o $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

W roku 1969 Hay i Yellot (cyt. w pracy [51]) zaproponowali użycie radiatora selektywnego, zasłanianego przed promieniowaniem słonecznym w ciągu dnia i odsłanianego na oddziaływanie bezchmurnego niebosłonu w nocy. Następnie w roku 1975 Catalanotti ze współpracownikami [26] przeprowadzili eksperymenty z materiałem poliwinylowym o nazwie Tedlar (produkt firmy Dupont de Nemours), umieszczonym na folii aluminiowej. W roku 1979 Grenier [65] zaproponował zastosowanie, zamiast warstwy Tedlaru, cienkiej warstwy materiału o nazwie TPX (firmy Mitsui Petrochemical Industries Ltd.). TPX charakteryzował się nieco lepszymi właściwościami emisyjnymi, zwłaszcza w zakresie fal krótszych niż $8\text{ }\mu\text{m}$.

W roku 1978 Harrison i Walton [72] zastosowali na białą pomalowaną powierzchnię pokrytą TiO_2 , uzyskując temperaturę powierzchni radiatora niższą o $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ w odniesieniu do temperatury otaczającego powietrza. W rok później, w roku 1979, Miller i Bradley (cyt. w [51]) zastosowali anodyzowane aluminium, które można uznać za niemal idealny radiator, zwłaszcza w zakresie długości fal do $8\text{ }\mu\text{m}$.

Granqvist i Hjortsberg w roku 1980 [64] dokonali pomiaru współczynnika refleksyjności tlenku krzemu SiO o grubości $1\text{ }\mu\text{m}$ umieszczonego na aluminium, uzyskując wyniki pokazane na rys. 3.12. Badany materiał wykazywał bardzo dobre właściwości refleksyjne dla zakresu długości fal poza „oknem atmosferycznym” ($8\div 13\text{ }\mu\text{m}$), natomiast nie najlepsze właściwości emisyjne w tym właśnie zakresie.



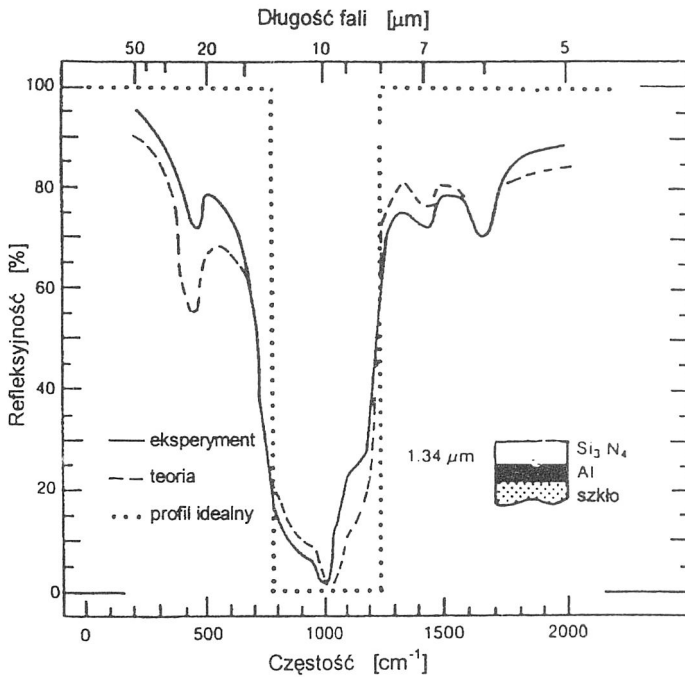
Rys. 3.12. Współczynnik odbicia promieniowania cieplnego dla warstwy SiO umieszczonej na aluminium [64]

Fig. 3.12. Infrared reflectivity of an SiO film deposited on an aluminium substrate [64]

W poszukiwaniu jeszcze bardziej wydajnego materiału spektralnie selektywnego w zakresie promieniowania cieplnego, Eriksson ze współautorami [50] przebadali warstwę azotku krzemu powleczonej na refleksyjnym podłożu aluminium na szkło. Przebieg spektralnej refleksyjności tego materiału pokazano na rys. 3.13, z którego wynika, że autorzy uzyskali charakterystykę radiatora bardzo zbliżoną do charakterystyki radiatora idealnego.

Podejmowane były również próby zastosowania gazów o odpowiednich właściwościach selektywnych w zakresie promieniowania cieplnego, umieszczanych w kilkucentymetrowej przestrzeni między spektralnie selektywną powierzchnią radiatora a folią transparentną, ograniczającą konwekcyjną wymianę ciepła. Hjortsberg i Granqvist wykorzystali do tego celu etylen (C_2H_4), tlenek etylenu (C_2H_4O) i amoniak (NH_3), znajdując dla każdego z tych gazów optymalną grubość warstwy [74].

I wreszcie w roku 1984 Berdahl [14] przeprowadził eksperymenty z tlenkiem magnezu MgO umieszczonym na folii aluminiowej. Materiał ten charakteryzował się wysokim współczynnikiem odbicia dla promieniowania słonecznego i został zakwalifikowany do grupy materiałów umożliwiających uzyskiwanie chłodzenia radiacyjnego również w ciągu dnia.



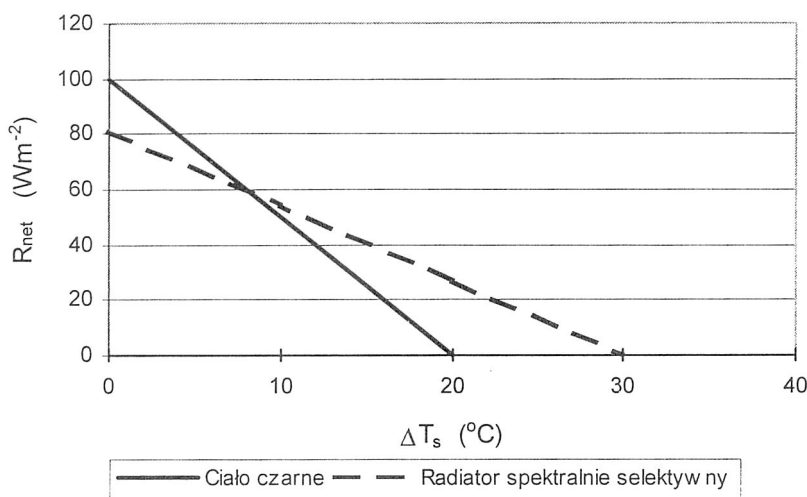
Rys. 3.13. Współczynnik odbicia azotku krzemu osadzonego na refleksyjnej warstwie aluminium na szkło [50]

Fig. 3.13. Infrared reflectance spectrum of silicon nitride deposited on a reflecting aluminium substrate on a glass [50]

Z dokonanego przeglądu wybranych osiągnięć różnych autorów wynika, że w zakresie doboru odpowiednich spektralnie selektywnych własności radiacyjnych, wykorzystywanych w radiatorach do zwiększenia efektu chłodzenia radiacyjnego, możliwe jest zastosowanie alternatywnych rozwiązań, umożliwiających otrzymywanie zbliżonych efektów końcowych.

Miarą efektu chłodzenia radiacyjnego danego radiatora jest natężenie długofalowego promieniowania różnicowego R_{net} (równania (3.27)÷(3.29)) zwane również mocą chłodzenia, oraz wskaźnik temperatury radiatora ΔT_s (wyrażenie (3.33)). Przykładowe wyniki obliczeń dla radiatora idealnie czarnego i radiatora spektralnie selektywnego pokazano na rys. 3.14 [63] (oba radiatory są osłonięte materiałem przezroczystym).

Z rysunku 3.14 wynika, że w danych warunkach ciało doskonale czarne osiąga większą wartość natężenia cieplnego promieniowania różnicowego R_{net} (przy $\Delta T_s = 0$) niż powierzchnia spektralnie selektywna, natomiast powierzchnia selektywna może osiągnąć temperaturę znacznie niższą niż ciało doskonale czarne. Analiza obliczeniowa wykazała również, że dla radiatorów osłoniętych osłoną transparentną możliwe jest uzyskanie następujących wartości wskaźnika temperatury ΔT_s [49]:



Rys. 3.14. Przykładowe charakterystyki efektu chłodzenia radiacyjnego: długofalowe promieniowanie różnicowe R_{net} oraz wskaźnik temperatury radiatora ΔT_s ciała doskonale czarnego oraz powierzchni spektralnie selektywnej [63]

Fig. 3.14. Exemplary characteristics of the radiative cooling effect: net longwave radiation R_{net} and temperature difference ΔT_s for a black body and for an IR-selective surface

- dla radiatora idealnie czarnego: $\Delta T_s = 11 \div 21$ °C,
- dla radiatora spektralnie selektywnego: $\Delta T_s = 18 \div 33$ °C.

Temperatura radiatora idealnie czarnego, bez osłony transparentnej, może natomiast obniżyć się w stosunku do temperatury otaczającego powietrza od 6 do 11 °C.

Przedstawione wyżej wyniki analizy obliczeniowej upoważniają do stwierdzenia, że wymagane własności radiacyjne radiatora przeznaczonego do chłodzenia radiacyjnego zależą od przewidywanego zastosowania radiatora. Jeżeli celem stosowania radiatora jest osiągnięcie jak największej wartości natężenia długofalowego promieniowania różnicowego R_{net} , to radiator powinien być ciałem czarnym w całym zakresie promieniowania cieplnego, ponieważ tylko taki rodzaj powierzchni pozwala osiągnąć zamierzony efekt. Gdy zaś celem jest uzyskanie jak najniższej temperatury radiatora, należy zastosować radiator z powierzchnią spektralnie selektywną dla promieniowania cieplnego, tj. powierzchnię o wysokim współczynniku emisyjności w zakresie $8 \div 13$ μm i bardzo małym, zbliżonym do zera, współczynniku emisyjności poza tym zakresem.

4. MODEL ODDZIAŁYWANIA CIEPLNEGO PROMIENIOWANIA ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO NA BUDYNEK

4.1. Ogólne podstawy modelu

Przy rozpatrywaniu nieustalonego przenikania ciepła przez przegrody budowlane, poddane oddziaływaniu zmiennych w czasie wielkości meteorologicznych, można wyodrębnić trzy główne grupy zagadnień, a mianowicie:

- procesy cieplne zachodzące w atmosferze, a w tym emisja i przenoszenie promieniowania długofalowego oraz w najbliższym otoczeniu budynku, oddziałujące na bilans cieplny przegród budowlanych i budynku,
- procesy cieplne zachodzące na zewnętrznej powierzchni przegród, warunkowane między innymi spektralnie selektywnymi własnościami radiacyjnymi powierzchni (rozdz. 3.2 i 3.6.2),
- nieustalone przewodzenie ciepła przez przegrodę budowlaną z uwzględnieniem warunków termicznych panujących w pomieszczeniu, które ta przegroda oddziela.

Całościowo zagadnienia te ujmuje zaproponowany w rozdziale 6.3 model obliczeniowy nieustalonego przenikania ciepła przez przegrody budowlane.

Procesy cieplne zachodzące w atmosferze oraz w najbliższym otoczeniu budynku uznano w niniejszej pracy za wiodące z punktu widzenia modelowania oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek oraz wpływu tego promieniowania na bilans cieplny przegród budowlanych.

Sformułowany w tym rozdziale model cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego odwzorowuje oddziaływanie tego promieniowania na budynek. Model opiera się na opisie i interpretacji zjawisk fizycznych w atmosferze, zaproponowanych przez Cole'a [36]. Na podstawie przeprowadzonych przez autora niniejszej pracy badań w warunkach rzeczywistych w różnych porach roku, głównie badań radiometrycznych, opis ten został numerycznie zmodyfikowany i adaptowany do warunków meteorologicznych występujących we Wrocławiu. Formułowanie modelu matematycznego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek zrealizowano w następujących etapach:

1. Wykonano badania w warunkach rzeczywistych, rejestrując zmienność natężenia promieniowania długofalowego atmosfery i środowiska zewnętrznego oraz innych niezbędnych standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych, w różnych porach roku dla różnych warunków pogodowych.

2. Na podstawie danych pomiarowych metodami statystycznymi wygenerowano postać podstawowych formuł empirycznych do obliczania natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, w funkcji wybranych wielkości meteorolo-

gicznych, dla płaszczyzny poziomej oraz nachylonej pod kątem do 90° . Ponadto, dane pomiarowe stanowiły podstawę do określenia wartości niezbędnych parametrów środowiskowych modelu, charakterystycznych dla miejsca wykonywania pomiarów oraz wartości niezbędnych zmiennych wchodzących w skład funkcji opisujących promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego. Spośród analizowanych wartości danego parametru lub zmiennej przyjmowano te, które uzyskiwały najlepsze charakterystyki statystyczne adekwatności modelu. Następnie przeprowadzono weryfikację obliczeniową modelu wraz z niezbędną analizą statystyczną wyników.

3. Przeprowadzono analizę wrażliwości modelu obliczeniowego na zmianę parametrów modelu.

4. Niezależnie od pomiarów przebiegu zmienności elementów meteorologicznych, niezbędnych do sformułowania modelu obliczeniowego oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek, badano również zmienność składowych bilansu cieplnego stropodachu pomiarowego, w tym również składowe bilansu promieniowania jego powierzchni zewnętrznej. Dane pomiarowe stanowiły podstawę do weryfikacji zaproponowanego opisu matematycznego nieustalanej wymiany ciepła przegrody budowlanej z otoczeniem, z uwzględnieniem oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego.

Szczegółowe założenia oraz postać modelu matematycznego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek przedstawiono w rozdziale 4.5, natomiast możliwości zastosowania modelu w rozdziale 5.5.

4.2. Badania doświadczalne

4.2.1. Cel i zakres badań

Promieniowanie długofalowe atmosfery nie jest wielkością standardowo mierzoną na stacjach meteorologicznych, zarówno w Polsce jak i w innych krajach. Zatem, w celu sformułowania kompleksowego modelu obliczeniowego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek oraz określenia ilościowego wpływu tego promieniowania na bilans cieplny przegród budowlanych niezbędne było wykonanie stosownych pomiarów w warunkach rzeczywistych. Badania składały się z części eksperymentalnej i obliczeniowej.

Zakres badań doświadczalnych obejmował rejestrowanie przebiegu zmienności natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego oraz innych niezbędnych wielkości meteorologicznych w różnych porach roku przy różnym stopniu zachmurzenia. Eksperymentalną część badań wykonano w różnych sezonach, w warunkach meteorologicznych reprezentatywnych dla klimatu występującego w ostatnich latach we Wrocławiu. Badania eksperymentalne wykonano w możliwie jak najszerszym zakresie zmienności elementów meteorologicznych, zwłaszcza tempera-

tury powietrza zewnętrznego, jednoznacznie warunkującego zakres stosowalności formułowanego modelu obliczeniowego. Analiza zmierzonych wielkości meteorologicznych wykazała podobny charakter ich zmienności w każdej serii pomiarowej. W poszczególnych porach roku wielkości te różniły się jedynie wartościami. Zmierzone wielkości meteorologiczne, odzwierciedlające rzeczywistą zmienność cech środowiska zewnętrznego w funkcji czasu, posłużyły do wygenerowania wyrażen empirycznych do obliczania natężenia promieniowania ciepłego atmosfery docierającego do płaszczyzny poziomej oraz nachylonej pod dowolnym kątem w przedziale od 0° (płaszczyzna pozioma) do 90° (płaszczyzna pionowa). Następnie wyrażenia te zostały wprowadzone do sformułowanego modelu matematycznego oddziaływania ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek. Zmierzone w trakcie badań wielkości meteorologiczne posłużyły również do sprawdzenia poprawności zaproponowanego opisu nieustalonego, jednokierunkowego przenikania ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną, poddaną oddziaływaniu zmiennych w czasie elementów środowiska zewnętrznego. Zakres badań obejmował również pomiar i rejestrację składników bilansu ciepłego przegrody oraz bilansu promieniowania jej powierzchni zewnętrznej.

Pomiary wykonano we Wrocławiu na prawie poziomych stropodachach budynków cztero- i jedenastokondygnacyjnego, w pobliżu których nie znajdowały się inne wyższe obiekty bądź przeszkody naturalne, mogące ewentualnie zakłócić strumień docierającego promieniowania ciepłego atmosfery. Badania wykonano w różnych porach roku, w seriach kilkudniowych. W trakcie badań mierzono dobowe przebiegi wielkości meteorologicznych charakteryzujących środowisko zewnętrzne, a w tym: przebieg temperatury i wilgotności względnej powietrza na zewnątrz, natężenie całkowitego promieniowania słonecznego, natężenie promieniowania ciepłego atmosfery (a tym samym pośrednio tzw. temperaturę promieniowania nieboskłonu), docierającego do płaszczyzny poziomej oraz nachylonej pod kątem 30° , 60° i 90° . Określano również stopień zachmurzenia. Ponadto, na podstawie danych pomiarowych, dla różnych warunków pogodowych, dodatkowo wyznaczono wartości i przebieg zmienności temperatury punktu rosy, średniej temperatury promieniowania nieboskłonu (zwanej również „temperaturą nieba”), ciśnienia pary wodnej oraz współczynnika emisyjności nieboskłonu.

W trakcie pomiarów mierzono również zmienność składowych bilansu ciepłego oraz bilansu promieniowania dla stropodachu pomiarowego, to znaczy: temperaturę i gęstość strumienia ciepła na powierzchniach granicznych stropodachu (powierzchnia zewnętrzna oraz powierzchnia od strony pomieszczenia) oraz natężenie promieniowania różnicowego między zewnętrzną powierzchnią stropodachu a nieboskłonem. Mierzono także temperaturę powietrza zewnętrznego i w pomieszczeniu oraz prędkość wiatru nad zewnętrzną powierzchnią stropodachu. Dla zewnętrznej powierzchni stropodachu wyznaczono wartość współczynnika absorpcji dla promieniowania słonecznego, według metody Reagana i Acklama [160] oraz wartość współczynnika emisyjności.

Większość mierzonych wielkości rejestrowano w sposób ciągły, używając programowanego systemu komputerowego Compact Logger Solatron Schlumberger, w zadanym kroku czasowym.

Ponieważ w trakcie pomiarów nie występowały czynniki zakłócające przebieg pozyskiwania danych, uzyskane wyniki uznano za miarodajne do weryfikacji modelu matematycznego.

Wielkości meteorologiczne zmierzone w części eksperymentalnej badań stanowiły podstawę do wyznaczenia wyrażeń empirycznych na obliczanie następujących wielkości:

- natężenia promieniowania długofalowego atmosfery, docierającego do płaszczyzny poziomej w warunkach bezchmurnego oraz zachmurzonego nieba, w funkcji temperatury powietrza lub temperatury punktu rosy lub ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu,
- współczynnika emisyjności atmosfery w funkcji temperatury punktu rosy lub ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu, dla warunków bezchmurnego i zachmurzonego nieba,
- średniej temperatury promieniowania atmosfery (tzw. „temperatury nieba”) dla warunków bezchmurnego i zachmurzonego nieba,
- wskaźnika temperatury promieniowania nieboskłonu (obniżenie temperatury promieniowania nieboskłonu w stosunku do temperatury powietrza), również dla różnego stopnia zachmurzenia nieba,
- długofalowego promieniowania różnicowego (strat ciepła netto przez promieniowanie) dla poziomej płaszczyzny ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza, dla różnego stopnia zachmurzenia nieba.

Wyrażenia empiryczne opisujące część wymienionych wyżej wielkości zostały wprowadzone do sformułowanego modelu matematycznego oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek. Ponadto, zmierzone wielkości meteorologiczne były również niezbędne do określenia zależności funkcyjnych dla niektórych parametrów modelu, charakterystycznych dla miejsca wykonywania pomiarów. Weryfikacja modelu matematycznego polegała na porównaniu wartości zmierzonych i obliczonych według zaproponowanych zależności oraz na określeniu niezbędnych charakterystyk statystycznych. Podobną procedurę postępowania zastosowano przy weryfikacji modelu obliczeniowego w części dotyczącej płaszczyzn pochylonych.

Opracowanie wyników pomiarów, polegające na wyznaczeniu interesujących wielkości na podstawie wielkości pomierzonych oraz zasadnicze obliczenia weryfikacyjne przeprowadzono za pomocą specjalnie do tego celu napisanego programu komputerowego na komputery klasy PC, standardowych programów narzędziowych pracujących w środowisku Windows oraz programu komputerowego „STATGRAPHICS PLUS v.1.4 dla Windows”. Obliczenia wykonano dla każdej serii pomiarowej. Przeprowadzono również analizę wrażliwości parametrów modelu na uzyskiwane wyniki końcowe.

Zmierzone wartości składowych bilansu cieplnego stropodachu, a w tym składowych bilansu promieniowania jego powierzchni zewnętrznej, pozwoliły zweryfikować poprawność opisu warunków brzegowych dla jednokierunkowego nieustalonego przenikania ciepła przez przegrodę wielowarstwową, z uwzględnieniem rzeczywistej zmienności elementów środowiska zewnętrznego. Obliczenia wykonano dla każdej serii pomiarowej. Po uzyskaniu zadawalającej zgodności między zmierzonymi i obliczonymi składnikami bilansu cieplnego przeprowadzono również analizę obliczeniową, mającą na celu określenie ilościowego wpływu długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na bilans cieplny przegród budowlanych dla warunków ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła. Szczegółowy opis zakresu analizy obliczeniowej i uzyskane wyniki przedstawiono w rozdziałach 6.2 i 6.3.

4.2.2. Przyrządy pomiarowe

Pomiary natężenia promieniowania atmosfery oraz promieniowania różnicowego między zewnętrzną powierzchnią stropodachu a środowiskiem, w zakresie krótko- i długofalowym, wykonano za pomocą radiometru różnicowego typu Funka, produkcji australijskiej firmy Solar Radiation Instruments (model S.I.7). Zasadniczą częścią tego przyrządu jest nawinięty na płytkę bakelitową termostos miedzianowo-konstantanowy pokryty czarną farbą o współczynniku absorpcji bliskim jedności. Przed niekorzystnymi czynnikami zewnętrznymi czułe powierzchnie radiometru chronią czasze polietylenowe, wypełnione azotem pod niewielkim ciśnieniem. Czasze polietylenowe są przepuszczalne dla promieniowania krótko- i długofalowego w zakresie długości fal od 0,2 do 50,0 μm . Termostos, w opisanej osłonie, umieszczony był na drążku zamocowanym na statywie.

W badaniach używano dwóch radiometrów różnicowych. Pierwszym (o współczynniku kalibracji 0,015 $\text{mV}/(\text{Wm}^{-2})$) mierzono natężenie promieniowania różnicowego między stropodachem a otoczeniem. Powierzchnię czułą umieszczano w odległości około 0,01 m od badanej przegrody, ze względu na szeroki kąt widzenia przyrządu, zawarty w obu półpełnych kątach sferycznych. Do drugiego radiometru, o współczynniku kalibracji 0,0161 $\text{mV}/(\text{Wm}^{-2})$, umieszczonego na statywie, przymocowano przysłonę wraz z dodatkową termoparą o kontrolowanej temperaturze. Mierzono nim natężenie całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego, to znaczy sumę natężenia całkowitego promieniowania słonecznego i długofalowego promieniowania niebosłonu, a dla płaszczyzn nachylonych względem poziomu dodatkowo długofalowe promieniowanie gruntu oraz najbliższego otoczenia budynku. Mierzono nim również przestrzenny rozkład promieniowania środowiska zewnętrznego docierającego do pochylonej i dowolnie zorientowanej płaszczyzny. Dokładność pomiaru wynosiła $\pm 5\%$ wartości odczytu.

Pomiary natężenia całkowitego promieniowania krótkofalowego (słonecznego) wykonano za pomocą solarymetru typu Kippa o współczynniku kalibracji równym

70,81 ($\text{Wm}^{-2}/(\text{mV})$), przy dokładności $\pm 5\%$ odczytu. Czujnikiem przyrządu jest termostos, pokryty czarną matową farbą o współczynniku absorpcji bliskim jedności, osłonięty kopułką ze szkła o przepuszczalności spektralnej w zakresie promieniowania słonecznego, tj. w zakresie od $0,3 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$.

Temperaturę powietrza na zewnątrz oraz w pomieszczeniu mierzono termometrem rtęciowym o zakresie pomiarowym od -30°C do $+50^\circ\text{C}$, przy dokładności $\pm 0,1^\circ\text{C}$ oraz indywidualnie cechowanymi termoparami miedziowo-konstantanowymi. Termoparami mierzono również temperaturę zewnętrznej powierzchni stropodachu oraz powierzchni od strony pomieszczenia. Błąd pomiarowy zestawu oszacowano na $\pm 0,1^\circ\text{C}$ przy temperaturze odniesienia termopar do temperatury obudowy miernika. Stosowano również cyfrowy termometr kontaktowy produkcji brytyjskiej firmy Digi-tron Instrumentation Ltd. Składa się on z kilku sond, zawierających czujnik termistorowy połączony z elektronicznym układem liczącym o odczycie cyfrowym. Zakres pomiarowy przyrządu: od -50 do $+1000^\circ\text{C}$, jego dokładność zaś w temperaturze $20 \div 25^\circ\text{C}$ wynosi $0,5\%$ odczytu. Wilgotność względną powietrza na zewnątrz mierzono psychrometrem Assmanna z termometrami rtęciowymi o zakresie pomiarowym od -30°C do $+50^\circ\text{C}$, przy dokładności $\pm 0,1\%$ wartości odczytu.

Prędkość ruchu powietrza na zewnątrz mierzono czasowym anemometrem całkującym AC-1 na wysokości $0,15 \text{ m}$ nad powierzchnią stropodachu.

Do pomiaru gęstości strumienia ciepła przenikającego przez stropodach po stronie wewnętrznej oraz po zewnętrznej stropodachu używano indywidualnie kalibrowanych mierników typu płytkowego z czujnikami w postaci termostosów. Współczynniki kalibracji mierników wynosiły od 32,83 do 35,48 ($\text{Wm}^{-2}/(\text{mV})$), przy dokładności pomiarów wynoszącej $\pm 5\%$ wartości odczytu.

Do pośredniego pomiaru współczynnika emisyjności wybranych materiałów budowlanych wykorzystano radiometr typu Instatherm 14-220-1, produkcji amerykańskiej firmy Barnes Engineering. Zakres pomiarowy tego radiometru wynosił od -10°C do $+60^\circ\text{C}$ przy kącie widzenia $2,8^\circ$, zaś czułość przyrządu $\pm 0,2^\circ\text{C}$ przy temperaturze powietrza 20°C .

Do rejestracji większości mierzonych wielkości fizycznych zastosowano programowany system komputerowy Compact Logger Solatron Schlumberger, o 32 kanałach wejściowych. System ten umożliwia odczyt oraz zapis mierzonych wielkości w zadanym kroku czasowym.

4.3. Wyniki badań

4.3.1. Promieniowanie ciepłe atmosfery na płaszczyznę poziomą

W tabeli 4.1 przedstawiono zakres zmienności wybranych wielkości pomiarowych oraz wielkości obliczonych na podstawie wielkości pomiarowych. Obliczone zostały, między innymi, temperatura punktu rosy (t_{dp}), średnia temperatura promieniowania nieboskłonu (t_r), ciśnienie pary wodnej (e) oraz współczynnik emisyjności nieba bezchmurnego (ε_o) i zachmurzonego (ε_a).

Tabela 4.1. Zakres wybranych wielkości pomiarowych lub obliczonych na podstawie pomiarów
Table 4.1. The range of selected measured and calculated values

Wielkość zmierzona lub obliczona na podstawie pomiarów	Symbol	Jednostka	Zakres zmienności	
			Dla warunków bezchmurnego nieba ($cc = 0$)	Dla całkowicie zachmurzonego nieba ($cc = 1$)
Temperatura powietrza	t_a	°C	−13,3÷29,7	−11,9÷16,5
Temperatura punktu rosy	t_{dp}	°C	−10,9÷13,1	−10,1÷10,5
Temperatura promieniowania nieboskłonu (temp. nieba)	t_r	°C	34,8÷19,7	−21,6÷16,5
Wskaźnik temperatury nieba (różnica temperatury powietrza i temperatury promieniowania nieboskłonu)	$t_a - t_r$	°C	7,8÷28,1	−6,1÷11,3
Emisyjność nieboskłonu	$\varepsilon_o, \varepsilon_a$	—	0,644÷0,899	0,844÷1,090
Ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu	e	mb	2,88÷15,07	3,1÷12,8
Natężenie promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą	R_{ao}, R_{ac}	Wm ^{−2}	183÷417	227÷399

Na rysunkach od 4.1 do 4.6 przedstawiono wyniki pomiarów, które bezpośrednio bądź pośrednio zostały wykorzystane do wygenerowania postaci wyrażeń empirycznych na obliczanie natężenia promieniowania ciepłego atmosfery na płaszczyznę poziomą, dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba. Rysunek 4.1. ilustruje zmienność natężenia tego promieniowania w funkcji temperatury powietrza, natomiast rys. 4.2 przedstawia zmienność wartości temperatury promieniowania nieboskłonu, ściśle korespondującą z długofalowym promieniowaniem atmosfery.

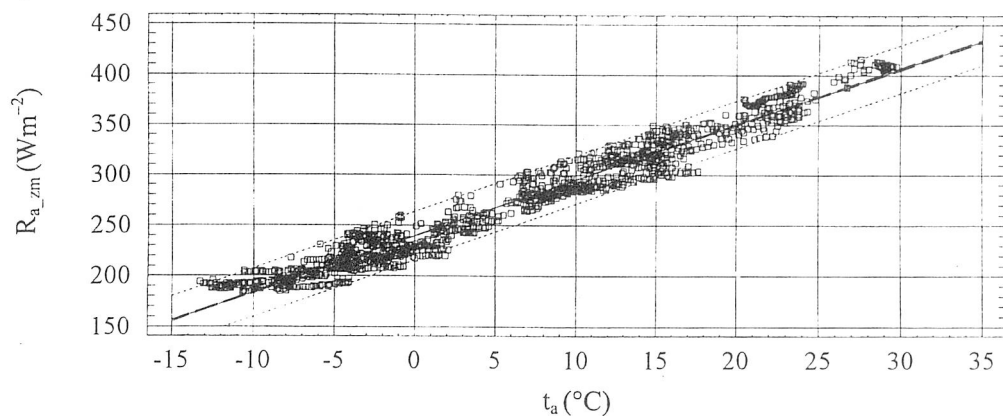
Natężenie promieniowania ciepłego atmosfery, docierającego do powierzchni gruntu, może być wyrażone jako funkcja współczynnika emisyjności atmosfery (rozdz. 2.3.1). Na rysunkach 4.3 i 4.4 przedstawiono uzyskane na podstawie pomiarów wartości współczynników emisyjności nieboskłonu w funkcji, odpowiednio, temperatury punktu rosy oraz ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu.

Rysunek 4.5 przedstawia zmienność wskaźnika temperatury nieboskłonu (obniżenie temperatury promieniowania nieba w stosunku do temperatury powietrza) w funkcji temperatury punktu rosy powietrza zewnętrznego. Na rysunku 4.6 pokazano zmienność natężenia promieniowania różnicowego między poziomą powierzchnią ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza a nieboskłonem.

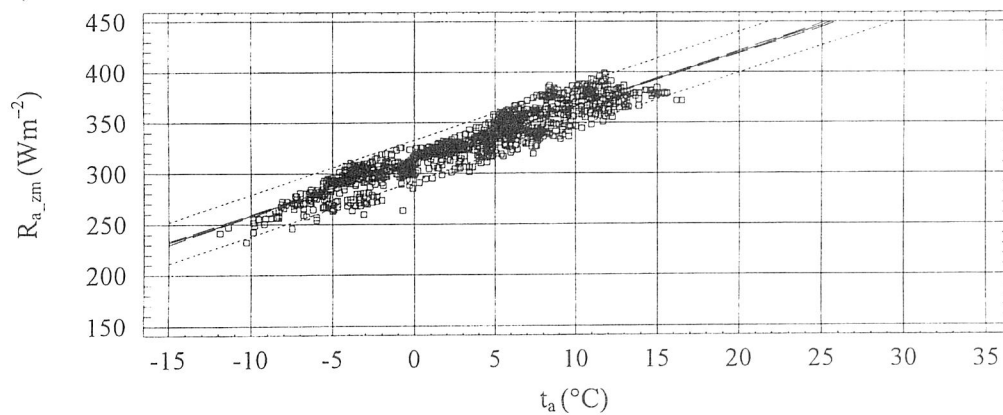
Na kolejnych rysunkach przedstawiono histogramy zbioru wartości dla wybranych wielkości pomiarowych: dla temperatury powietrza zewnętrznego (rys. 4.7), natężenia promieniowania ciepłego atmosfery (rys. 4.8), temperatury punktu rosy (rys. 4.9), temperatury promieniowania nieboskłonu (rys. 4.10), wskaźnika temperatury nieba (rys. 4.11) oraz dla współczynnika emisyjności atmosfery (rys. 4.12).

Niektóre z przedstawionych wyżej wyników badań dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba wydają się być oczywiste. I tak na przykład wiadomo, że w obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli bardzo często przyjmuje się, że współczynnik emisyjności dla zachmurzonego nieba jest równy 1,0 oraz że dla tych warunków średnia temperatura promieniowania nieba i temperatura powietrza praktycznie są sobie równe, co potwierdziły przeprowadzone badania i co zostało pokazane na rys. 4.2b, 4.3b, 4.4b, 4.5b, 4.11 i 4.12. Wyniki badań przedstawione na tych rysunkach niewątpliwie stanowią informacje ilościowe co do zakresu zmian wielkości pomiarowych dla warunków zachmurzonego nieba, ale również można je traktować jako potwierdzenie poprawności metodycznej przeprowadzonych badań.

a)



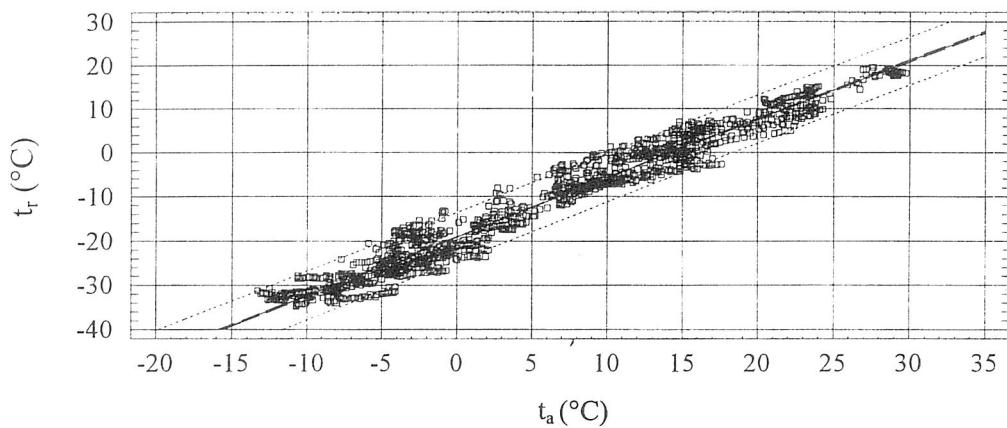
b)



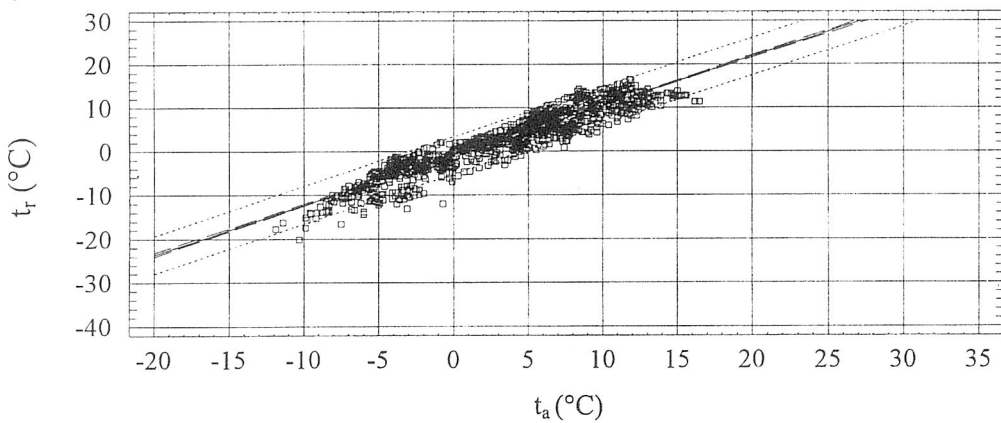
Rys. 4.1. Natężenie promieniowania ciepłego atmosfery w funkcji temperatury powietrza dla:
a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.1. Thermal radiation intensity of the atmosphere as a function of the air temperature:
a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)

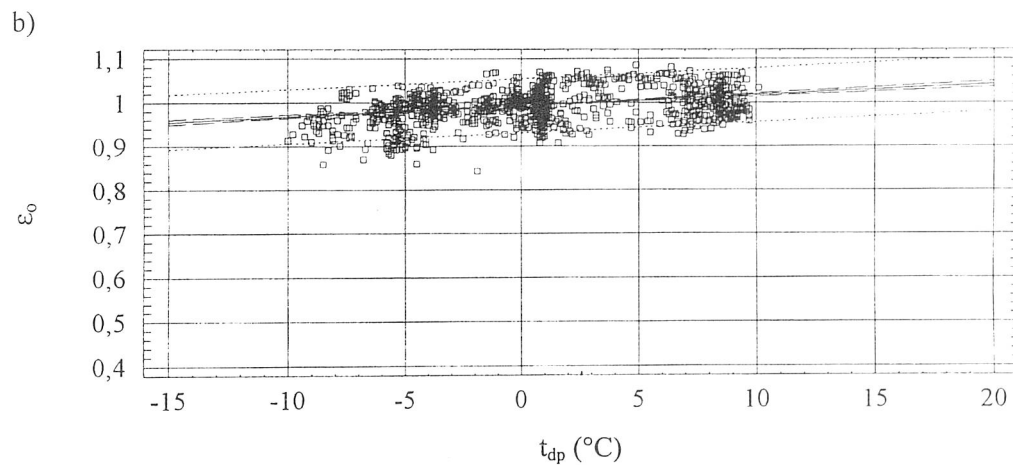
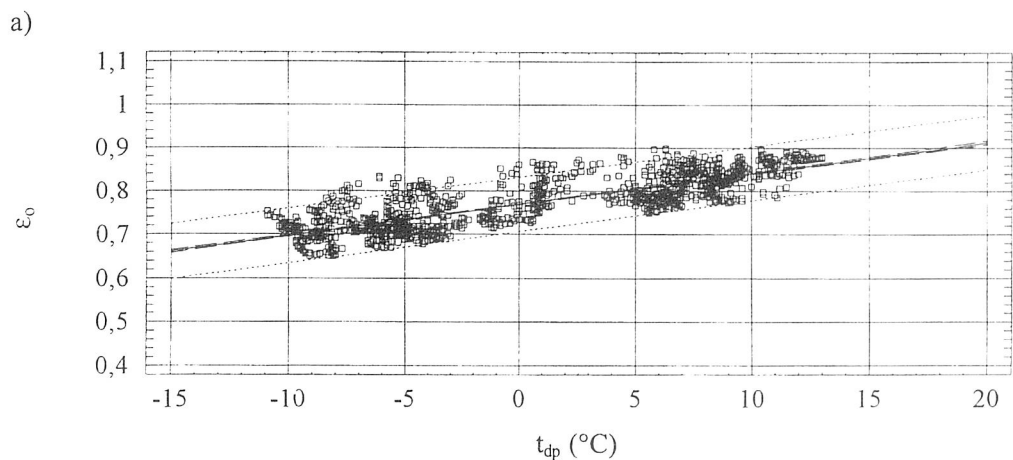


Rys. 4.2. Temperatura promieniowania nieboskłonu w funkcji temperatury powietrza dla:

a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.2. Sky radiation temperature as a function of the air temperature:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky



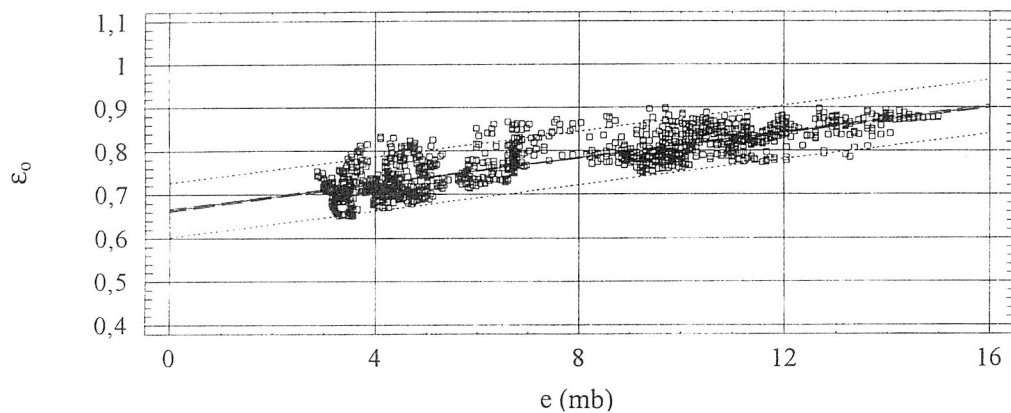
Rys. 4.3. Wartości współczynników emisyjności nieboskłonu w funkcji temperatury punktu rosy dla:

a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

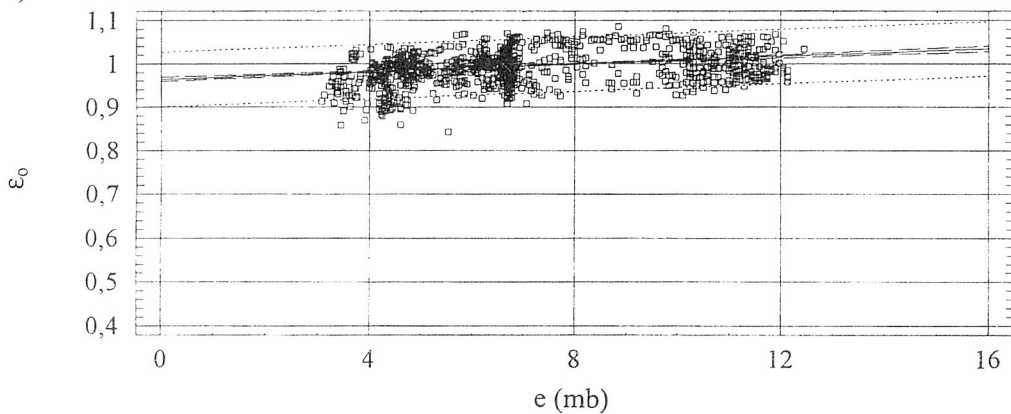
Fig. 4.3. Sky emissivity values as a function of the dewpoint temperature:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)

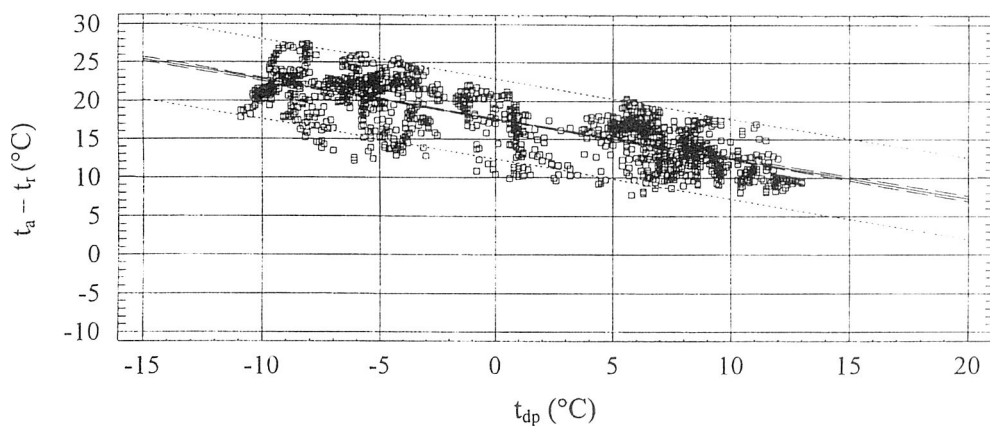


Rys. 4.4. Wartości współczynników emisyjności niebosłonu w funkcji ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu dla: a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

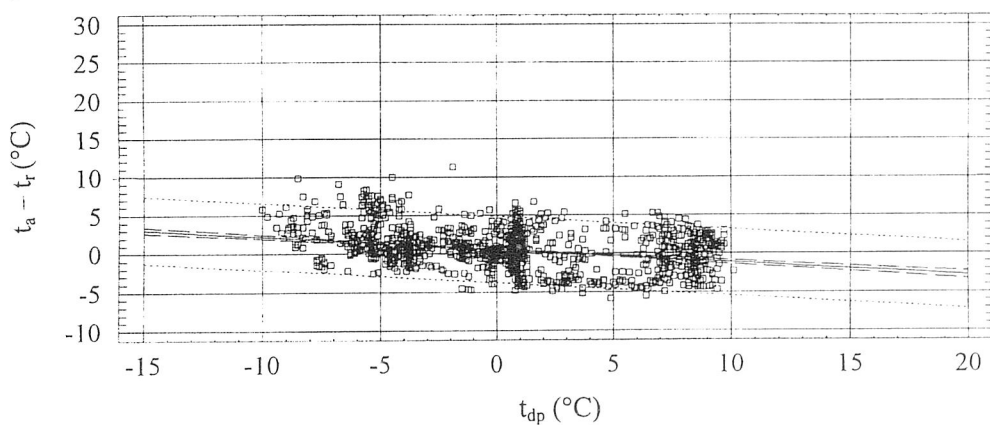
Fig. 4.4. Sky emissivity values as a function of the vapour pressure in the air:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)



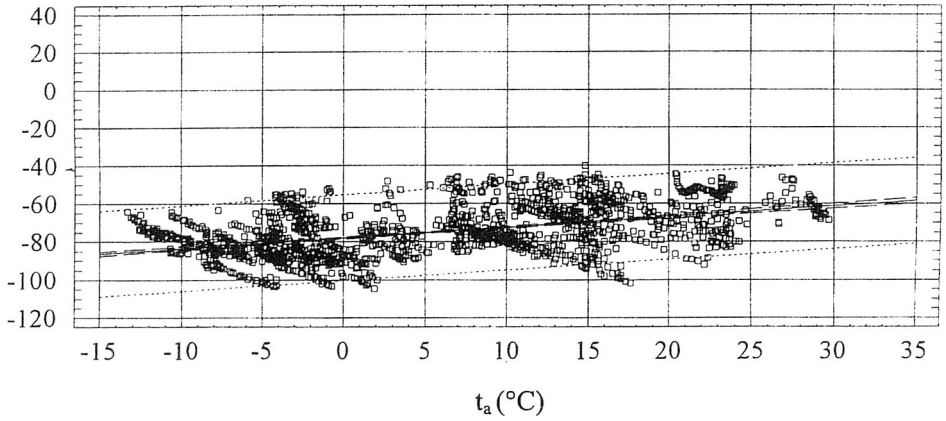
Rys. 4.5. Obniżenie temperatury promieniowania nieboskłonu względem temperatury powietrza w funkcji temperatury punktu rosy (wskaźnik temperatury nieba) dla:

a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

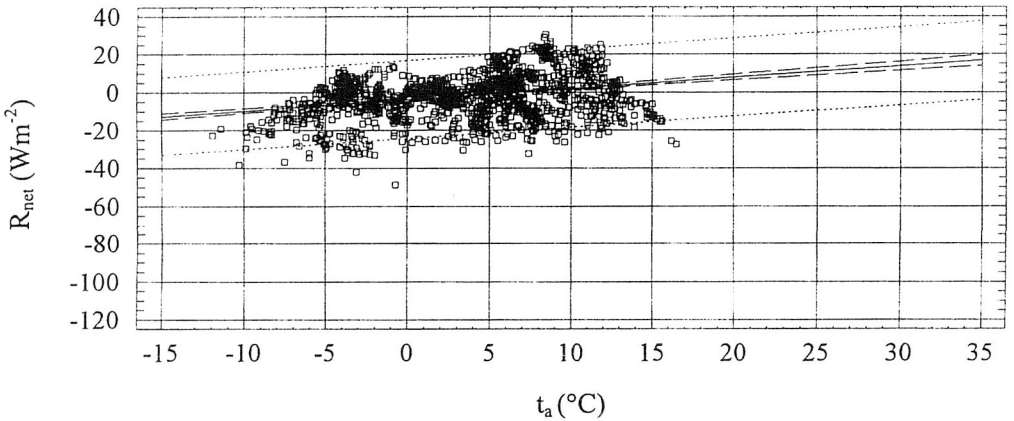
Fig. 4.5. Lowering of the sky temperature in relation to the air temperature as a function of the dewpoint temperature (the sky temperature depression):

a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



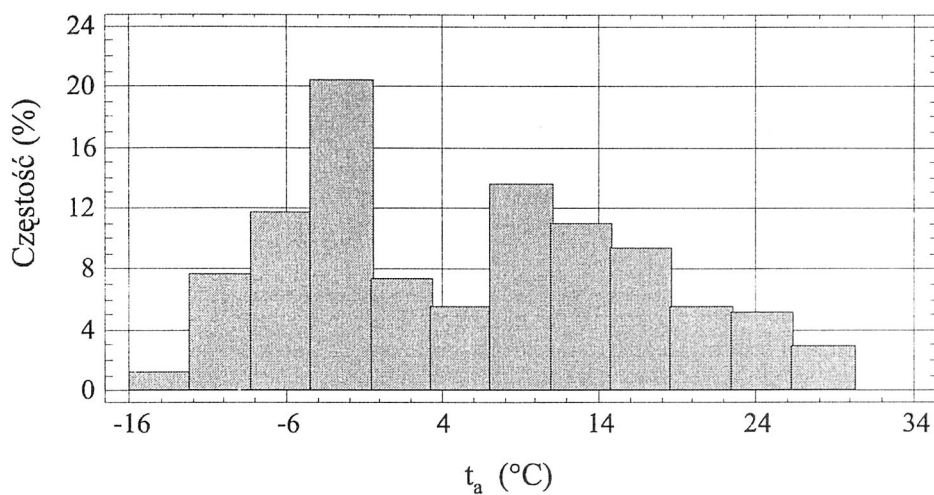
b)



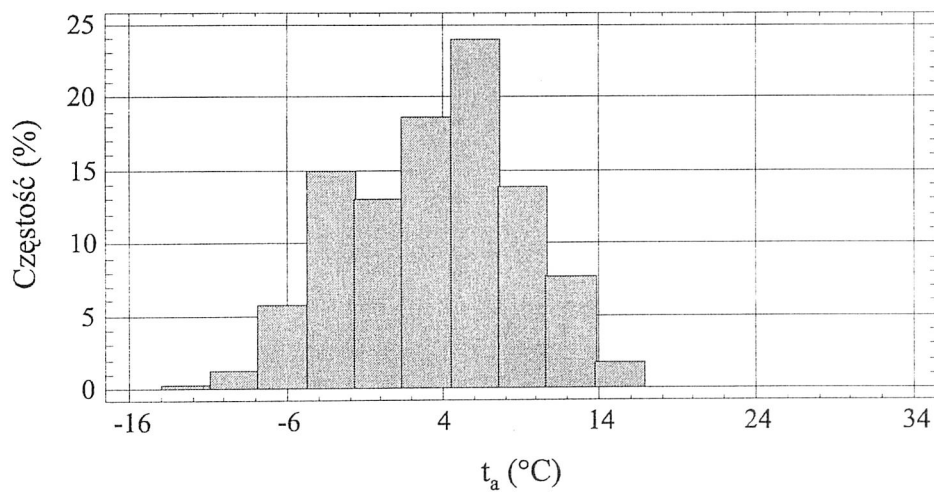
Rys. 4.6. Natężenie promieniowania różnicowego między poziomą powierzchnią ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza a nieboskłonem w funkcji temperatury powietrza dla a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.6. Intensity of the net radiation between a horizontal surface of a black body at the ambient air temperature and the sky at the function of the air temperature:
a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)



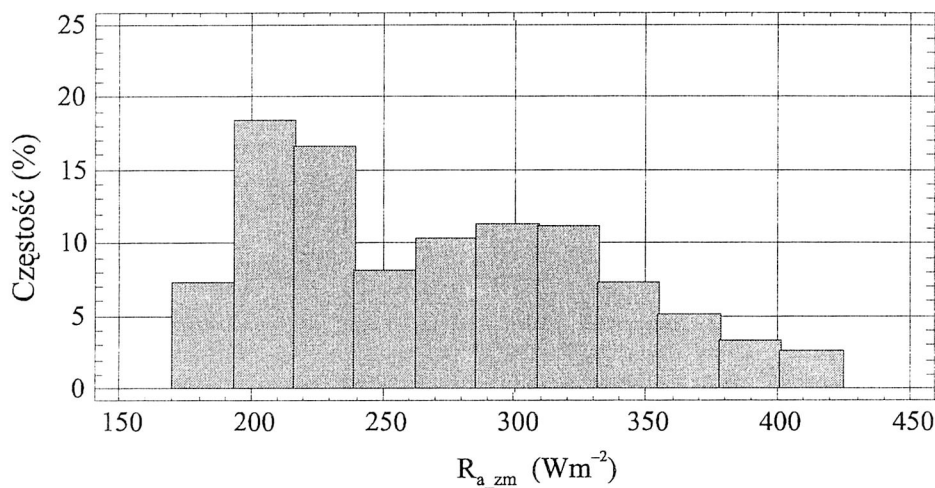
Rys. 4.7. Histogram temperatury powietrza zewnętrznego, występującej w trakcie badań:

a) dla warunków nieba bezchmurnego, b) dla nieba całkowicie zachmurzonego

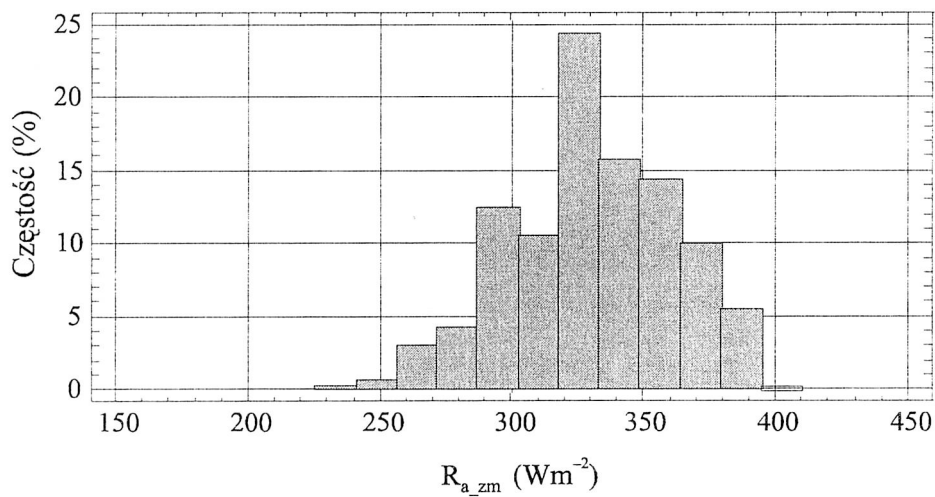
Fig. 4.7. Histogram of the ambient air temperature:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)

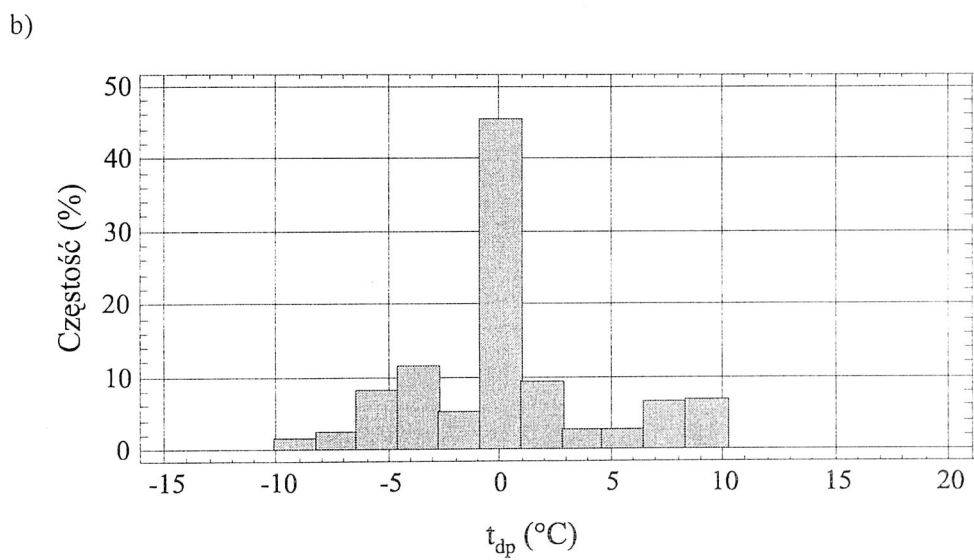
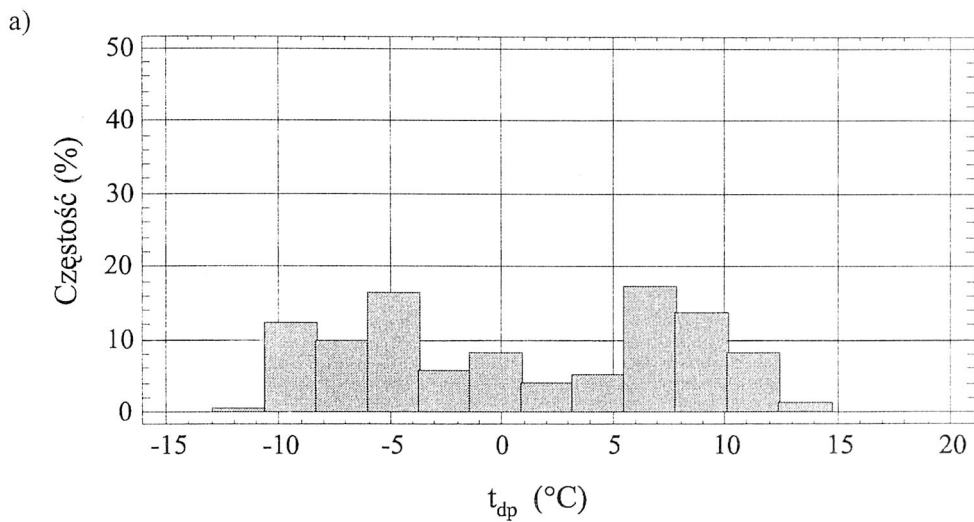


Rys. 4.8. Histogram natężenia promieniowania ciepłego atmosfery dla:

a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.8. Histogram of the intensity of thermal atmospheric radiation:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky



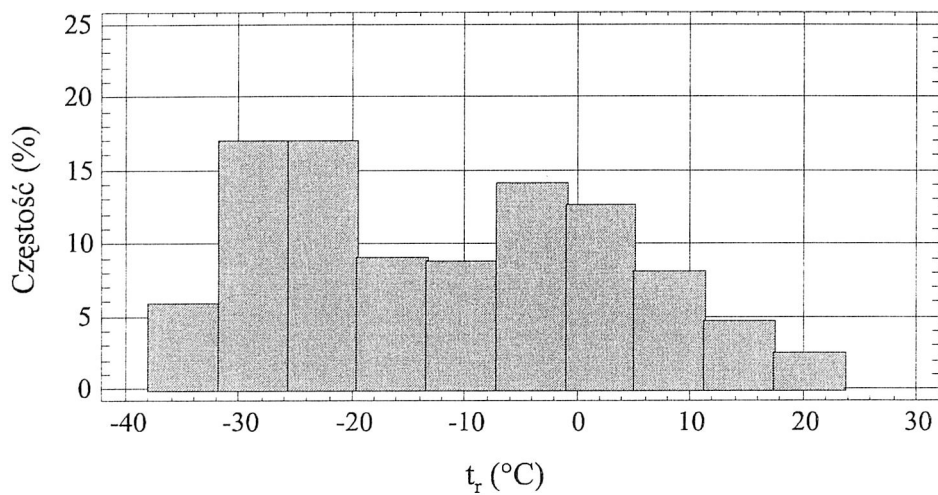
Rys. 4.9. Histogram temperatury punktu rosy dla: a) nieba bezchmurnego,

b) nieba całkowicie zachmurzonego

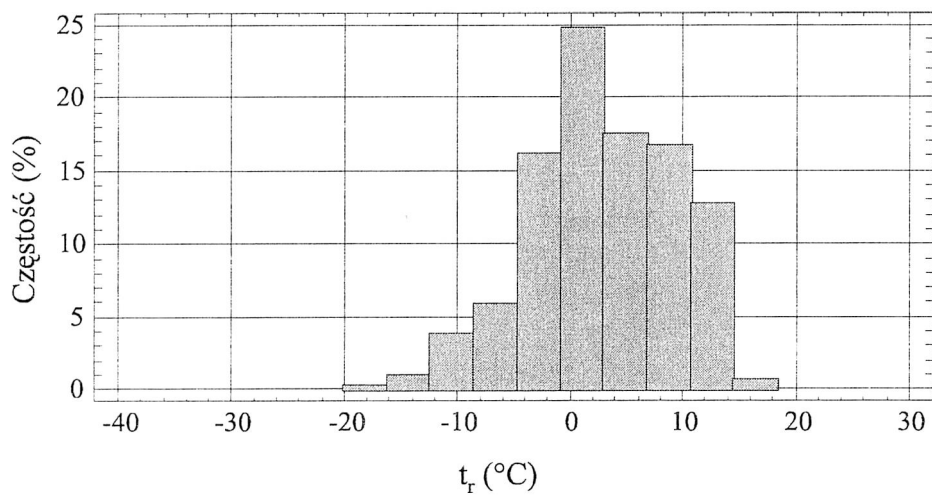
Fig. 4.9. Histogram of the dew point temperature:

a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)

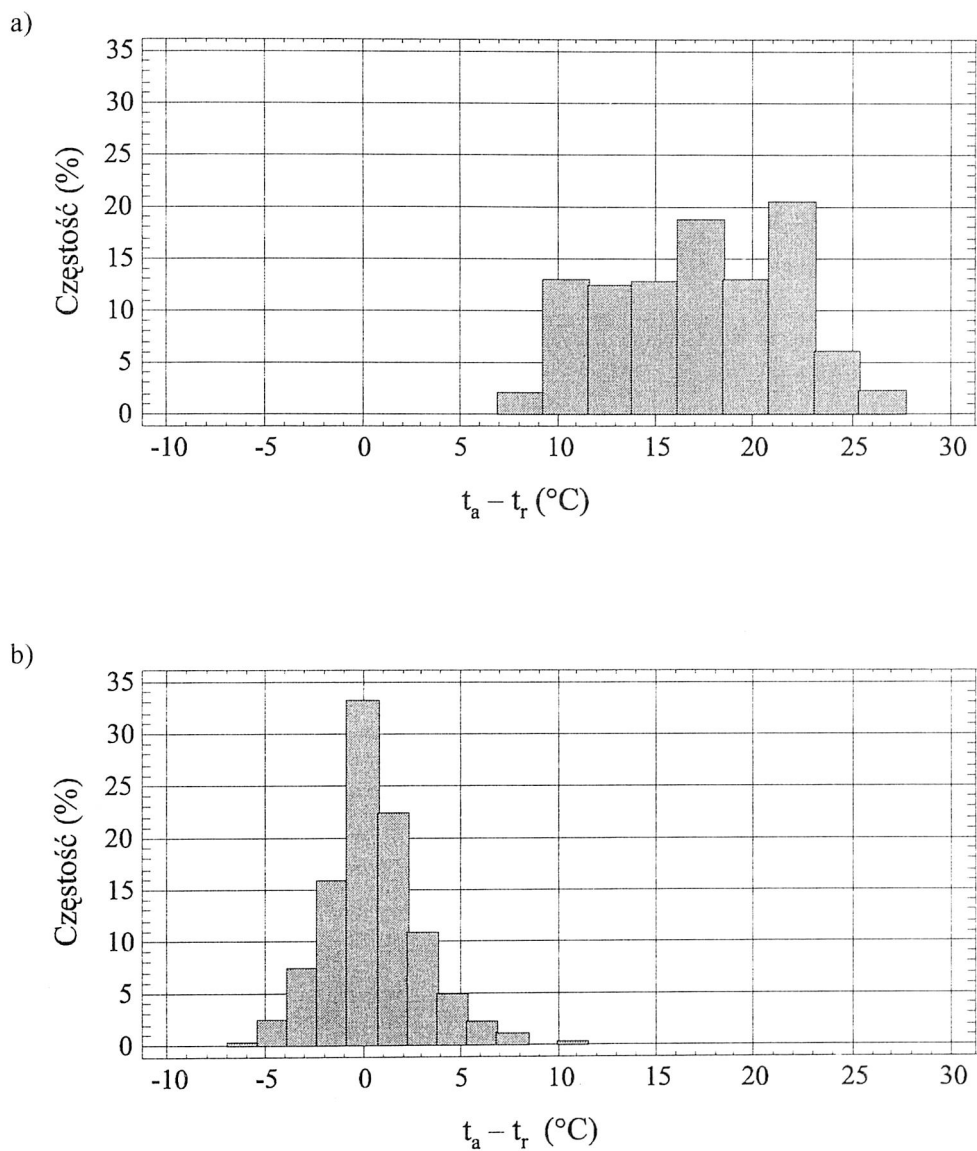


b)



Rys. 4.10. Histogram temperatury promieniowania nieboskłonu dla: a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

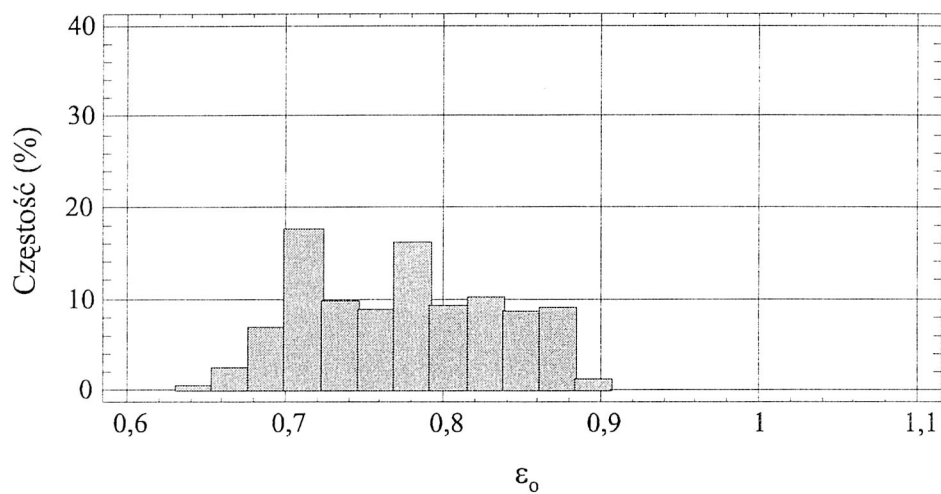
Fig. 4.10. Histogram of the sky temperature: a) for a clear sky, b) for an overcast sky



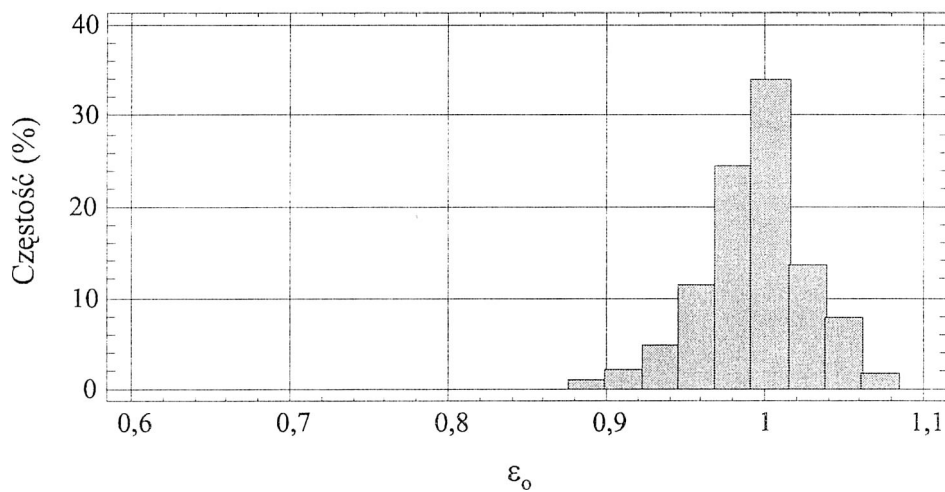
Rys. 4.11. Histogram wskaźnika temperatury promieniowania nieboskłonu dla: a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.11. Histogram of the sky temperature depression: a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



b)



Rys. 4.12. Histogram współczynnika emisyjności nieboskłonu dla:

a) nieba bezchmurnego, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 4.12. Histogram of the emissivity of the atmosphere: a) for a clear sky, b) for an overcast sky

4.3.2. Promieniowanie ciepłe środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną

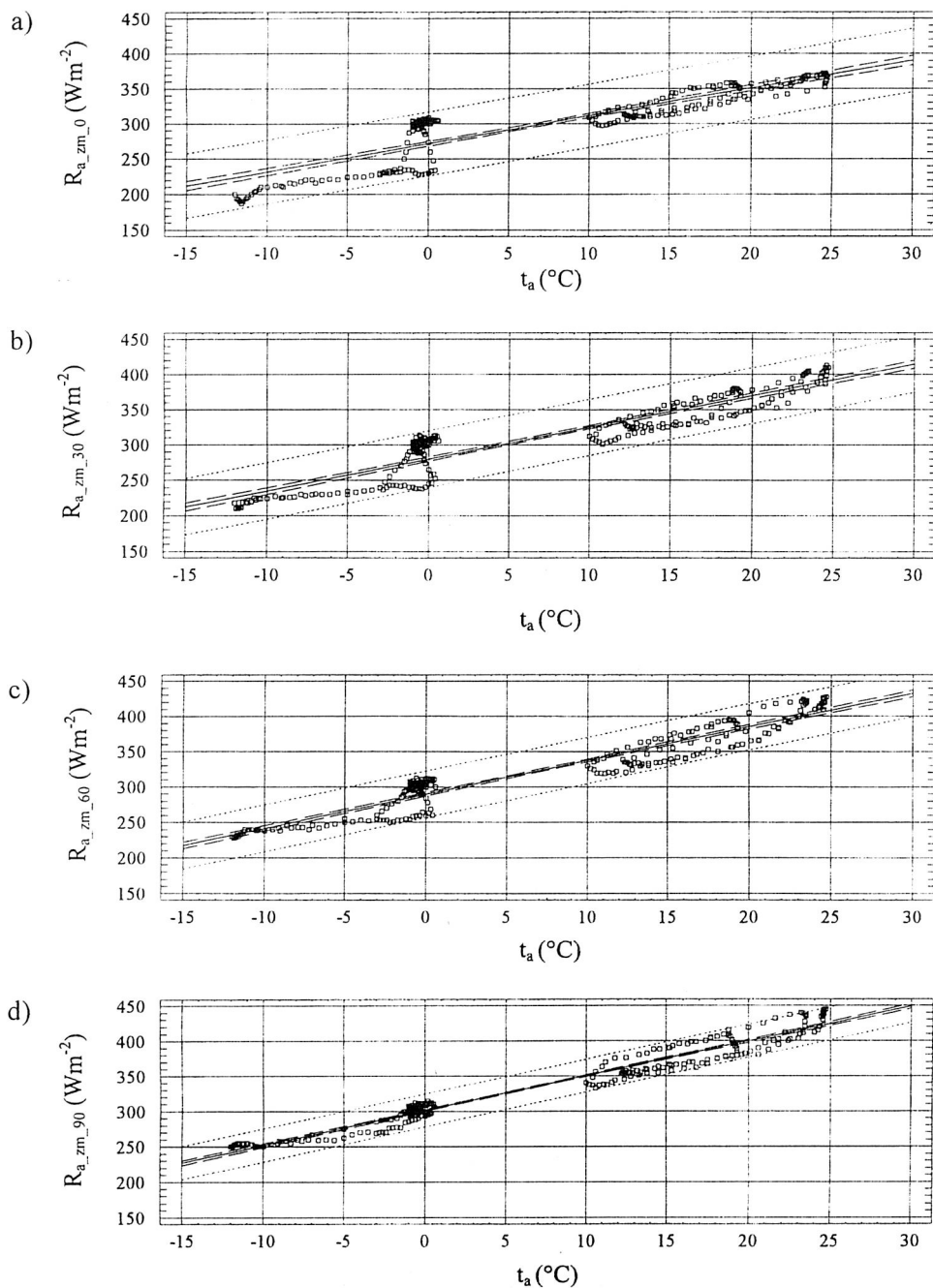
Badania eksperymentalne swoim zakresem obejmowały również pomiar natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, docierającego do płaszczyzny poziomej (0°) oraz nachylonej pod kątem 30° , 60° i 90° (płaszczyzna pionowa). W tabeli 4.2 przedstawiono zakres zmienności wybranych wielkości pomiarowych, które podobnie jak dla płaszczyzny poziomej, uznano za miarodajne do weryfikacji sformułowanego modelu matematycznego.

Rysunek 4.13 przedstawia zmienność natężenia promieniowania długofalowego w funkcji temperatury powietrza, dla różnych kątów pochylenia rozważanej płaszczyzny. Na rysunku 4.14 pokazano natomiast zmienność wartości średniej temperatury promieniowania otoczenia dla rozważanych kątów pochylenia, ściśle korespondującą z długofalowym promieniowaniem środowiska zewnętrznego. Rysunek 4.15 ilustruje histogramy zbiorów wartości natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego docierającego do pochyłonych płaszczyzn.

Tabela 4.2. Zakres wybranych wielkości pomiarowych podczas badania natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego docierającego do nachylonych płaszczyzn

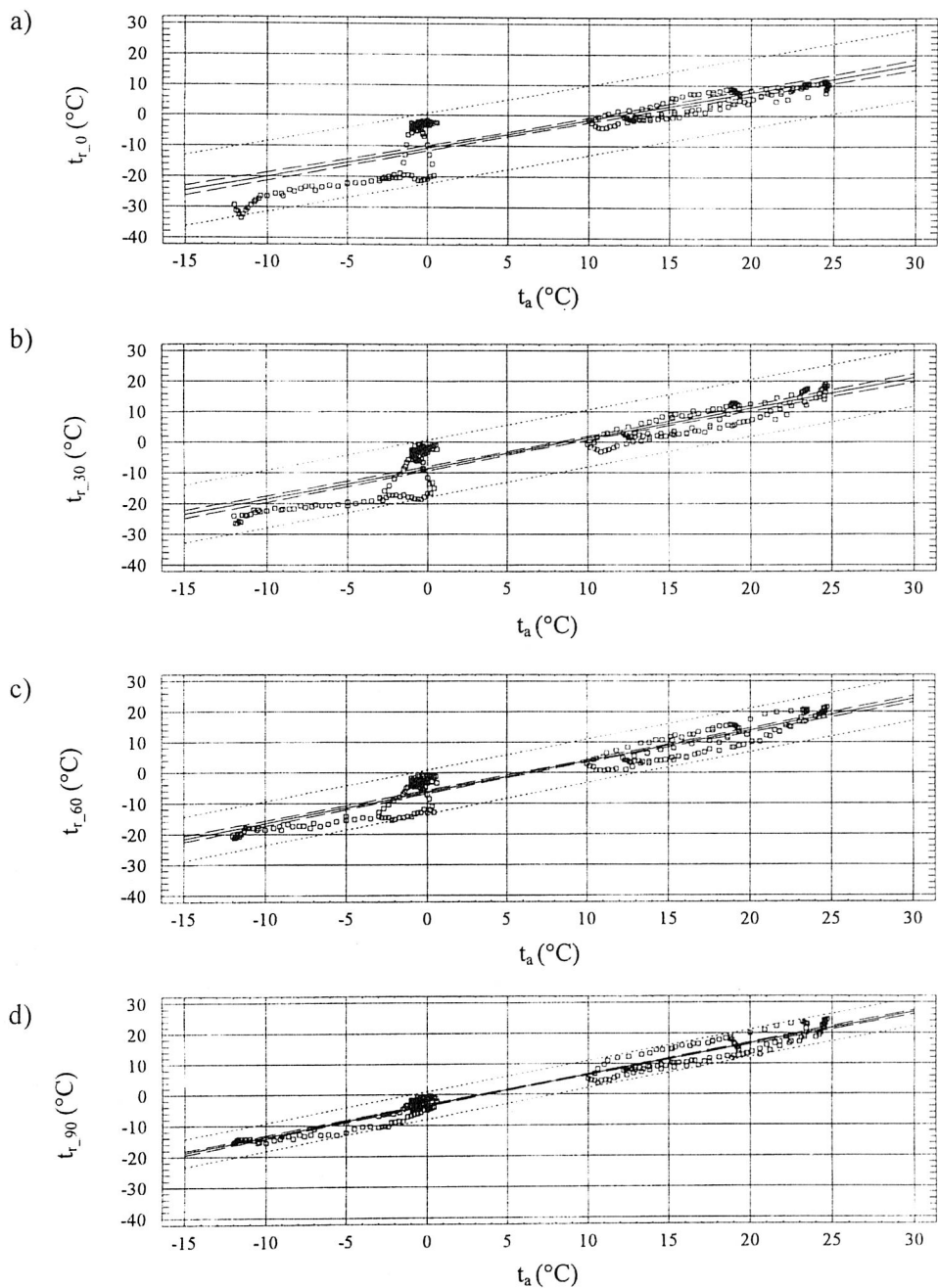
Table 4.2. The range of selected experimental values during the examination of the environmental longwave radiation incident upon inclined planes

Wielkość pomiarowa	Symbol	Jednostka	Zakres zmienności dla okresu zimy i lata przy różnym stopniu zachmurzenia nieba
Temperatura powietrza	t_a	$^\circ\text{C}$	$-12,0 \div 24,7$
Natężenie promieniowania ciepłego atmosfery na płaszczyznę poziomą	$R_{a_zm_0}$	Wm^{-2}	$187 \div 372$
Natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną pod kątem 30°	$R_{a_zm_30}$	Wm^{-2}	$210 \div 413$
Natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną pod kątem 60°	$R_{a_zm_60}$	Wm^{-2}	$228 \div 428$
Natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną pod kątem 90°	$R_{a_zm_90}$	Wm^{-2}	$250 \div 445$



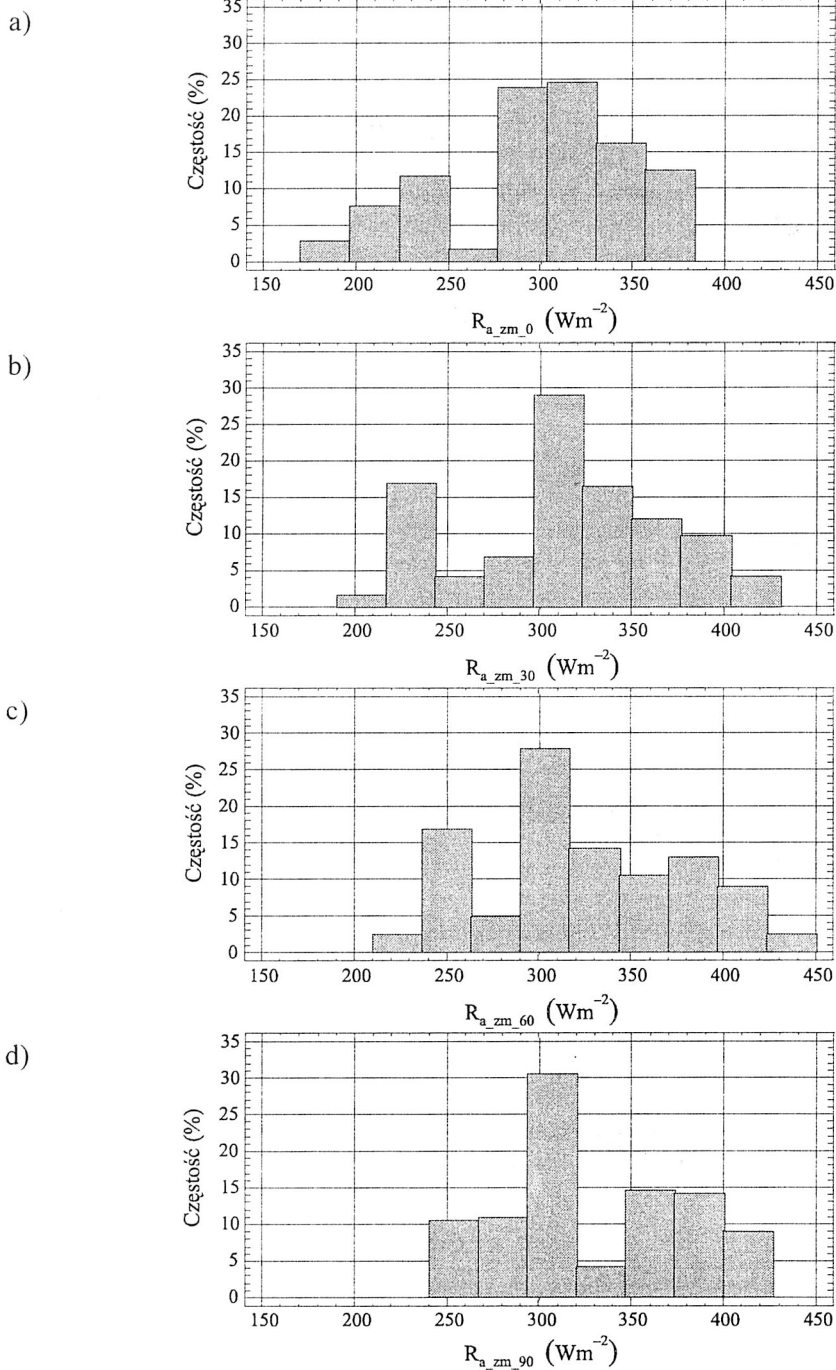
Rys. 4.13. Natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyzny nachylone w funkcji temperatury powietrza dla kątów nachylenia: a) 0° (płaszczyzna pozioma), b) 30° , c) 60° , d) 90° (płaszczyzna pionowa)

Fig. 4.13. Intensity of the environmental thermal radiation on inclined planes as the function of the air temperature for the following angles of inclination: a) 0° (horizontal plane), b) 30° , c) 60° , d) 90° (vertical plane)



Rys. 4.14. Temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego w funkcji temperatury powietrza dla kątów nachylenia płaszczyzny: a) 0° (płaszczyzna pozioma), b) 30° , c) 60° , d) 90° (płaszczyzna pionowa)

Fig. 4.14. Radiative environmental temperature as the function of the air temperature for the following angles of inclination: a) 0° (horizontal plane), b) 30° , c) 60° , d) 90° (vertical plane)



Rys. 4.15. Histogram natężenia ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego padającego na płaszczyzny nachylone pod kątem: a) 0° (płaszczyzna pozioma), b) 30°, c) 60°, d) 90° (przegroda pionowa)

Fig. 4.15. Histogram of the intensity of thermal environmental radiation falling on the planes inclined at the angle of: a) 0° (horizontal plane), b) 30°, c) 60°, d) 90° (vertical envelope)

Dane pomiarowe zawarte w tabeli 4.2 oraz wyniki pomiarów przedstawionych na rysunkach od 4.13 do 4.15 potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, że do przegród pionowych (do ścian budynków) dociera znacznie większa ilość ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego niż do poziomych lub o niewielkim kącie pochylecia stropodachów. Dla warunków bezchmurnego nieba w nocy w bilansie cieplnym ścian budynków efekt wymiany ciepła przez promieniowanie ze środowiskiem zewnętrznym jest zatem znacznie mniejszy niż dla płaszczyzn poziomych (stropodachów), ponieważ straty ciepła przez promieniowanie dla ścian są kompensowane porównywalnymi zyskami energii promieniowania pochodzącej od najbliższego otoczenia.

Przedmiotem badań były również pomiary przebiegu zmienności składowych bilansu cieplnego stropodachu pomiarowego oraz bilansu promieniowania jego powierzchni zewnętrznej. Przykładowe wyniki badań zaprezentowano w rozdziale 5.2 oraz 6.2.3, w dyskusji oceny modelu obliczeniowego bilansu cieplnego przegrody budowlanej w warunkach nieustalanej wymiany ciepła.

4.4. Empiryczne formuły obliczeniowe

Przeprowadzone badania oraz niezbędne statystyczne procedury weryfikacyjne umożliwiły sformułowanie empirycznych wyrażeń obliczeniowych na określenie wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą w funkcji takich zmiennych jak temperatura powietrza (w (°C) lub (K)), temperatura punktu rosy (°C), ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu oraz stopień zachmurzenia nieba.

Unsworth i Monteith zauważyli [184], że w zastosowaniach praktycznych natężenie promieniowania długofalowego atmosfery docierającego do płaszczyzny poziomej może być opisane funkcją liniową, w której zmiennymi są temperatura powietrza i stopień zachmurzenia nieba. W związku z tym, z wyników przeprowadzonych badań wyselekcjonowano wyniki osobno dla warunków bezchmurnego i osobno dla całkowicie zachmurzonego nieba, a następnie dla obu tych grup wyników wygenerowano wyrażenia empiryczne, które można przedstawić w postaci ogólnej:

$$R_a = a + b t_a \quad (4.1)$$

gdzie

R_a – promieniowanie długofalowe atmosfery na płaszczyznę poziomą, Wm^{-2} ,

t_a – temperatura powietrza, °C,

a, b – stałe dla danej grupy wyników badań.

Analizę statystyczną powyższej zależności liniowej dla obu grup wyników pomiarowych przeprowadzono metodami statystyki stosowanej [21]; w pierwszej kolejności dokonano estymacji parametrów modelu, a następnie zweryfikowano model. Wybrane wyniki statystycznej analizy regresji liniowej przedstawiono w tabeli 4.5., natomiast w Dodatku zawarto wyniki statystycznej analizy dopasowania postaci rozkładu do danych pomiarowych.

Dane pomiarowe pokazane na rys. 4.1a były podstawą do określenia następującego wyrażenia na obliczanie natężenia promieniowania atmosfery R_{ao} na płaszczyznę poziomą, dla warunków bezchmurnego nieba:

$$R_{ao} = 240,0 + 5,55 t_a \quad (4.2)$$

w którym t_a jest temperaturą powietrza (w °C). Dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba, na podstawie danych pomiarowych pokazanych na rys. 4.1b, wyznaczono następujące równanie na obliczanie natężenia promieniowania atmosfery R_{ac} na płaszczyznę poziomą:

$$R_{ac} = 311,0 + 5,27 t_a \quad (4.3)$$

Dla warunków częściowo zachmurzonego nieba, zakładając, że promieniowanie atmosfery jest funkcją liniową stopnia zachmurzenia, natężenie promieniowania długofalowego atmosfery można obliczyć z zależności (4.2) i (4.3) skorygowanych zależnością funkcyjną, uwzględniającą stopień zachmurzenia nieba cc :

$$R_{ac} = (240 + 5,55 t_a) (1 - cc) + (311,0 + 5,27 t_a) cc \quad (4.4)$$

Można zauważyć, że dla warunków bezchmurnego nieba ($cc = 0$) równanie (4.4) przechodzi w równanie (4.2), natomiast dla nieba całkowicie zachmurzonego ($cc = 1$) w równanie (4.3). Równanie (4.4) można również przedstawić w postaci:

$$R_{ac} = R_{ao} + (71 - 0,18 t_a) cc \quad (4.5)$$

gdzie promieniowanie atmosfery R_{ao} jest wyrażone równaniem (4.2).

Równania (4.2), (4.3) i (4.4) zostały wprowadzone do sformułowanego modelu oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek (rozdz. 4.4.1).

Wyniki badań pozwoliły także na wygenerowanie innych zależności. I tak, alternatywnym równaniem do (4.2) jest równanie:

$$R_{ao} = 5,61 \times 10^{-13} T_a^6 \quad (4.6)$$

w którym T_a jest temperaturą powietrza (w K). Natomiast dane pomiarowe przedstawione na rys. 4.3 były podstawą do wyznaczenia następującej zależności do obliczania wartości współczynnika emisyjności bezchmurnego nieba:

$$\varepsilon_o = 0,769 + 0,0072 t_{dp} \quad (4.7)$$

gdzie t_{dp} jest temperaturą punktu rosy ($^{\circ}\text{C}$). Natężenie cieplnego promieniowania atmosfery R_{ao} można następnie obliczyć z zależności (2.27)

Na podstawie danych pomiarowych przedstawionych na rys. 4.1b, dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba, niezależnie od wyrażenia (4.4.), wyprowadzono inną zależność, a mianowicie:

$$R_{ac} = 5,61 \times 10^{-13} T_a^6 + 69,3 \times cc \quad (4.8)$$

Wyrażenie (4.8) jest zatem wyrażeniem (4.6) skorygowanym o wpływ zachmurzenia nieba. Z równania (4.8) wynika, że dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba natężenie promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą było o blisko 70 Wm^{-2} większe w porównaniu z wynikami dla nieba bezchmurnego. Podobne spostrzeżenie można wysnuć analizując równanie (4.5). Jest to między innymi potwierdzeniem faktu, że chmury powodują wzrost zwrotnego promieniowania atmosfery. W praktyce oznacza to, że w warunkach całkowicie zachmurzonego nieba radiacyjne straty ciepła gruntu i stropodachów są niemal całkowicie kompensowane zyskami energii promieniowania atmosfery.

Niezależnie od równania (4.7), umożliwiające obliczanie współczynnika emisyjności bezchmurnego nieba w funkcji temperatury punktu rosy dla powietrza, przeprowadzone badania pozwoliły również określić zależności funkcyjne na obliczanie wartości tego współczynnika w funkcji ciśnienia pary wodnej e (mb) zawartej w powietrzu (dane pomiarowe na rys. 4.4a). I tak, współczynnik emisyjności może być opisany funkcją wykładniczą:

$$\varepsilon_o = 0,670 \exp(0,019 e) \quad (4.9)$$

bądź potęgową:

$$\varepsilon_o = 0,600 e^{0,134} \quad (4.10)$$

Dane pomiarowe przedstawione na rys. 4.2a pozwoliły sformułować wyrażenie na obliczanie średniej temperatury promieniowania bezchmurnego niebosłonu w postaci:

$$t_r = -19,04 + 1,33 t_a \quad (4.11)$$

gdzie t_a jest temperaturą powietrza ($^{\circ}\text{C}$). Z powyższego równania wynika, że dla warunków bezchmurnego nieba przy temperaturze powietrza np. 0°C , temperatura nieba jest o około 20°C niższa od temperatury powietrza.

Wyniki badań (rys. 4.5a) pozwoliły również określić zależność funkcyjną dla tzw. wskaźnika temperatury promieniowania nieboskłonu (rozdział 3.4.3), w postaci:

$$\Delta t_r = t_a - t_r = 17,65 - 0,518 t_{dp} \quad (4.12)$$

gdzie t_a jest temperaturą powietrza, t_r temperaturą nieboskłonu, t_{dp} jest temperaturą punktu rosy ($^{\circ}\text{C}$).

Wygenerowanie kilku alternatywnych równań na obliczanie natężenia promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą dla bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba (równania 4.2÷4.12) umożliwiły oprócz realizacji zamierzonego celu poznawczego również porównanie i przeprowadzenie dyskusji otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi przez innych autorów (rozdz. 5.1)

Ponadto, na podstawie uzyskanych wyników badań określono zależność na obliczanie natężenia promieniowania różnicowego między poziomą powierzchnią ciała doskonale czarnego, o temperaturze otaczającego powietrza, a nieboskłonem (dane pomiarowe na rys. 4.6a) w postaci:

$$R_{\text{net}} = -78,05 + 0,55 t_a \quad (4.13)$$

Znak „minus” oznacza zwrot różnicowego (wypadkowego) strumienia promieniowania długofalowego w kierunku do otoczenia.

Zakres stosowności poszczególnych formuł obliczeniowych (równania (4.1)÷(4.13)) jest jednoznacznie determinowany przez zakres warunków meteorologicznych jakie występowały w trakcie wykonywania pomiarów. Można zatem przyjąć, że wyprowadzone wyrażenia empiryczne można stosować w zakresie zmian wielkości meteorologicznych podanych w tabeli 4.1. Dotyczy to zwłaszcza zakresu zmian temperatury powietrza zewnętrznego.

Wyniki badań uzyskane dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba (stopień zachmurzenia nieba $cc = 1$) pozwoliły wyznaczyć postać wyrażen na obliczanie:

– temperatury promieniowania nieboskłonu (dane na rys. 4.2b):

$$t_r = -0,92 + 1,14 t_a \quad (4.14)$$

– współczynnika emisyjności atmosfery (dane na rys. 4.3b)

$$\varepsilon = 0,992 + 0,0025 t_{dp} \quad (4.15)$$

– wskaźnika temperatury promieniowania nieboskłonu (dane na rys. 4.5b):

$$\Delta t_r = t_a - t_r = 0,545 - 0,169 t_{dp} \quad (4.16)$$

– oraz natężenia promieniowania różnicowego (dane na rys. 4.6b):

$$R_{\text{net}} = -3,88 + 0,59 t_a \quad (4.17)$$

Przedstawione wyżej wyrażenia empiryczne, od (4.14) do (4.17), powstałe na podstawie uzyskanych danych pomiarowych dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba, mają znaczenie nie tylko poznawcze, ale również informacyjne i sprawdzające poprawność przeprowadzonych badań. Wiadomo bowiem, co sygnalizowano już wcześniej, że przy całkowitym zachmurzeniu nieba w obliczeniach z zakresu fizyki budowli najczęściej przyjmuje się, że temperatura promieniowania nieboskłonu i temperatura powietrza są sobie równe (co potwierdza postać równania (4.14)), współczynnik emisyjności atmosfery jest równy 1,0 (równanie (4.15)), różnica temperatury promieniowania nieba i temperatury powietrza jest bliska zeru i wreszcie promieniowanie różnicowe również jest bliskie zeru (4.17). Równania od (4.14) do (4.17) oraz otrzymywane na ich podstawie wyniki można zatem traktować jako potwierdzenie poprawności metodyki przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

4.5. Model obliczeniowy

4.5.1. Założenia i postać modelu

W celu sformalizowania matematycznego oraz określenia zakresu stosowalności modelu oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek przyjęto następujące założenia:

1. Wartość natężenia promieniowania cieplnego atmosfery określa się na podstawie standardowo mierzonych wielkości na stacjach meteorologicznych, takich jak temperatura powietrza, temperatura punktu rosy, stopień zachmurzenia nieba i inne. W przypadku posiadania archiwalnej bazy danych meteorologicznych dla danej lokalizacji, możliwe byłoby uzupełnienie tej bazy o wartości promieniowania cieplnego atmosfery docierającego do powierzchni gruntu.

2. Model obliczeniowy określa wartość natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną w zakresie od 0° (płaszczyzna pozioma) do 90° (płaszczyzna pionowa) dla dowolnego stopnia zachmurzenia nieba.

3. Pomija się wpływ ewentualnych przewodów sieci ciepłowniczej biegnących pod powierzchnią gruntu na wartość emitowanego przez grunt natężenia promieniowania cieplnego.

4. Zakres stosowalności wygenerowanych empirycznych formuł obliczeniowych jest jednoznacznie zdeterminowany przez zakres zmienności elementów meteorologicznych występujących w trakcie wykonywania pomiarów.

5. Wyniki obliczeń sformułowanego modelu matematycznego mogą być wprost zastosowane do analizy bilansu cieplnego przegród budowlanych i budynków, dla warunków ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła.

Natężenie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego $R(\beta)$, docierającego do powierzchni nachylonej pod kątem β względem poziomu jest sumą promieniowania atmosfery $R_A(\beta)$ oraz promieniowania gruntu $R_G(\beta)$:

$$R(\beta) = R_A(\beta) + R_G(\beta) \quad (4.18)$$

Promieniowanie atmosfery oblicza się ze wzoru [36]:

$$R_A(\beta) = (1/\pi) \int_0^{\pi/2} \left(R(z) \sin z \int_{-\gamma}^{+\gamma} (\cos i \, d\phi) \right) dz \quad (4.19)$$

gdzie:

$$\cos i = \cos z \cos \beta + \sin z \sin \beta \cos \phi \quad (4.20)$$

$$R(z) = [a + b \ln(u \sec z)] \sigma T_a^4 \quad (4.21)$$

gdzie u jest grubością warstwy wody zawartej w zenitowym słupie powietrza, a i b są współczynnikami o wartościach: $a = 0,70 \pm 0,05$, $b = 0,09 \pm 0,002$. Oznaczenia poszczególnych kątów pokazano na rys. 4.16. Równanie (4.19) można przedstawić następująco:

$$R_A(\beta) = (1/\pi) \int_0^{\pi/2} \left(R(z) \sin z \int_{-\gamma}^{+\gamma} (\cos z \cos \beta + \sin z \sin \beta \cos \phi \, d\phi) \right) dz \quad (4.22)$$

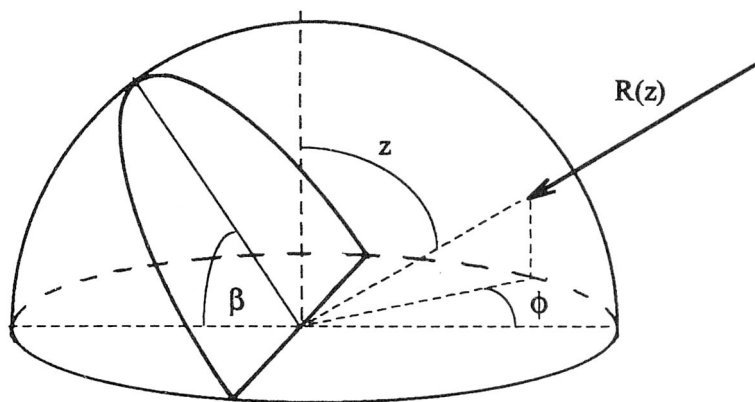
Przy rozwiązywaniu równania (4.22) należy zastosować następujące warunki brzegowe:

- (1) $\beta = 0^\circ$ (płaszczyzna pozioma) $\gamma = +\pi$
- (2) $\beta = 90^\circ$ (płaszczyzna pionowa) $\gamma = +\pi/2$
- (3) jeżeli (a) $(90-z) \geq \beta$, $\gamma = +\pi$
 (b) $(90-z) < \beta$, $\gamma = \cos^{-1}(1/\tan z \tan \beta)$

Rozwiązanie równania (4.22) z powyższymi warunkami brzegowymi prowadzi do następującego wyrażenia:

$$R_A(\beta) = [(a + b \ln u) K_1 + b K_2] \sigma T_a^4 \quad (4.23)$$

gdzie K_1 i K_2 są współczynnikami zależnymi od kąta pochylenia β rozważanej płaszczyzny (tab. 4.1).



Rys. 4.16. Oznaczenia kątów do określenia wartości natężenia promieniowania długofalowego docierającego do nachylonej płaszczyzny

Fig. 4.16. Denotation of angles used for calculation of the intensity of longwave radiation incident upon inclined surface

Wielkość $\ln u$ można obliczyć ze wzoru [36]:

$$\ln u = [(R_A / \sigma T_a^4) - a] / b + 0,5 \quad (4.24)$$

zatem:

$$R_A(\beta) = R_A K_1 + (K_2 - 0,5 K_1) b \sigma T_a^4 = R_A K_1 + K_3 b_1 \sigma T_a^4 \quad (4.25)$$

gdzie $K_3 = K_2 - 0,5 K_1$.

Wartości współczynników kątowych K_1 , K_2 i K_3 dla kąta β pochylenia płaszczyzny zawartego pomiędzy 0° i 90° przedstawiono w tabeli 4.3.

Wartość współczynnika b_1 , uwzględniającego między innymi stopień zachmurzenia nieba, oblicza się ze wzoru:

$$b_1 = b (1 - n \times cc) \quad (4.26)$$

w którym wartość współczynnika n wyznaczono na podstawie wykonanych przez autora niniejszej pracy pomiarów w różnych porach roku. Korzystając z równania (4.2) na obliczanie natężenia cieplnego promieniowania atmosfery dla bezchmurnego nieba R_{ao} oraz z równania (4.3) dla nieba całkowicie zachmurzonego R_{ac} można obliczyć pozorną emisyjność nieboskłonu ze wzorów:

$$\varepsilon_o = R_{ao} / \sigma T_a^4 \quad (4.27)$$

$$\varepsilon_a = R_{ac} / \sigma T_a^4 \quad (4.28)$$

Tabela 4.3. Wartości współczynników K_1 , K_2 i K_3
dla różnych kątów nachylenia płaszczyzny [36]
Table 4.3. Values of K_1 , K_2 and K_3 as a function of surface inclination [36]

Pochylenie płaszczyzny	Współczynniki kątowe		
	K_1	K_2	K_3
0	1,0000	0,5000	0,0000
10	0,9924	0,5184	0,0221
20	0,9698	0,5523	0,0613
30	0,9330	0,5890	0,1225
40	0,8830	0,6214	0,1798
50	0,8214	0,6447	0,2339
60	0,7500	0,6554	0,2803
70	0,6710	0,6514	0,3159
80	0,5868	0,6315	0,3381
90	0,5000	0,5957	0,3457

Wielkości te powiązane są ze sobą następującą zależnością [184]:

$$\varepsilon_o = (1 - n \times cc) \varepsilon_a + n \times cc \quad (4.29)$$

W tabeli 4.4. przedstawiono obliczone na podstawie równania (4.29) wartości współczynnika n .

Tabela 4.4. Wartości współczynnika n w funkcji temperatury powietrza
(obliczone na podstawie danych pomiarowych)
Table 4.4. Values of the coefficient n as a function of the air temperature
(based on measured data)

Temperatura powietrza	Współczynnik emisyjności niebosłonu bezchmurnego	Współczynnik emisyjności niebosłonu całkowicie zachmurzonego	Współczynnik
t_a	ε_o	ε_a	n
-10	0,6786	0,9500	0,8445
-5	0,7240	0,9710	0,8949
0	0,7604	0,9853	0,9387
5	0,7889	0,9940	0,9715
10	0,8108	0,9979	0,9890
15	0,8270	0,9978	0,9875
20	0,8382	0,9944	0,9655

Współczynnik n , na podstawie danych pomiarowych, może być przedstawiony funkcją liniową w postaci:

$$n = 0,9203 + 0,0043 t_a \quad (4.30)$$

Równanie (4.26) można zatem zapisać:

$$b_1 = 0,09 [1 - (0,9203 + 0,0043 t_a) cc] \quad (4.31)$$

gdzie:

t_a – temperatura powietrza, °C,

cc – stopień zachmurzenia nieba (0,0 dla nieba bezchmurnego, 1,0 dla nieba całkowicie zachmurzonego),

Dla warunków bezchmurnego nieba ($cc = 0$) wyrażenie (4.26) można zapisać jako:

$$b_1 = b \quad (4.32)$$

Wyznaczając wielkości R_A we wzorze (4.25) korzysta się z zależności:

$$R_A = R_{ao} (1 - cc) + R_{ac} cc \quad (4.33)$$

gdzie:

R_{ao} – natężenie promieniowania cieplnego atmosfery, docierającego do płaszczyzny poziomej przy bezchmurnym niebie, Wm^{-2} ,

R_{ac} – j.w., lecz przy niebie całkowicie zachmurzonym, Wm^{-2} .

Promieniowanie R_{ao} jest obliczane z równania (4.2), a R_{ac} z równania (4.3). Można też zauważyć, że po podstawieniu tych wyrażeń do (4.33) uzyskamy równanie (4.4).

Promieniowanie gruntu $R_G(\beta)$ docierające do płaszczyzny pochylonej pod kątem β względem poziomu (równanie (4.18)) oblicza się ze wzoru:

$$R_G(\beta) = R_G \sin^2 (\beta / 2) = \varepsilon_g \sigma T_g^4 \sin^2 (\beta / 2) \quad (4.34)$$

w którym ε_g jest emisyjnością, T_g temperaturą (K) gruntu. Podobnie jak w przypadku składowej promieniowania atmosfery (równanie (4.1)) możliwe jest również zastąpienie wielkości R_G alternatywną funkcją liniową, która ma postać:

$$R_G = I_g + m_g t_a \quad (4.35)$$

gdzie I_g oraz m_g są stałymi, wyznaczanymi na podstawie badań, t_a jest temperaturą powietrza (°C). Dla gruntu pokrytego płytą betonową wielkość R_G wynosi:

$$R_G = 159,5 + 2,77 t_a \quad (4.36)$$

Równanie to znacznie ułatwia obliczenia z uwagi na wyeliminowanie konieczności określania wartości współczynnika emisyjności oraz temperatury gruntu. Do obliczeń podstawia się wartość $2R_G$ [36].

Zaprezentowany wyżej model długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego wokół budynku umożliwia obliczanie natężenia tego promieniowania, docierającego do płaszczyzn nachylonych pod kątem w zakresie od 0° (płaszczyzna pozioma) do 90° (płaszczyzna pionowa) w funkcji wartości temperatury powietrza i stopnia zachmurzenia nieba oraz wartości współczynników empirycznych, charakterystycznych dla miejsca wykonywania pomiarów, ustalonych na podstawie badań przez autora niniejszej pracy. Możliwe jest również wprowadzenie do modelu wygenerowanych przez autora empirycznych wyrażeń alternatywnych, w których natężenie promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą, przy bezchmurnym niebie, jest funkcją temperatury punktu rosy lub ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu. Model pozwala zatem obliczać wartość natężenia promieniowania cieplnego dla różnych warunków pogodowych (różnych pór roku). W przypadku powierzchni pochylonych należy również uwzględnić emisyjność i temperaturę gruntu, przy czym możliwe jest zastąpienie tych wielkości alternatywną empiryczną funkcją liniową, w której zmienną jest jedynie temperatura powietrza. Z uwagi na jednorodny kątowny rozkład promieniowania nieboskłonu, zarówno przy niebie bezchmurnym jak i całkowicie zachmurzonym, natężenie promieniowania cieplnego atmosfery, docierające do rozważanej płaszczyzny, nie zależy od jej zorientowania względem stron świata.

4.5.2. Weryfikacja modelu

Poniżej przedstawiono porównanie wyników obliczeń otrzymanych z wygenerowanych według opisu w rozdziale 4.3 wyrażeń empirycznych oraz według sformułowanego modelu obliczeniowego z wynikami uzyskanymi z pomiarów. I tak, rys. 4.17 zawiera porównanie wyników dla warunków bezchmurnego nieba, a rys. 4.18 dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba. Na rysunku 4.17 zastosowano następujące oznaczenia:

$R_{a_obl_1}$ – wyniki otrzymane z równania (4.2),

$R_{a_obl_2}$ – wyniki otrzymane z równania (4.6),

$R_{a_obl_3}$ – wyniki otrzymane z równania (4.7).

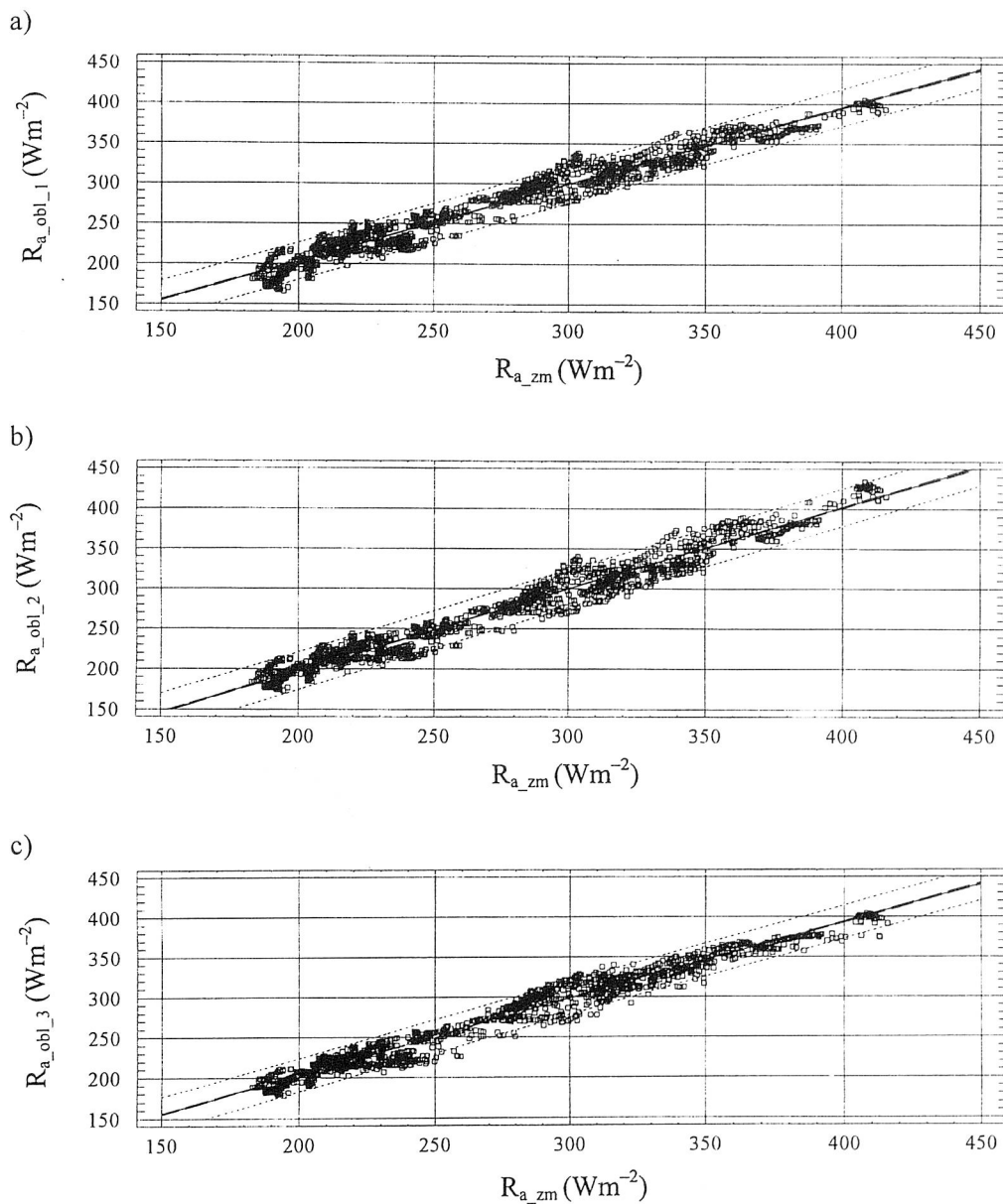
Na rysunku 4.18 zastosowano następujące oznaczenia:

$R_{a_obl_4}$ – wyniki otrzymane z równania (4.3),

$R_{a_obl_5}$ – wyniki otrzymane z równania (4.8),

W tabeli 4.5 przedstawiono zestawienie wybranych wyników statystycznej analizy regresji liniowej dla danych pomiarowych pokazanych na rys. 4.17 i 4.18.

Na rysunku 4.19 przedstawiono porównanie danych pomiarowych dla płaszczyzny poziomej oraz nachylonej pod kątem 30° , 60° i 90° z wynikami obliczeń uzyskanymi według sformułowanego modelu obliczeniowego. W tabeli 4.6 zestawiono wybrane wyniki analizy statystycznej.



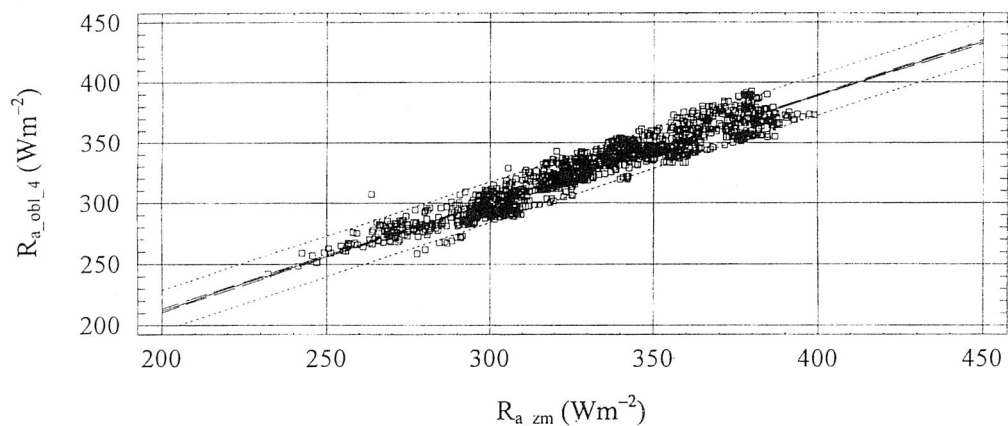
Rys. 4.17. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń natężenia promieniowania ciepłnego atmosfery na płaszczyznę poziomą, według różnych równań dla warunków bezchmurnego nieba:

a) równ. (4.2), b) równ. (4.6), c) równ. (4.7)

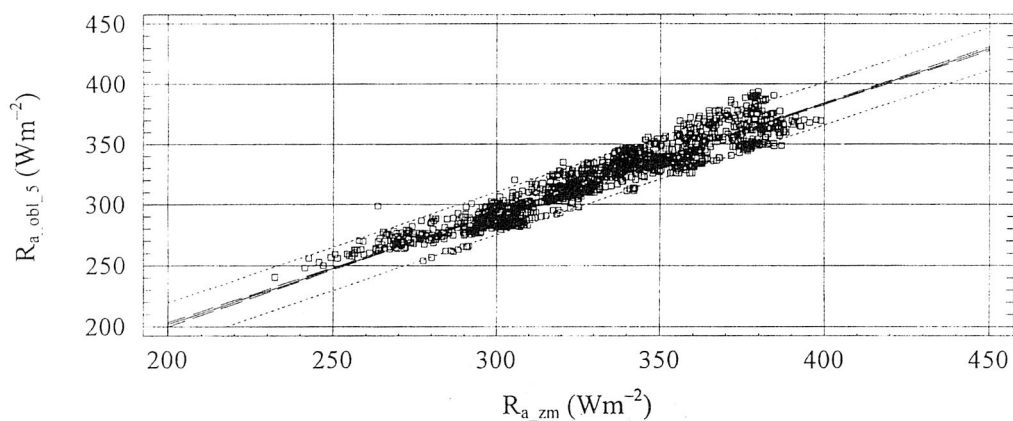
Fig. 4.17. Comparison of calculation results and the results of measurements of the atmospheric thermal radiation intensity incident on a horizontal plane for a clear sky according to various equations:

a) Eq. (4.2), b) Eq. (4.6), c) Eq. (4.7)

a)

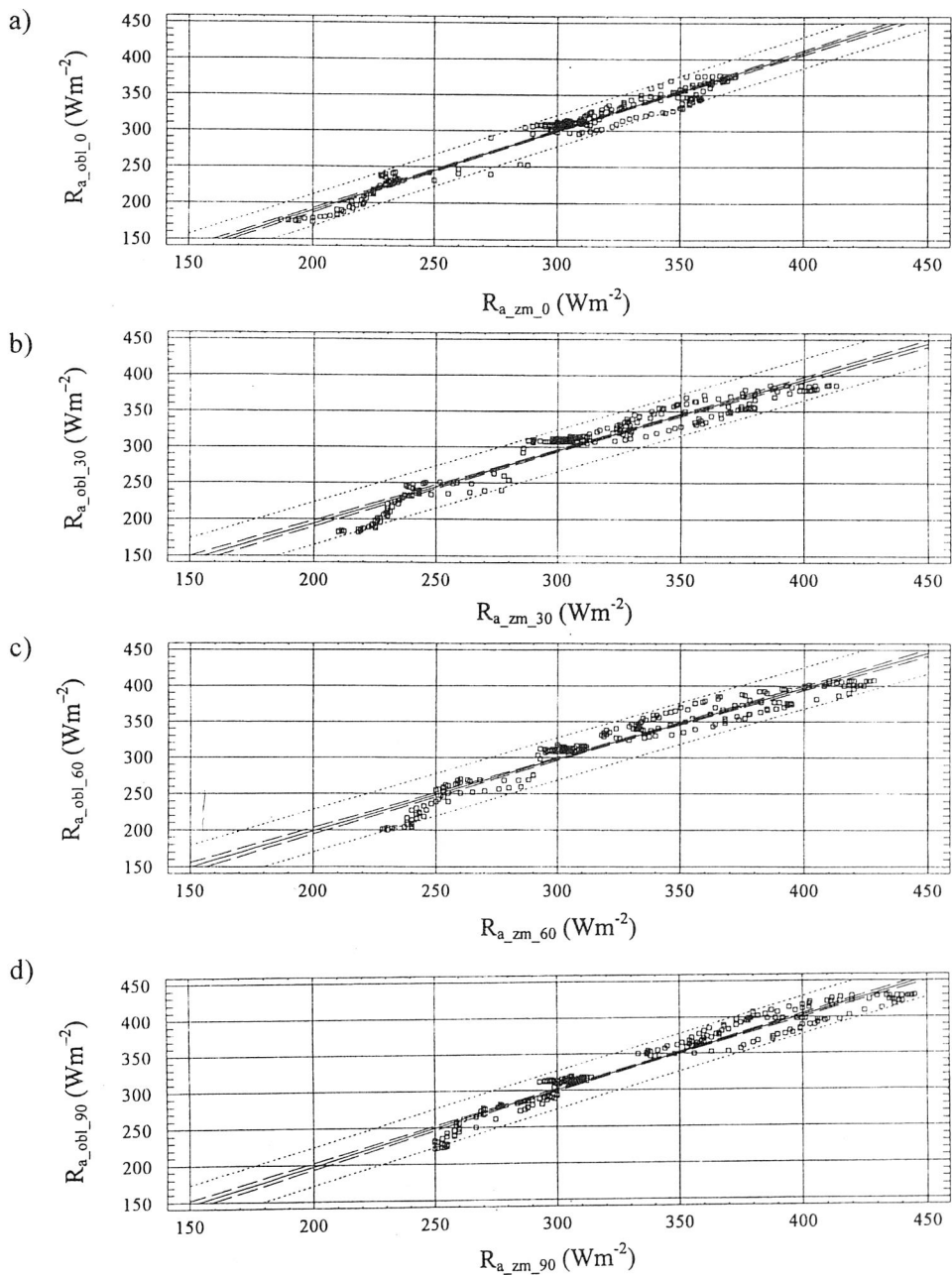


b)



Rys. 4.18. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń natężenia promieniowania ciepłego atmosfery na płaszczyznę poziomą, według różnych równań dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba: a) równ. (4.3), b) równ. (4.8)

Fig. 4.18. Comparison of the calculation results and the results of measurements of the atmospheric thermal radiation intensity incident on a horizontal plane for an overcast sky according to various equations: a) Eq. (4.3), b) Eq. (4.8)



Rys. 4.19. Porównanie wyników obliczeń natężenia ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyzny pochylone z wartościami zmierzonymi, dla różnych kątów nachylenia:

a) 0° (płaszczyzna pozioma), b) 30° , c) 60° , d) 90° (płaszczyzna pionowa)

Fig. 4.19. Comparison of the calculation results and the results of measurements of the environment thermal radiation intensity incident on inclined planes for various angles of inclination

a) 0° (horizontal plane), b) 30° , c) 60° , d) 90° (vertical plane)

Tabela 4.5. Wyniki analizy statystycznej regresji liniowej (równanie ogólne: $R_{zm} = a + bR_{obl}$) dla płaszczyzny poziomej dla wyników pomiarów i obliczonych według podanych równań
 Table 4.5. Results of the statistical analysis (general equation: $R_{zm} = a + bR_{obl}$) for a horizontal plane for the measured data as well as for those calculated from the equations applied

Nr równania	Współcz. a ($W\ m^{-2}$)	Współcz. b	Współcz. korelacji	Odchylenie standardowe R_{zm}	Odchylenie standardowe współcz. a	R^2 (%)
nieboskłon bezchmurny						
(4.2)	11,34	0,96	0,980	11,91	0,880	96,03
(4.6)	-6,72	1,089	0,982	12,03	0,883	96,46
(4.7)	12,69	0,95	0,984	10,54	0,779	96,82
nieboskłon całkowicie zachmurzony						
(4.3)	42,2	0,87	0,941	9,58	1,64	88,49
(4.8)	25,7	0,92	0,951	9,10	1,56	90,51

Tabela 4.6. Wyniki analizy statystycznej regresji liniowej (równanie ogólne: $R_{zm} = a + bR_{obl}$) dla płaszczyzn nachylonych dla wyników pomiarów i obliczonych według modelu
 Table 4.6. Results of the statistical analysis (general equation: $R_{zm} = a + bR_{obl}$) for inclined planes for the measured data as well as for those calculated from the model applied

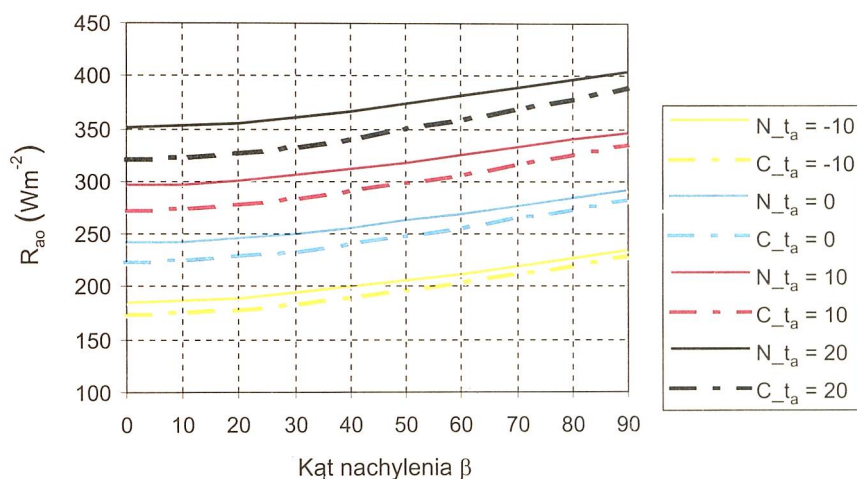
Kąt pochylenia	a ($W\ m^{-2}$)	b	Współcz. korelacji	Odchylenie standardowe R_{zm}	Odchylenie standardowe współcz. a	R^2 (%)
0°	-29,55	1,10	0,980	10,97	4,30	96,03
30°	-6,35	1,00	0,964	14,66	5,54	92,98
60°	1,20	0,98	0,965	14,72	5,56	93,20
90°	-7,00	1,02	0,974	13,30	5,19	94,81

Porównanie danych pomiarowych z wynikami obliczeń oraz zestawienie wyników analizy statystycznej adekwatności modelu obliczeniowego upoważniają do stwierdzenia, że zweryfikowany model można uznać za miarodajny i wystarczająco dokładny do obliczania wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery i najbliższego otoczenia budynku.

4.5.3. Porównanie z wynikami wg modelu Cole'a

Wartości natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego oddziałującego na budynek, a w tym promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą, uzyskiwane na podstawie modelu obliczeniowego zaproponowanego w tej pracy, są większe od wartości otrzymywanych z będącego pierwowzorem modelu Cole'a [36]. Prawdopodobnie ta występuje dla otrzymanych wyników zarówno w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego jak i kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny. Na rysunku 4.20 pokazano wyniki obliczeń wg modelu Cole'a (oznaczone przez C) oraz wyniki otrzyma-

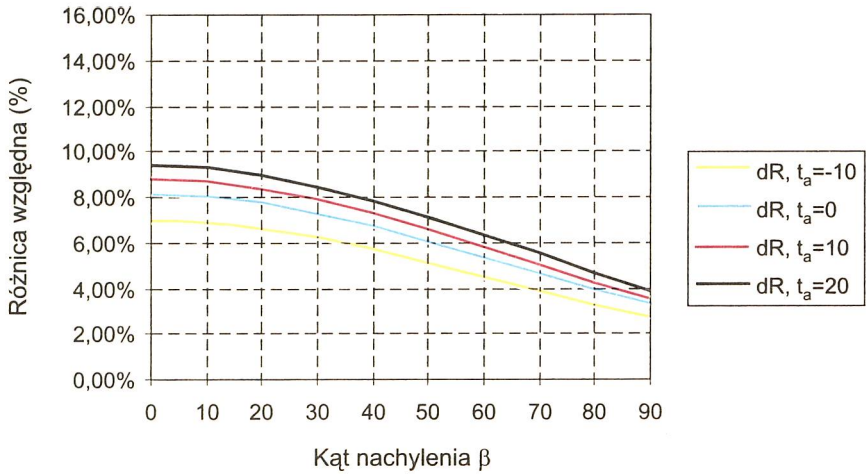
ne przez autora niniejszej pracy (oznaczone przez N) dla różnych wartości temperatury powietrza i kąta pochylenia, zmieniającego się od 0° (płaszczyzna pozioma) do 90° (płaszczyzna pionowa), dla warunków bezchmurnego nieba. Na rysunku 4.21 przedstawiono, korespondujące z wynikami na rys. 4.20, względne procentowe różnice wyników obu modeli odniesione do wyników wg modelu Cole'a. Analiza danych na obu wykresach prowadzi do wniosku, że największe różnice w wynikach obu modeli, dla bezchmurnego nieba, występują przy kącie pochylenia płaszczyzny do około 20° i że są one największe przy wyższych temperaturach powietrza, tj. dla 10 i 20°C . Wyniki otrzymane z modelu autora niniejszej pracy dla płaszczyzny poziomej są większe od około 7 do 9% od wyników Cole'a, w zależności od temperatury powietrza (rys. 4.21). Dla płaszczyzny pionowej różnice te są mniejsze i wynoszą odpowiednio od 3 do 4%.



Rys. 4.20. Porównanie wyników obliczeń natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego dla warunków bezchmurnego nieba w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny i temperatury powietrza zewnętrznego według modelu Cole'a (C) i Nowaka (N)

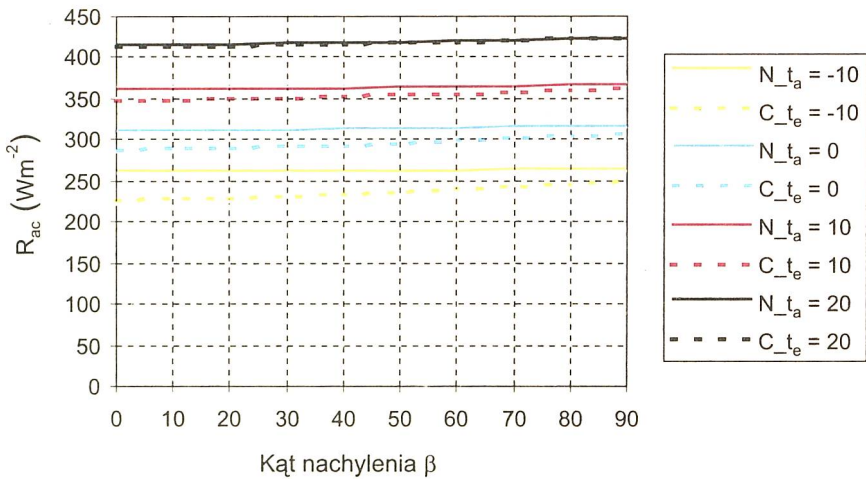
Fig. 4.20. Comparison of calculation results and the results of measurements of environmental thermal radiation intensity for a clear sky as a function of the inclination angle of a plane and the ambient air temperature according to the models of Cole (C) and of Nowak (N)

Na rysunkach 4.22 i 4.23 pokazano, że w układzie analogicznym do wyżej przedstawionego, porównanie wyników obliczeń wg obu modeli dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba. W tym wypadku największe różnice występują również dla płaszczyzny poziomej, ale dla najniższej analizowanej temperatury powietrza (-10°C). Wyniki otrzymane z modelu autora tej pracy dla płaszczyzny poziomej są większe od około 1 do 16% od wyników Cole'a, w zależności od temperatury powietrza. Dla płaszczyzny pionowej różnice te są mniejsze i wynoszą odpowiednio od 0 do 6%.



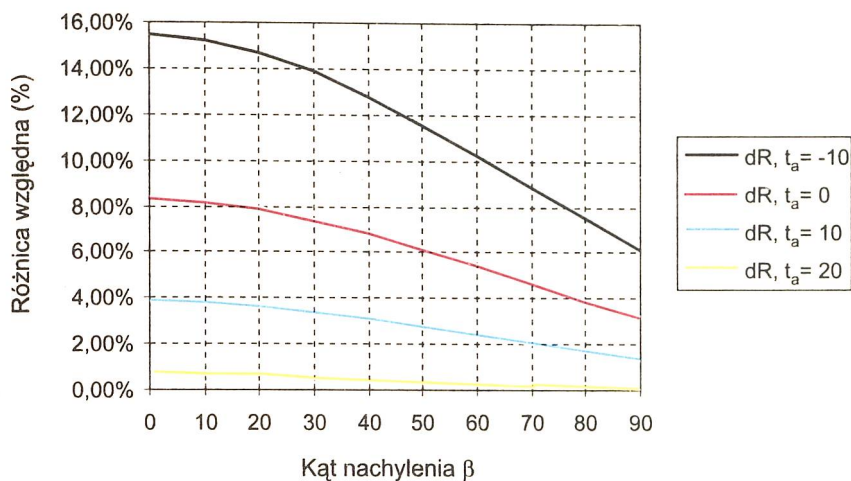
Rys. 4.21. Procentowe różnice w wynikach obliczeń według porównywanych modeli obliczeniowych dla bezchmurnego nieba odniesione do wyników według modelu Cole'a

Fig. 4.21. Percentage differences in the results of calculations according to mathematical models under investigation for a clear sky related to the model of Cole



Rys. 4.22. Porównanie wyników obliczeń natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba, w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny i temperatury powietrza zewnętrznego, wg modelu Cole'a (C) i Nowaka (N)

Fig. 4.22. Comparison of the calculation results of the intensity of longwave environmental radiation for an overcast sky as a function of the inclination angle of a plane and the ambient air temperature according to the models of Cole (C) and of Nowak (N)



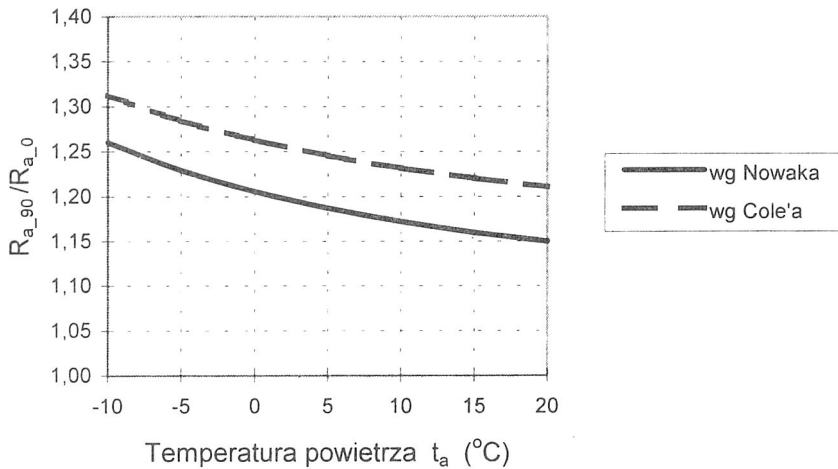
Rys. 4.23. Procentowe różnice w wynikach porównywanych modeli obliczeniowych dla zachmurzonego nieba odniesione do wyników według modelu Cole'a

Fig. 4.23. Percentage differences in the results of calculations according to mathematical models under investigation for an overcast sky related to the model of Cole

Na rysunku 4.24 przedstawiono wyniki analizy obliczeniowej, w której porównywano stosunek natężenia promieniowania długofalowego, docierającego do płaszczyzny pionowej do natężenia promieniowania długofalowego, docierającego do płaszczyzny poziomej, w funkcji temperatury powietrza. Naturalnie, wyniki te ściśle korespondują z wynikami przedstawionymi na rys. 4.20. Z wykresów tych wynika, że promieniowanie bezchmurnego niebosłonu na płaszczyznę poziomą (wg modelu obliczeniowego autora tej pracy) w zależności od temperatury powietrza, jest od 15 do 25% mniejsze niż promieniowanie długofalowe środowiska zewnętrznego na płaszczyznę pionową. Według modelu Cole'a wartości te wynoszą odpowiednio od ok. 21 do 32%.

W podsumowaniu przeprowadzonej analizy porównawczej obu modeli obliczeniowych należy stwierdzić, że wartości natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego uzyskiwane z obliczeń wg modelu autora niniejszej pracy są wyższe niż otrzymywane wg modelu Cole'a, zarówno dla bezchmurnego jak i całkowicie zachmurzonego nieba. Powodem wykazanej prawidłowości prawdopodobnie jest to, że autor niniejszej pracy wykonał badania w dużym kilkuset tysięcznym mieście, o stosunkowo dużym zanieczyszczeniu atmosfery, co jest ściśle związane z powszechnie znanym efektem „wyspy ciepła”. Cole natomiast przeprowadził badania poza gęstą zabudową miejską, przy mniejszym zanieczyszczeniu powietrza.

Stwierdzony we Wrocławiu zwiększony strumień promieniowania ciepłego atmosfery, w odniesieniu do pomiarów wykonanych przez Cole'a, w praktyce oznacza nieco mniejsze radiacyjne starty ciepła gruntu i poziomych przegród budowlanych zlokalizowanych we Wrocławiu oraz oznacza, że tak zwana „temperatura otoczenia” jest nieco wyższa niż wynikałoby to z rezultatów obliczeń wg modelu Cole'a.



Rys. 4.24. Porównanie wyników obliczeń dla bezchmurnego nieba według obu modeli; dane na wykresach odpowiadają danym z rys. 4.20

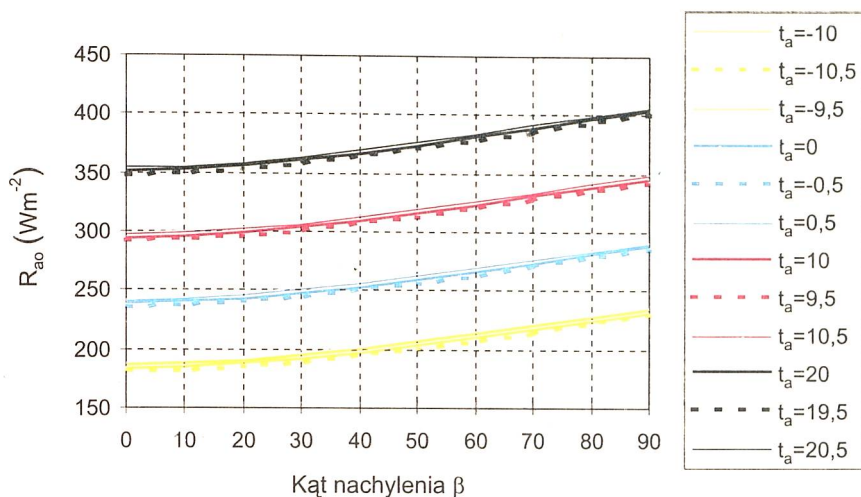
Fig. 4.24. Comparison of the calculation results for a clear sky according to both models; the data in the picture correspond to those in fig. 4.20

Przedstawione wyżej prawidłowości i wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy porównawczej wyników obliczeń dwóch modeli, dla płaszczyzn pochylonych w przedziale od 0° do 90° , potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenie, że dla danej lokalizacji wybór empirycznego modelu oddziaływania ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek powinien być dokonany na bazie stosownych pomiarów i wykazaniu zgodności wyników modelu z danymi pomiarowymi. W razie braku takiej zgodności należy na podstawie pomiarów sformułować model obliczeniowy adekwatny do danej lokalizacji. Przyjęcie bowiem istniejącego modelu obliczeniowego, opracowanego dla zupełnie innej lokalizacji, bez weryfikacji doświadczalnej może prowadzić do błędów w określaniu składowych bilansu promieniowania oraz bilansu ciepłego przegród budowlanych i budynków.

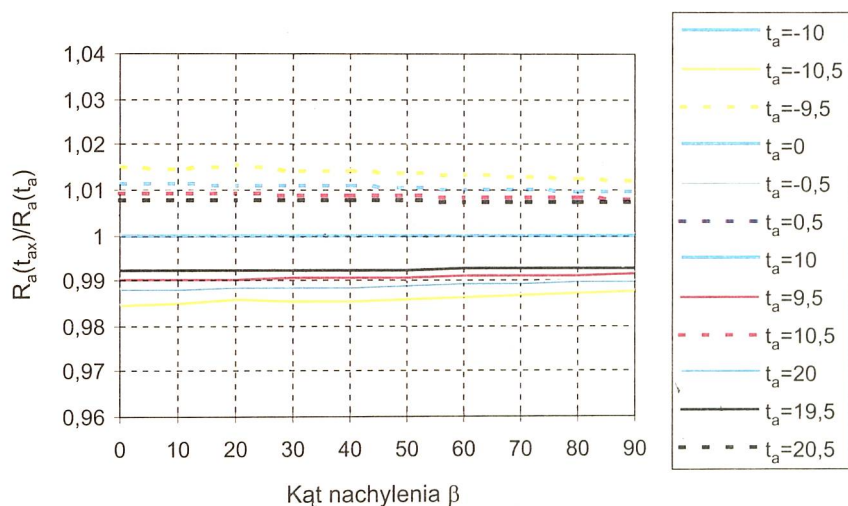
4.6. Analiza wrażliwości modelu obliczeniowego

Zaproponowany w niniejszej pracy model oddziaływania ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek umożliwia obliczanie natężenia tego promieniowania w funkcji pochyleń rozważanej płaszczyzny, temperatury powietrza oraz stopnia zachmurzenia nieba. Interesującą wydaje się być odpowiedź na pytanie o wpływ zmiany wartości wymienionych elementów na końcowe wyniki otrzymywane z modelu.

a)



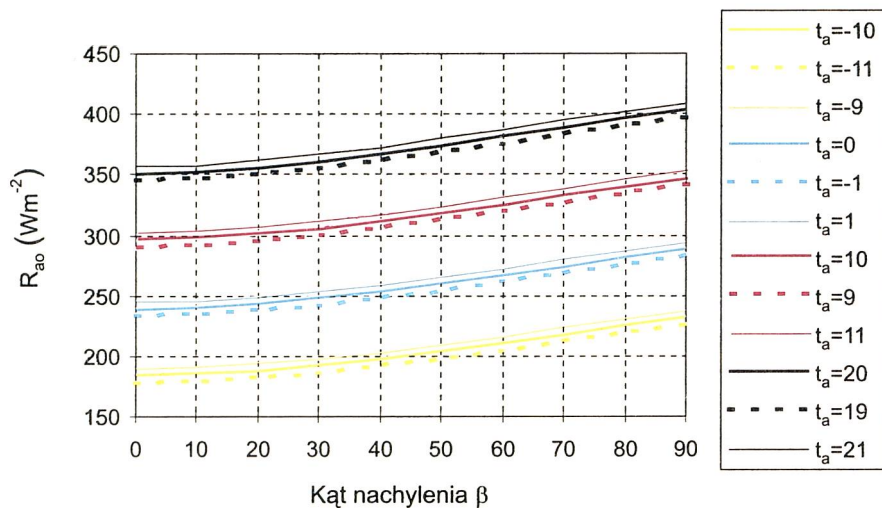
b)



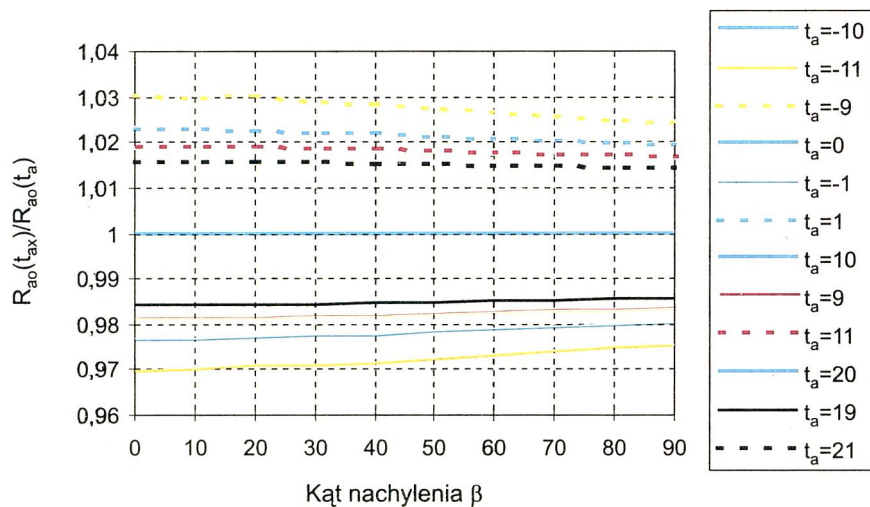
Rys. 4.25. Wpływ zmiany temperatury powietrza w granicach $\pm 0,5^\circ\text{C}$ na wyniki modelu obliczeniowego dla warunków bezchmurnego nieboskłonu: a) promieniowanie środowiska zewnętrznego w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny dla różnych wartości temperatury powietrza, b) względne różnice w wynikach obliczeń odniesione do wartości promieniowania dla wyjściowych wartości temperatury powietrza

Fig. 4.25. The influence of the change of the air temperature in the range of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ on the results of the mathematical model for a clear sky: a) environmental radiation as a function of the inclination angle of a plane for various air temperatures, b) differences in calculation results related to the intensity values for initial temperatures

a)



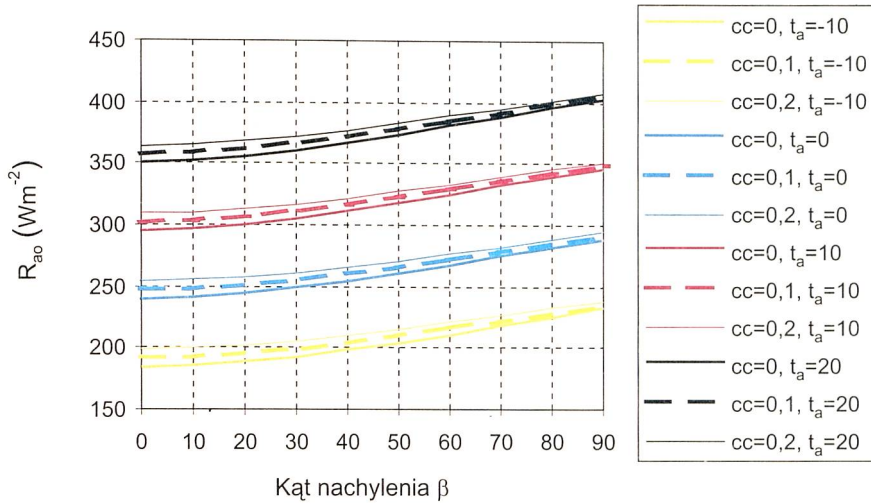
b)



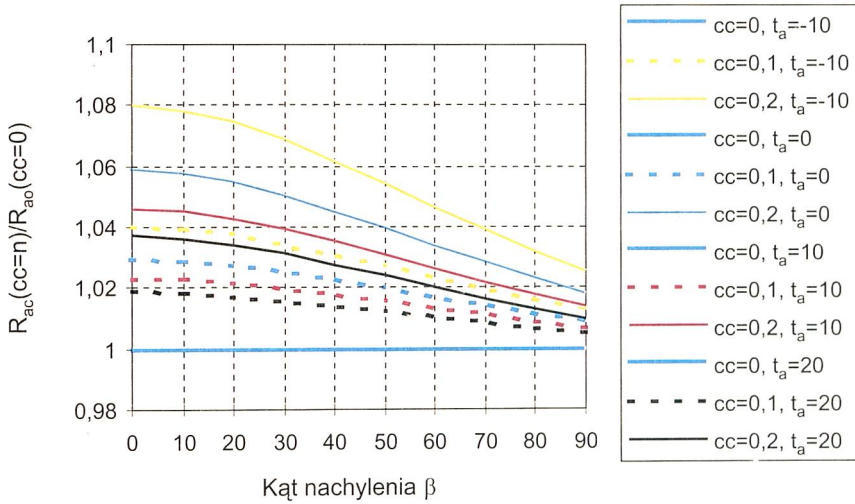
Rys. 4.26. Wpływ zmiany temperatury powietrza w granicach ± 1.0 °C na wyniki modelu obliczeniowego dla warunków bezchmurnego nieboskłonu: a) promieniowanie środowiska zewnętrznego w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny dla różnych wartości temperatury powietrza, b) różnice w wynikach obliczeń odniesione do wartości promieniowania przy 'pełnych' wartościach temperatury powietrza

Fig. 4.26. The influence of the change of the air temperature in the range of ± 1.0 °C on the results of the mathematical model for a clear sky: a) environmental radiation as a function of the inclination angle of a plane for various air temperatures, b) differences in calculation results related to the intensity values for initial temperatures

a)



b)



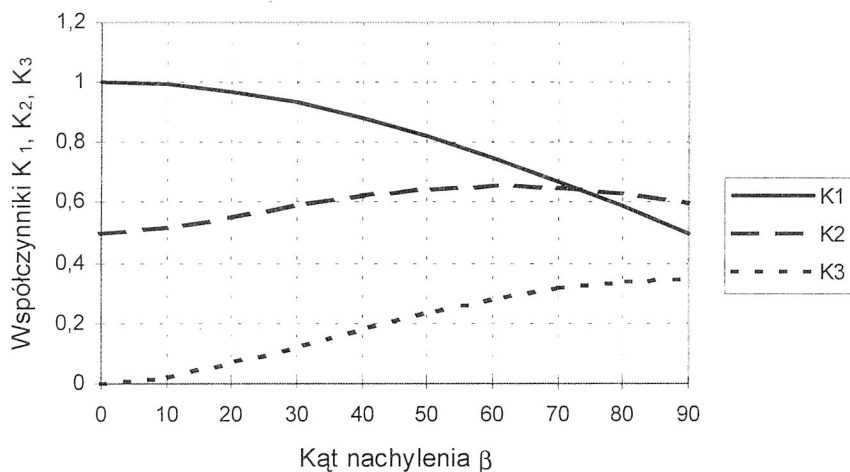
Rys. 4.27. Wpływ zmiany stopnia zachmurzenia nieba o 0,1 i o 0,2 na wyniki modelu obliczeniowego dla warunków bezchmurnego nieba: a) promieniowanie środowiska zewnętrznego w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny dla różnych wartości temperatury powietrza, b) różnice w wynikach obliczeń odniesione do wartości promieniowania przy stopniu zachmurzenia nieba $cc = 0$

Fig. 4.27. The influence of the change in the cloud cover by 0.1 and 0.2 on the results of model calculations for a clear sky: a) environmental radiation as a function of the inclination angle of a plane for various air temperatures, b) differences in calculation results related to the intensity values at the cloud cover $cc = 0$

Analizę wrażliwości modelu przeprowadzono przy założeniu, że niektóre dane wejściowe do obliczeń mogą ulec zmianie przy utrzymaniu pozostałych na niezmiennym poziomie. Zmienność danych wejściowych może wynikać np. z dokładności przyrządów pomiarowych (np. pomiar temperatury powietrza) lub z błędnego określenia stopnia zachmurzenia nieba przez obserwatora.

Na rysunku 4.25 przedstawiono wyniki analizy wrażliwości modelu na zmiany temperatury powietrza $\pm 0,5$ °C, a na rys. 4.26 na zmiany temperatury powietrza $\pm 1,0$ °C.

Rysunek 4.27 przedstawia analizę czułości modelu obliczeniowego na zmiany wartości stopnia zachmurzenia nieba.



Rys. 4.28. Wartości współczynników K_1 , K_2 i K_3 (równanie (4.25))

Fig. 4.28. The values of coefficients K_1 , K_2 , K_3 (Eq. (4.25))

Na rysunku 4.28 pokazano zmienność wartości współczynników K_1 , K_2 i K_3 (równanie (4.25)) w funkcji kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny.

Przeprowadzona analiza dowodzi, że największy wpływ na końcowe wyniki modelu obliczeniowego ma dokładność określenia stopnia zachmurzenia nieba. Zmiana stopnia zachmurzenia nieba z $cc = 0$ (niebo bezchmurne) na $cc = 0,2$ (w skali od 0 do 1) powoduje wzrost natężenia promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą od około 4 do 8% w stosunku do nieba bezchmurnego, przy temperaturze powietrza zmieniającej się od 20 do -10 °C. Dla płaszczyzny pionowej te różnice są mniejsze i wynoszą od ok. 2 do 3%.

Dokładność pomiarowa radiometru różnicowego do mierzenia natężenia długofalowego promieniowania atmosfery wynosi $\pm 5\%$ wartości odczytu (rozdz. 4.1.2), co oznacza, że wykonanie obliczeń ze współczynnikiem $cc = 0,2$ zamiast $cc = 0$ (niebo całkowicie bezchmurne) ma znaczenie jedynie dla płaszczyzny poziomej przy temperaturze powietrza -10 °C (rys. 4.27b). Dla pozostałych analizowanych temperatur powietrza oraz dla wszystkich kątów pochylenia płaszczyzny błąd obliczeń mieści się w zakresie błędu odczytu przyrządu pomiarowego (radiometru różnicowego).

Wprowadzenie do modelu obliczeniowego temperatury powietrza zewnętrznego z dokładnością ± 1 °C powoduje błąd w określeniu wartości natężenia długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego od ok. $\pm 3\%$ dla płaszczyzny poziomej do ok. $\pm 2,5\%$ dla płaszczyzny pionowej (rys. 4.26b). Zatem i w tym wypadku błąd obliczeń mieści się w zakresie błędu odczytu radiometru różnicowego.

Analiza przebiegu zmienności współczynników kątowych K_1 , K_2 , i K_3 prowadzi do wniosku, że płaszczyzny nachylone pod kątem do 10° względem poziomu można traktować jak płaszczyzny poziome (rys. 4.28), a już przy nachyleniu powyżej 10° należy uwzględniać rzeczywisty kąt nachylenia płaszczyzny.

5. PROMIENIOWANIE CIEPLNE ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO WOKÓŁ BUDYNKÓW – DYSKUSJA WYNIKÓW

5.1. Analiza porównawcza wyników modelu obliczeniowego

Weryfikacja eksperymentalna modelu matematycznego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek wykazała dość dobrą zgodność wyników pomiarów oraz obliczeń i pozwoliła uznać model za miarodajny i wystarczająco dokładny (rozdz. 4.5.2.). Niżej przedstawiono analizę porównawczą wyników obliczeń, uzyskanych dla płaszczyzny poziomej, na podstawie sformułowanego modelu matematycznego oraz wyników otrzymanych według modeli empirycznych zaproponowanych przez różnych autorów, przedstawionych w rozdziale 2.3. Do analizy przyjęto zakres zmienności elementów meteorologicznych występujących podczas badań. Wyniki analizy porównawczej przedstawiono na rysunkach od 5.1 do 5.5. Na rysunku 5.1a pokazano porównanie wyników obliczeń wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą (dla warunków bezchmurnego nieba) w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego, uzyskanych przez autora pracy, z wynikami otrzymanymi wg modeli obliczeniowych, których autorami są:

Idso i Jackson (równanie (2.32)), Swinbank (równanie (2.41)), Czeplak i Kasten (równanie (2.44)), Cole (równanie 2.43)), Unsworth i Monteith (równanie (2.42)) oraz formuły obliczeniowe wygenerowane przez autora pracy: Nowak 1 (równanie (4.2)) i Nowak 2 (równanie (4.6)).

Rysunek 5.1b przedstawia porównanie wyników obliczeń dla warunków nieba całkowicie zachmurzonego. Autorami modeli empirycznych są:

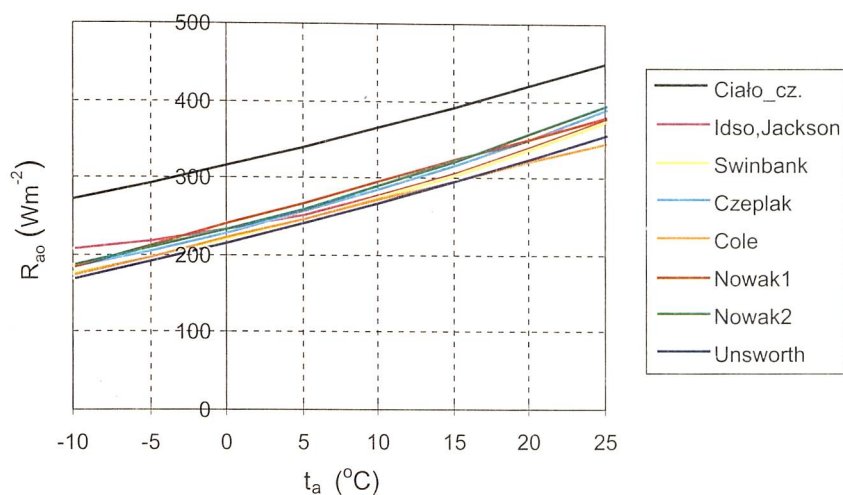
Unsworth i Monteith (równanie (2.47)), Cole (równanie (2.48)), Holstag i Ulden (równanie (2.53)) oraz równania wygenerowane przez autora pracy: Nowak 4 (równanie (4.3)) i Nowak 5 (równanie (4.8)).

Na obu rysunkach pokazano dla porównania również zmienność natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza.

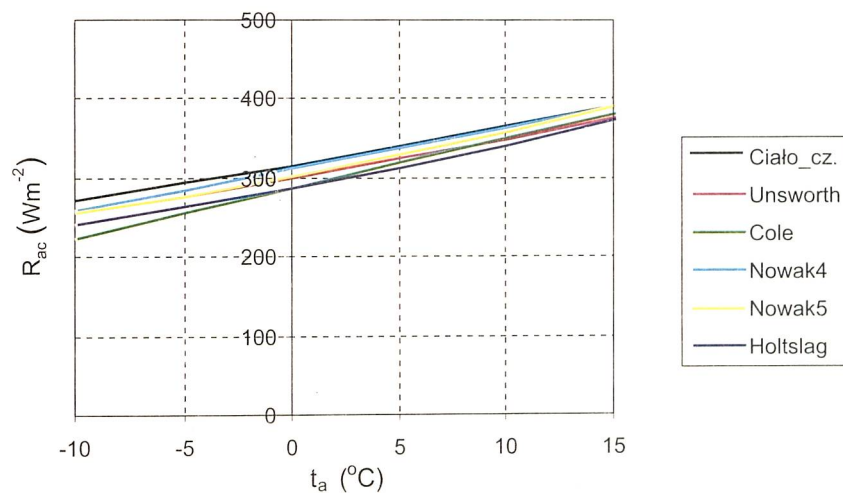
Rysunek 5.2 natomiast przedstawia wartości temperatury promieniowania niebosłonu dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba, odpowiadające natężeniu promieniowania cieplnego atmosfery na rys. 5.1. Na rysunku 5.3. pokazano zmienność natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą, w funkcji temperatury punktu rosy (dla dwóch poziomów wilgotności względnej powietrza zewnętrznego), według modeli empirycznych, których autorami są:

Bliss (równanie (2.35)), Clark (równanie (2.36)), Berdahl i Fromberg (równanie (2.37)), Berger (równanie (2.39)), Frank i Punter (równanie (2.40)) oraz równanie autora pracy – Nowak 3 (równanie (4.7)).

a)



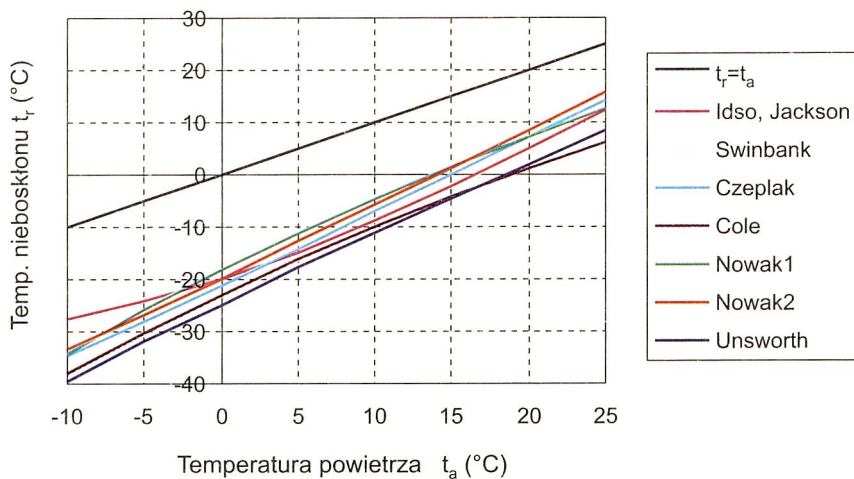
b)



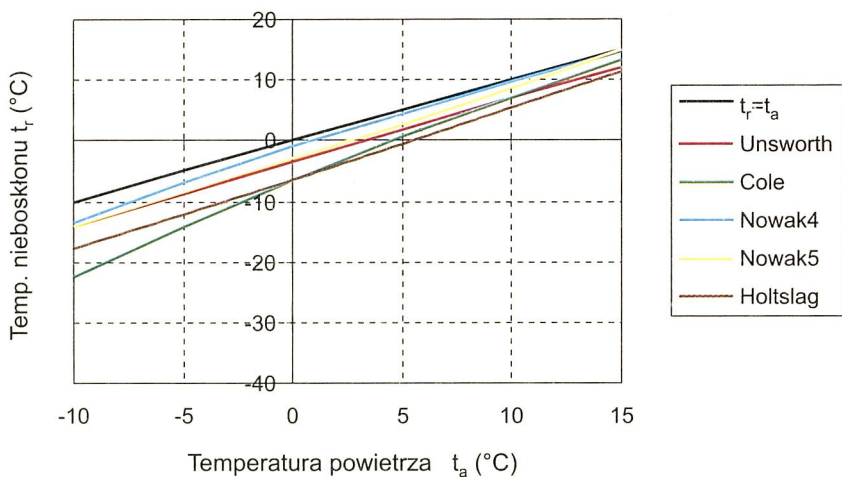
Rys. 5.1. Natężenie promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą według wybranych modeli obliczeniowych (opis w tekście), w których promieniowanie atmosfery jest funkcją temperatury powietrza dla: a) bezchmurnego nieba, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 5.1. Atmospheric longwave radiation intensity upon horizontal plane, according to selected models (see text) as a function of the air temperature: a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



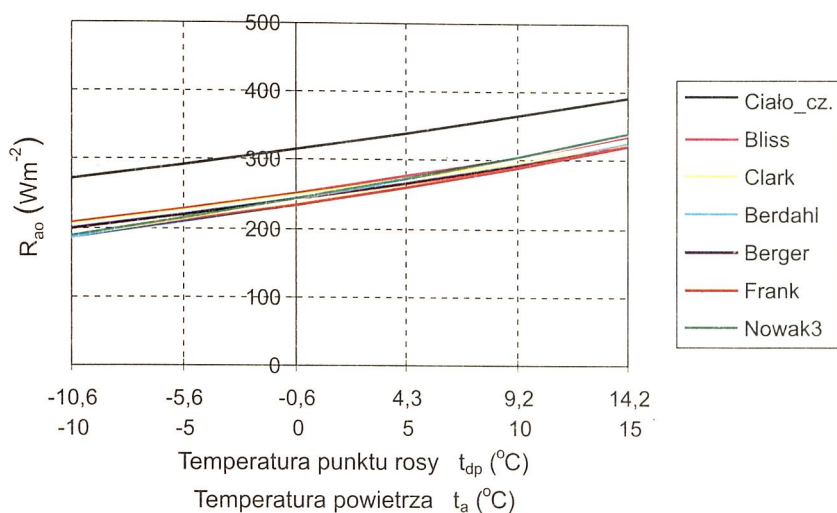
b)



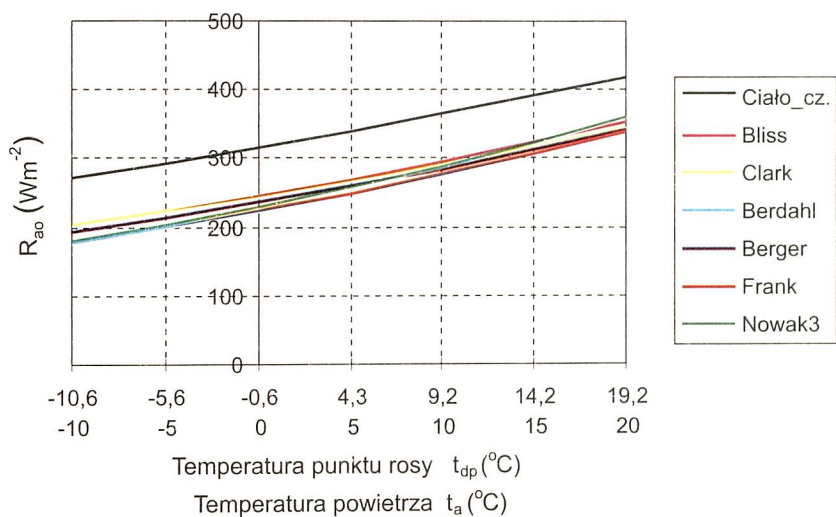
Rys. 5.2. Temperatura promieniowania nieboskłonu odpowiadająca natężeniu promieniowania cieplnego atmosfery na rys. 5.1 dla: a) bezchmurnego nieba, b) nieba całkowicie zachmurzonego

Fig. 5.2. Sky temperature corresponding to the environmental thermal radiation intensity in fig. 5.1: a) for a clear sky, b) for an overcast sky

a)



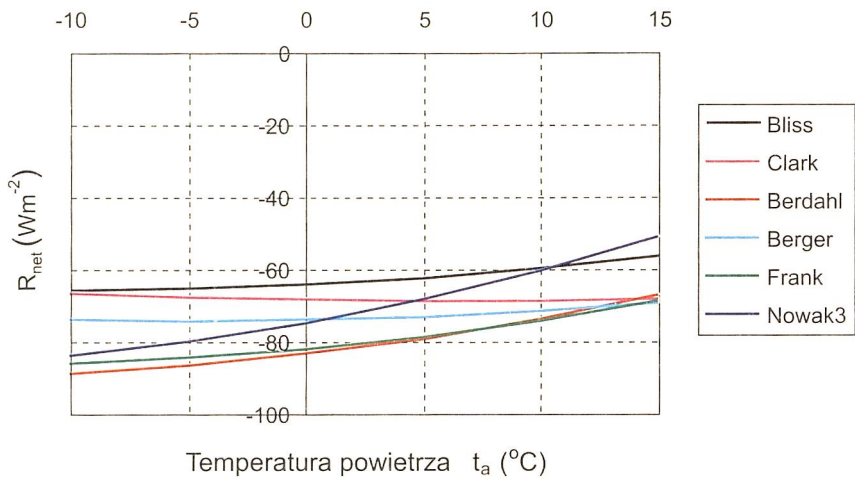
b)



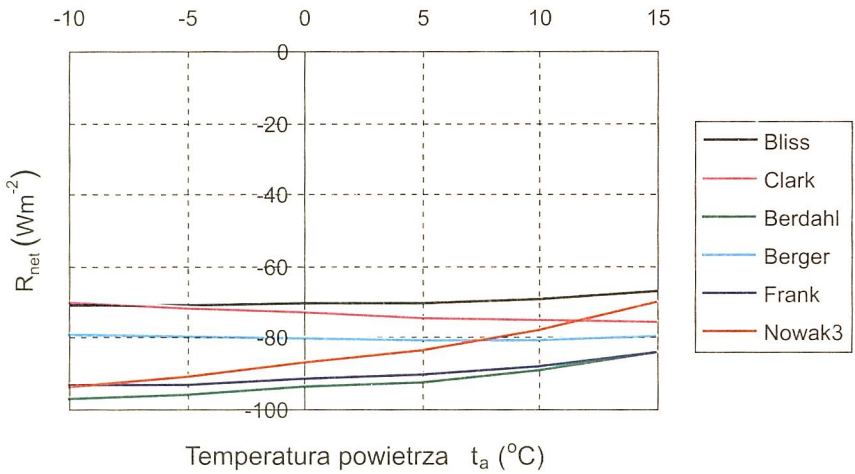
Rys. 5.3. Natężenie promieniowania długofalowego atmosfery na płaszczyznę poziomą według wybranych modeli obliczeniowych (opis w tekście), w których promieniowanie atmosfery jest funkcją temperatury punktu rosy dla: a) wilgotności względnej powietrza 95%, b) wilgotności względnej powietrza 60%

Fig. 5.3. Atmospheric longwave radiation intensity upon horizontal plane according to selected models (see text) as a function of the dew point temperature: a) for relative humidity 95%, b) for relative humidity 60%

a)



b)



Rys. 5.4. Natężenie długofalowego promieniowania różnicowego pomiędzy promieniowaniem cieplnym atmosfery (rys. 5.3) i ciała czarnego o temperaturze otaczającego powietrza dla:

a) wilgotności względnej powietrza 95%, b) wilgotności względnej powietrza 60%

Fig. 5.4. Net longwave radiation intensity between atmospheric radiation and black-body radiation at the air temperature: a) for air relative humidity 95%, b) for air relative humidity 60%

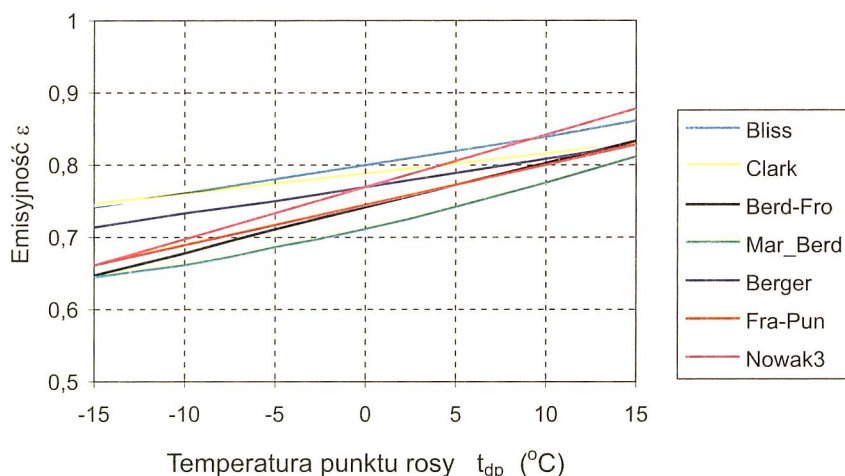
Na rysunku 5.4 pokazano zmienność natężenia promieniowania różnicowego pomiędzy docierającym na płaszczyznę poziomą promieniowaniem długofalowym atmosfery, obliczonym według cytowanych wyżej modeli empirycznych (rys. 5.3) i promieniowaniem ciała doskonale czarnego o temperaturze otaczającego powietrza.

Porównanie i analiza wyników obliczeń natężenia cieplnego promieniowania atmosfery na płaszczyznę poziomą, uzyskanych na podstawie zaproponowanych w niniejszej pracy empirycznych formuł obliczeniowych, z wynikami innych modeli sugeruje dobrą zbieżność w całym zakresie rozpatrywanej zmienności temperatury powietrza zewnętrznego (rys. 5.1–5.3). Jednak analiza porównawcza przebiegów zmienności temperatury promieniowania nieboskłonu (rys. 5.2), ściśle korespondującej z natężeniem promieniowania atmosfery oraz przebiegów natężenia promieniowania różnicowego rozważanej powierzchni czynnej (rys. 5.4) wskazuje na stosunkowo duży rozrzut wyników uzyskanych według różnych modeli. Rozbieżność wartości temperatury promieniowania bezchmurnego nieba dochodzi do 10 °C (rys. 5.2a), a dla nieba całkowicie zachmurzonego do 8 °C (rys. 5.2b). Takie różnice w wartościach temperatury promieniowania nieboskłonu rzutują na bilans cieplny przegród budowlanych powodując, w zależności od warunków pogodowych i od izolacyjności cieplnej przegrody, obliczenie zaniżonej do około 10–12% wartości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez przegrodę budowlaną [128]. Z kolei wartości natężenia promieniowania różnicowego między rozważaną powierzchnią czynną a jej najbliższym otoczeniem, obliczone według modeli różnych autorów, dla danej temperatury powietrza różnią się między sobą do około 25 Wm⁻², przy średniej wartości promieniowania różnicowego wynoszącej 70 Wm⁻² (rys. 5.4). W konsekwencji można uzyskać charakterystyki efektywności chłodzenia radiacyjnego danego radiatora obarczone błędem dochodzącym do około 35%.

W uzasadnieniu potrzeby opracowania nowego modelu obliczeniowego wykazano zatem, że istniejące empiryczne modele oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę poziomą nie zawsze są wystarczająco dokładne dla innej lokalizacji, tj. w innym kraju. Wszystkie rozpatrywane modele uwzględniają środowisko zewnętrzne o zbliżonych charakterystykach klimatycznych, jednak z uwagi na złożoność i dużą zmienność zjawisk pogodowych oraz możliwość praktycznego zastosowania modelu, każdy z nich stanowi pewne uproszczenie. Każdy model obliczeniowy jest adekwatny do konkretnej lokalizacji, a możliwość stosowania go do innego położenia powinna być potwierdzona pozytywnym wynikiem weryfikacji doświadczałnej, co w tym wypadku nie miało miejsca. Jest to więc argument potwierdzający wcześniejsze spostrzeżenie, że w obliczeniach bilansu cieplnego dowolnej przegrody budowlanej (lub innej powierzchni czynnej) należy stosować model obliczeniowy promieniowania długofalowego atmosfery zweryfikowany dla danej lokalizacji, ponieważ w przeciwnym razie może dojść do powstania znaczących błędów w bilansie promieniowania i w konsekwencji w bilansie cieplnym rozważanej przegrody budowlanej.

Analiza wyników obliczeń przedstawionych na rys. 5.3 i 5.4 potwierdza szczególnie wpływ wilgotności względnej powietrza na wartość emitowanego promieniowania długofalowego przez atmosferę. Dla warunków bezchmurnego nieba przy zmniejszonej zawartości wilgoci w powietrzu atmosfera emituje mniejszą ilość zwrótnego promieniowania cieplnego docierającego do powierzchni Ziemi (efekt „zimnego nieba”), co powoduje wzrost różnicowych radiacyjnych strat ciepła rozważanej powierzchni czynnej (rys. 5.4b).

Na rysunku 5.5 pokazano zmienność współczynnika emisyjności atmosfery w funkcji temperatury punktu rosy dla bezchmurnego nieba według modeli empirycznych różnych autorów oraz według formuły obliczeniowej autora pracy. W tym wypadku otrzymane wyniki, podobnie jak dla natężenia promieniowania różnicowego, również mieszczą się w pewnym stosunkowo szerokim przedziale zmienności. W zastosowaniach praktycznych w celu uniknięcia błędów obliczeniowych powinno się zatem korzystać z empirycznych modeli promieniowania atmosfery zweryfikowanych dla danej lokalizacji.



Rys. 5.5. Współczynnik emisyjności bezchmurnego nieba w funkcji temperatury punktu rosy powietrza według wybranych modeli obliczeniowych (opis w tekście)

Fig. 5.5. Variability of the clear sky emissivity as a function of the dew point temperature, according to selected models (see text)

Modele empiryczne wykorzystane w omawianej analizie porównawczej odnoszą się jedynie do płaszczyzny poziomej. Zaproponowany w niniejszej pracy model oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek umożliwia także obliczanie natężenia tego promieniowania dla powierzchni nachylonych pod kątem do 90° , co znacznie rozszerza możliwości praktycznego zastosowania modelu. Analizę porównawczą w wersji z przegrodą nachyloną wykonano z jednym

z nielicznych modeli umożliwiających przeprowadzenie takiej analizy, a mianowicie z modelem Cole'a (rozdz. 4.5.4). Porównanie wyników obliczeń natężenia cieplnego promieniowania otoczenia dla różnych kątów pochylenia płaszczyzny aż do 90° (płaszczyzna pionowa), wskazuje na różnice w wynikach do 16% (rys. 4.28), a więc nie uzyskano takiej zbieżności jak w przypadku płaszczyzn poziomych. Odpowiedni model obliczeniowy oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek, zweryfikowany dla danej lokalizacji, nabiera więc szczególnego znaczenia w przypadku przegród budowlanych pochyłonych (np. ściany oraz połacie dachowe poddaszy użytkowych) i stanowi jedyne wiarygodne narzędzie do obliczania bilansu cieplnego przegród w warunkach nieustalanej wymiany ciepła.

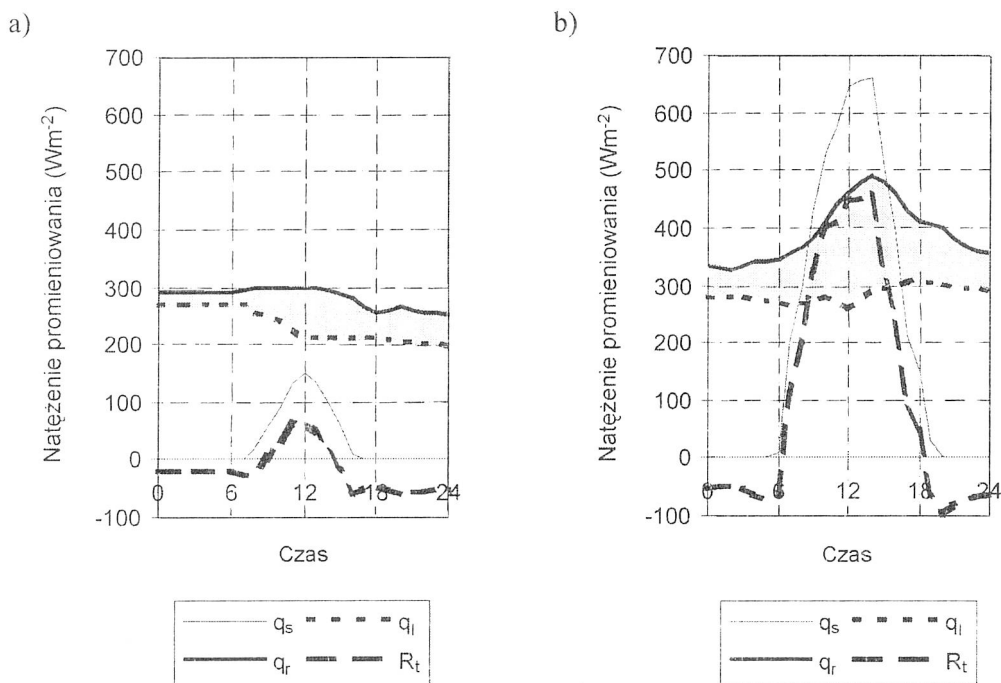
5.2. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu

Radiacyjna wymiana ciepła między zewnętrznymi powierzchniami przegród budowlanych a otaczającym je środowiskiem zewnętrznym może mieć znaczny wpływ na wielkość strat lub zysków ciepła przez budynek. Z uwagi na wykazany wcześniej charakter zmian oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek, efekt wymiany ciepła przez promieniowanie jest zdecydowanie mniejszy dla ścian niż dla stropodachów (rozdz. 2.1). Wynika to z faktu, że straty ciepła przez promieniowanie przegród pionowych kompensowane są porównywalnymi zyskami energii promieniowania od gruntu oraz od obiektów sąsiadujących.

Na rysunku 5.6 przedstawiono przykładową zmienność w czasie poszczególnych składowych całkowitego bilansu promieniowania $R_i(\tau)$ zarejestrowaną dla stropodachu pomiarowego w okresie zimowym oraz w lecie. Składowe te, szczegółowo opisane w rozdz. 6.2.1, wykazują określone prawidłowości przebiegu dobowego i rocznego. Zakreskowane części wykresów przedstawiają różnicowe straty ciepła $R_{\text{net}}(\tau)$ zewnętrznej powierzchni stropodachu przez promieniowanie długofalowe (bilans promieniowania długofalowego). Badania wykazały, że różnicowe promieniowanie długofalowe w ciągu całego cyklu pomiarowego skierowane było od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska, osiągając największe wartości w godzinach południowych. Oddziaływanie zasadniczego źródła zysków ciepła jakim jest promieniowanie słoneczne powodowało jednak, że całkowity bilans promieniowania $R_i(\tau)$ zewnętrznej powierzchni stropodachu był w tym czasie dodatni. Tuż przed zachodem słońca oraz w nocy $R_i(\tau)$ było ujemne – stropodach tracił ciepło przez promieniowanie długofalowe. W nocy przy braku zachmurzenia w zimie, straty ciepła przez promieniowanie wynosiły średnio od 45 do 65 Wm^{-2} , w lecie zaś, również w nocy, od 30 do 85 Wm^{-2} .

Z porównania wykresów na rys. 5.6 wynika, że w lecie różnicowe promieniowanie długofalowe, skierowane od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska, było znacznie większe niż w zimie. Jest to zrozumiałe, gdyż w lecie, ze względu na

większe wartości zarówno natężenia promieniowania słonecznego jak i temperatury powietrza, zewnętrzna powierzchnia stropodachu osiągała wyższą temperaturę niż w zimie. Przyrost temperatury powierzchni zewnętrznej w lecie nie był rekompensowany odpowiednim przyrostem zwrotnego promieniowania długofalowego atmosfery, kompensującego radiacyjne straty ciepła. Z tego powodu straty ciepła zewnętrznej powierzchni stropodachu przez promieniowanie długofalowe były większe niż w zimie. Całkowity bilans cieplny przegrody w obu okresach był oczywiście diametralnie różny.



Rys. 5.6. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu pomiarowego na podstawie badań przeprowadzonych: a) w zimie, b) w lecie

Fig. 5.6. Radiative balance of the outside surface of the flat roof based on the measurements made: a) in winter, b) in summer

Konsekwencją zwiększonych radiacyjnych strat ciepła zewnętrznej powierzchni stropodachu było występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego w nocy, zarówno w zimie jak i w okresie lata – w zimie temperatura powierzchni obniżyła się w stosunku do temperatury powietrza maksymalnie o 6 °C.

Całoroczny bilans promieniowania, a tym samym bilans cieplny stropodachu oraz innych przegród stanowiących obudowę ogrzewanej kubatury budynku, niezależnie od doboru grubości warstw termoizolacyjnych, może być kształtowany poprzez dobór odpowiednich właściwości radiacyjnych powierzchni zewnętrznej (powierzchnie

spektralnie selektywne, rozdz. 3.2), poprzez dobór kąta pochylenia przegrody oraz zorientowania względem stron świata. Ponieważ wymagania dotyczące radiacyjnych charakterystyk zewnętrznych powierzchni przegród w sezonie grzewczym i w okresie lata są przeciwstawne, procesy decyzyjne w zakresie doboru tych charakterystyk powinny być przedmiotem optymalizacji wielokryterialnej. Formułowanie i rozwiązywanie zagadnienia optymalizacji musi być poprzedzone przyjęciem kryteriów optymalizacji oraz określeniem zmiennych decyzyjnych i ich ograniczeń [111–113].

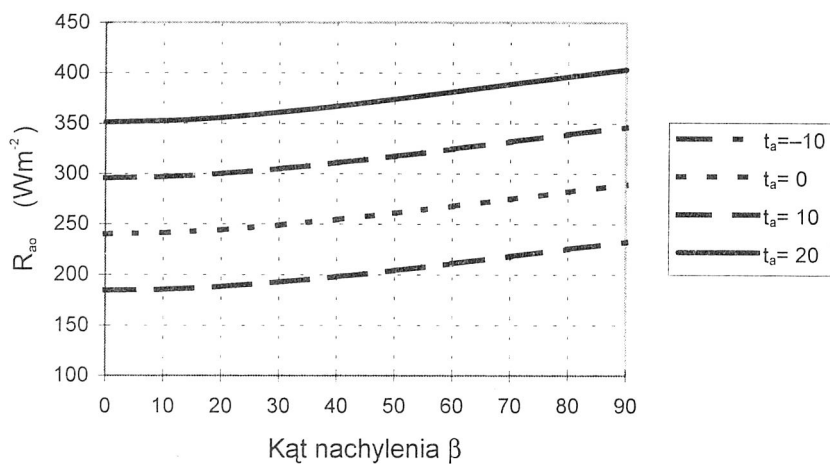
Analizując wymianę ciepła przez promieniowanie przegrody budowlanej ze środowiskiem zewnętrznym oraz możliwości kształtowania tej wymiany, należy mieć na uwadze, że radiacyjna wymiana ciepła stanowi jeden ze składników bilansu cieplnego zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej. Jednocześnie bowiem zachodzi wymiana ciepła przez konwekcję tej powierzchni z otoczeniem, a ponadto wpływ na zjawiska cieplne na zewnętrznej powierzchni przegrody mają budowa, układ warstw i rodzaj zastosowanych materiałów oraz warunki cieplne panujące w pomieszczeniu, które ta przegroda oddziela. Bilans cieplny przegrody jest wypadkową wymienionych elementów. W rozdziale 6 przedstawiono analizę bilansu cieplnego przegrody dla ustalonych i nieustalonych warunków przenikania ciepła, z uwzględnieniem oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego.

5.3. Wpływ kąta nachylenia płaszczyzny i zachmurzenia nieba na wartość docierającego promieniowania długofalowego

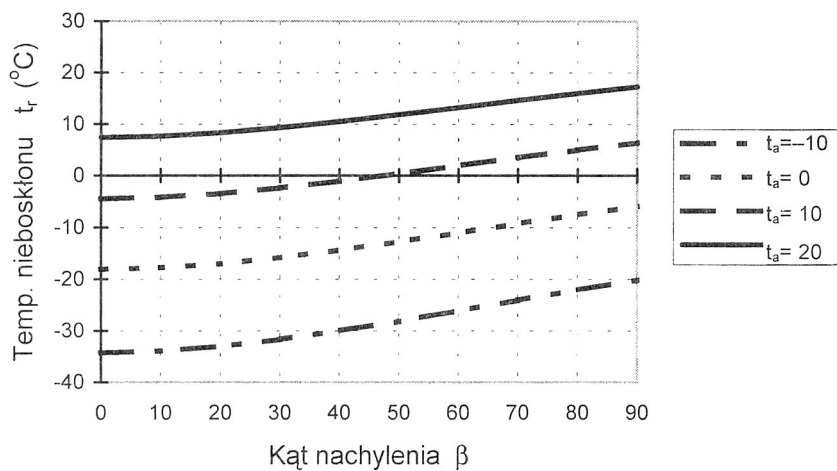
Kąt nachylenia rozważanej płaszczyzny oraz stopień zachmurzenia nieba jednoznacznie determinują ilość docierającego cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń uzyskanych na podstawie sformułowanego w tej pracy empirycznego modelu obliczeniowego oddziaływania długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek. Na rysunku 5.7a pokazano przebieg natężenia promieniowania środowiska zewnętrznego dla warunków bezchmurnego nieba w funkcji temperatury powietrza oraz kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny, a na rysunku 5.7b odpowiadające wartości temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego.

Na rysunku 5.8, w podobnym układzie, pokazano wyniki obliczeń dla nieboskłonu całkowicie zachmurzonego. Z danych przedstawionych na rys. 5.8b wynika, że średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego dla warunków całkowicie zachmurzonego nieba jest praktycznie równa temperaturze powietrza, niezależnie od kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny, co sygnalizowano już wcześniej. Dla nieba bezchmurnego temperatura promieniowania otoczenia jest najniższa w zenicie (dla płaszczyzny poziomej), najwyższa zaś dla płaszczyzny pionowej, przyjmując wartości pośrednie dla pośrednich kątów pochylenia. Dla płaszczyzny poziomej średnia temperatura promieniowania bezchmurnego nieboskłonu jest niższa od temperatury powietrza o wartość wyliczoną na podstawie równań (3.24) i (4.11).

a)



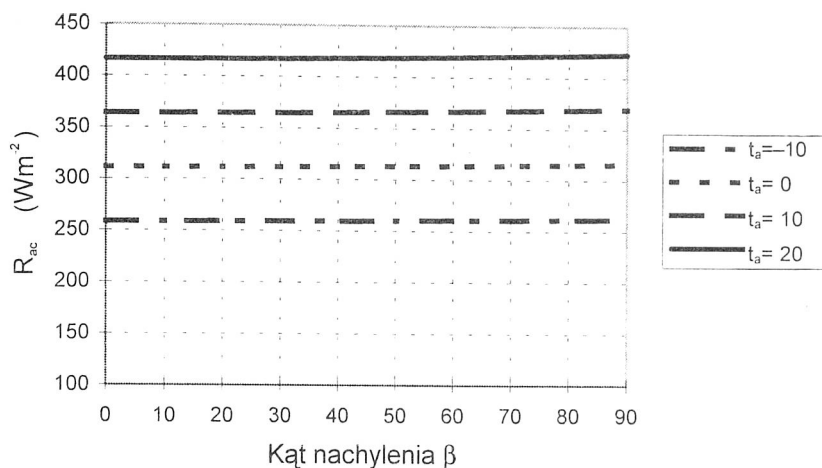
b)



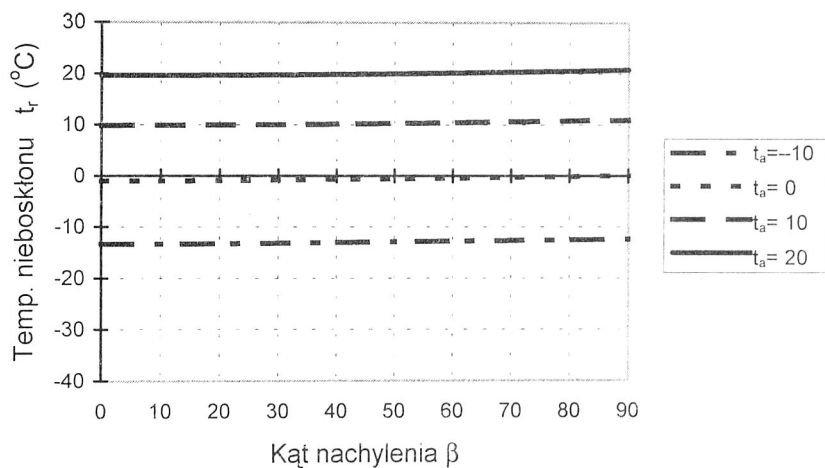
Rys. 5.7. Przykładowe wyniki obliczeń modelu autora pracy: a) natężenie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego R_{so} przy bezchmurnym niebie, w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny dla różnych wartości temperatury powietrza t_a , b) odpowiadające wartości średniej temperatury promieniowania środowiska t_r .

Fig. 5.7. Exemplary calculation results of the author of the paper: a) intensity of the thermal environmental radiation R_{so} at a clear sky as a function of the inclination angle of a plane for various air temperatures t_a , b) corresponding values of the mean environmental radiative temperature t_r .

a)



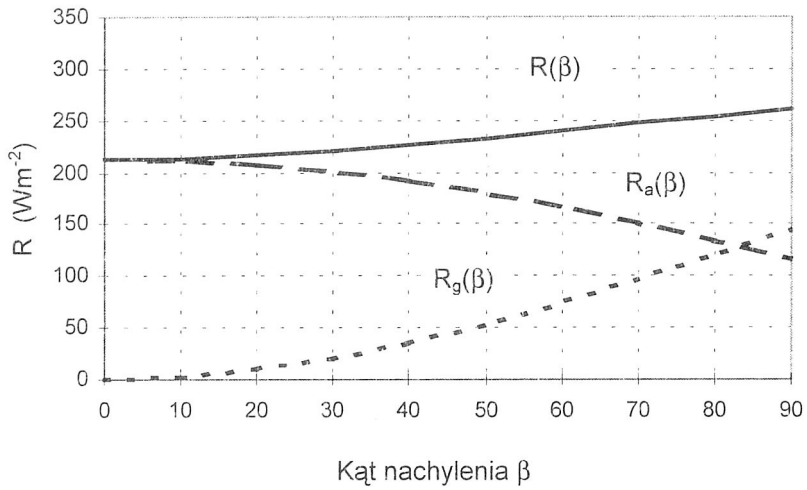
b)



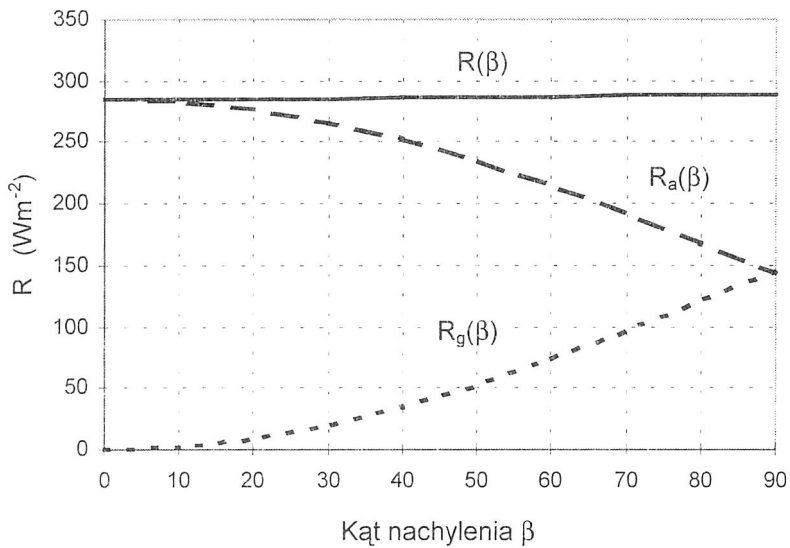
Rys. 5.8. Przykładowe wyniki obliczeń modelu autora pracy: a) natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego przy całkowicie zachmurzonym niebie R_{ac} , w funkcji kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny dla różnych wartości temperatury powietrza t_a , b) odpowiadające wartości średniej temperatury promieniowania środowiska t_r .

Fig. 5.8. Exemplary calculation results of the author of the paper: a) intensity of the thermal environmental radiation R_{ac} at an overcast sky as a function of the inclination angle of a plane for various air temperatures t_a , b) corresponding values of the mean environmental radiative temperature t_r .

a)



b)



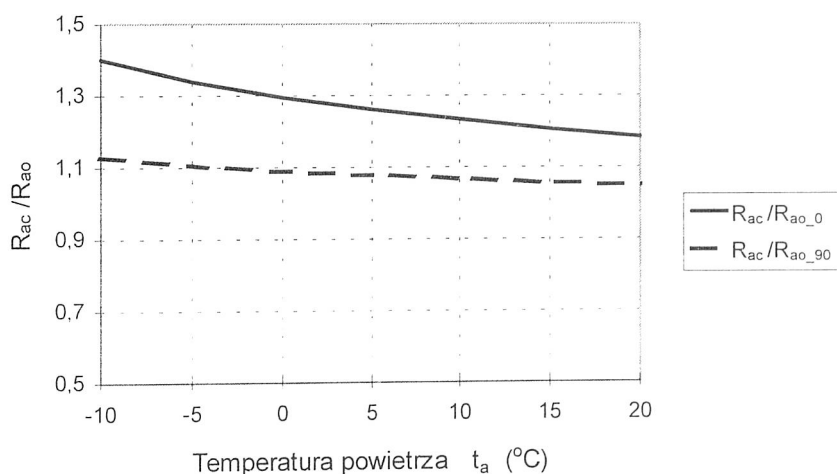
Rys. 5.9. Udział promieniowania ciepłego atmosfery $R_a(\beta)$ i gruntu $R_g(\beta)$ w całkowitym promieniowaniu ciepłym środowiska zewnętrznego $R(\beta)$, w funkcji kąta nachylenia (β) rozważanej płaszczyzny przy temperaturze powietrza $t_a = -5^\circ\text{C}$, dla: a) warunków bezchmurnego nieba, b) warunków nieba całkowicie zachmurzonego (wyniki wg modelu obliczeniowego autora pracy)

Fig. 5.9. Proportion of thermal atmospheric radiation $R_a(\beta)$ and the ground radiation $R_g(\beta)$ of total environmental thermal radiation $R(\beta)$ as a function of the inclination angle (β) of a plane for the air temperature $t_a = -5^\circ\text{C}$: a) for a clear sky, b) for an overcast sky (the results according to the author's model)

Wraz ze wzrostem kąta nachylenia rozważanej płaszczyzny (przegrody budowlanej) zmienia się udział poszczególnych składowych w wynikowej wartości natężenia docierającego ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego, tj. promieniowania atmosfery oraz gruntu i najbliższego otoczenia budynku. Zmienność ta jest uwzględniona w sformułowanym w rozdziale 4 empirycznym modelu obliczeniowym. Z punktu widzenia bilansu ciepłego przegród budowlanych najistotniejszą jest wynikowa wartość natężenia ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego bądź odpowiadająca jej wartość średniej temperatury promieniowania tego środowiska. W pewnych wypadkach jednak niezbędną może się okazać znajomość wartości natężenia składowych wynikowego długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, tj. promieniowania atmosfery i gruntu. Na rysunku 5.9 przedstawiono przykładową zmienność natężenia promieniowania długofalowego atmosfery i gruntu w funkcji kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny, dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieboskłonu.

Wyniki obliczeń zaprezentowane na rys. 5.7, 5.8 i 5.9 mogą być wprost zastosowane do obliczeń bilansu ciepłego przegród budowlanych (rozdz. 6).

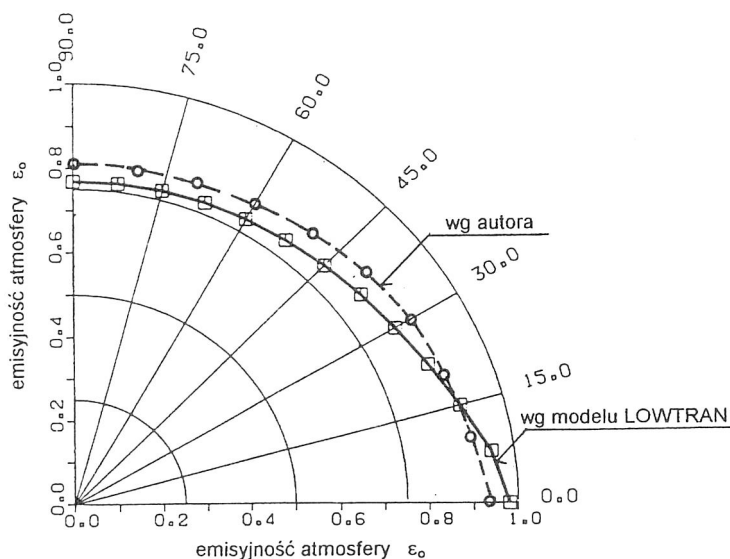
Zachmurzenie powoduje wzrost natężenia promieniowania ciepłego atmosfery w porównaniu do warunków bezchmurnego nieba, co pokazano na rys. 5.10. Dla płaszczyzny poziomej wzrost ten, w zależności od temperatury powietrza, wynosi średnio około 30%, dla płaszczyzny pionowej natomiast średnio około 10%. Zachmurzenie powoduje wzrost zwrotnego promieniowania długofalowego atmosfery, co w konsekwencji ogranicza radiacyjne straty ciepła przegród budowlanych.



Rys. 5.10. Natężenie ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego przy niebie całkowicie zachmurzonym w odniesieniu do warunków nieba bezchmurnego: a) dla przegrody poziomej, b) dla przegrody pionowej (wyniki według modelu obliczeniowego autora pracy)

Fig. 5.10. Intensity of thermal atmospheric radiation at an overcast sky related to the conditions at a clear sky for: a) a vertical partition b) horizontal partition (the results according to the author's model)

Natężenie promieniowania długofalowego atmosfery jest między innymi funkcją pozornej emisyjności atmosfery, która (co pokazano w rozdziale 2) zależy od długości fali promieniowania oraz od tzw. „kąta zenitalnego”, tj. kąta zawartego między pionem a normalną do rozpatrywanej płaszczyzny. Niezbędne formuły obliczeniowe w tym zakresie można znaleźć w pracach [17, 114, 115]. Ponieważ zaproponowany model empiryczny umożliwia określenie wartości natężenia cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego w całym zakresie widma promieniowania dla płaszczyzny nachylonej pod dowolnym kątem, w drodze przekształceń można uzyskać wartości współczynnika emisyjności nieboskłonu, odpowiadające tej płaszczyźnie i niezależne od długości fali promieniowania cieplnego (wartości uśrednione w całym zakresie promieniowania cieplnego). Na rysunku 5.11 pokazano porównanie wartości współczynnika emisyjności atmosfery otrzymanych z programu komputerowego LOWTRAN (cyt. w pracy [17]) z wynikami uzyskanymi przez autora niniejszej pracy, dla temperatury powietrza 0 °C.



Rys. 5.11. Porównanie wartości współczynnika pozornej emisyjności atmosfery w funkcji kąta zenitalnego otrzymanych z programu LOWTRAN (mid-latitude [17]) oraz z modelu obliczeniowego autora pracy dla temperatury powietrza 0 °C

Fig. 5.11. Comparison of the values of the coefficient of apparent emissivity of the atmosphere as a function of the zenith angle calculated by means of the LOWTRAN program (mid-latitude [17]) as well as the author's model for the air temperature of 0 °C

Powyższe zestawienie wskazuje na bardzo zbliżone wartości współczynnika emisyjności atmosfery, uzyskane zupełnie różnymi metodami obliczeniowymi.

5.4. Radiacyjna wymiana ciepła między budynkami

W ostatnich trzydziestu latach w wielu krajach znacznie wzrosło zainteresowanie problemem wymiany ciepła na terenach zurbanizowanych i jego wpływem na warunki bioklimatyczne w miastach. Dotyczy to zwłaszcza złożonych zagadnień radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego na klimat miejski, który znajduje się w obrębie zainteresowania stosunkowo nowej dziedziny wiedzy technicznej jaką jest fizyka miasta [106, 145]. Jednym z elementów, którym zajmuje się fizyka miasta jest bilansowanie energii cieplnej na terenach zurbanizowanych, co z kolei ściśle wiąże się z występowaniem powszechnie znanego zjawiska wyspy ciepła. Prawdopodobnie pierwszym badaczem, który zwrócił uwagę na zjawisko wyspy ciepła był Luke Howard, który w roku 1820 opublikował dane wskazujące, że temperatura powietrza w centrum Londynu była wyższa niż na obrzeżach miasta (cyt. w pracy [40]). Pierwsze prace naukowe na temat zjawiska wyspy ciepła zaczęły się pojawiać z początkiem lat pięćdziesiątych. Następnie zauważono, że wielkości meteorologiczne mierzone standardowo, poza obszarem miast, w praktyce są zazwyczaj mało przydatne do szczegółowej analizy i kompleksowego obliczania bilansu cieplnego budynków w skali roku. Wynika to z faktu, że warunki meteorologiczne oraz wymiana ciepła na obszarze zabudowanym w centrum miast, w dzielnicach peryferyjnych oraz na obszarze otwartym poza miastem są zupełnie różne. Z tego powodu Międzynarodowa Organizacja Meteorologiczna w połowie lat sześćdziesiątych rozpoczęła finansowanie prac naukowo-badawczych w zakresie klimatu miejskiego. W latach od 1968 do 1972 w krajach zachodnich powstało około 380 artykułów na ten temat, w latach od 1973 do 1976 roku około 430 [40]. W tym czasie powstały również pierwsze próby modelowania matematycznego wymiany ciepła i przemieszczania się zanieczyszczeń w miastach.

Zjawisko wyspy ciepła, polegające głównie na wzroście temperatury powietrza w mieście, głównie w centrum, w stosunku do temperatury panującej w najbliższej okolicy, wynika z nadwyżki ciepła w bilansie promieniowania długofalowego, z deficytu w bilansie wilgoci, znacznych zysków ciepła ze sztucznych źródeł oraz z utrudnionej wymiany powietrza gęstej zabudowy miejskiej z najbliższym otoczeniem. Wzrost temperatury powietrza w centrum miasta uznano za symptom najlepiej odzwierciedlający wpływ urbanizacji na klimat miejscowy.

W analizie zagadnień z zakresu klimatu miejskiego, a w tym z zakresu przenoszenia energii promieniowania krótko- i długofalowego oraz bilansowania cieplnego w obszarze zabudowanym, wyróżnia się dwa zakresy wysokości, licząc od poziomu gruntu (rys. 5.12) [144]:

1. Miejska warstwa przyścienna – jest najniższą warstwą atmosfery, sięgającą od powierzchni gruntu do średniej wysokości stropodachów i dachów budynków, zlokalizowanych w centrum miasta. Charakterystyki fizyczne tej warstwy uwarunko-

wane są przede wszystkim konfiguracją i geometrią budynków w zabudowie miejskiej oraz topografią terenu.

2. Miejska warstwa graniczna – obejmuje umowną wysokość liczoną od górnej granicy warstwy przyściennej do warstwy atmosfery, w której następuje równowaga między turbulentnym przepływem w niższych i laminarnym przepływem w wyższych warstwach atmosfery. Wysokość tej warstwy zależy między innymi od lokalnej topografii terenu, nad którą się rozpościera.

Na charakterystykę termiczną środowiska miejskiego oprócz rodzaju zabudowy, konfiguracji budynków i topografii terenu wpływają głównie zanieczyszczenie powietrza, bilans promieniowania krótko- i długofalowego, temperatura i wilgotność względna powietrza, prędkość i kierunek wiatru oraz bilans energetyczny zabudowy miejskiej.

Analiza i obliczenia radiacyjnej wymiany ciepła w zakresie promieniowania długofalowego dla grupy budynków są bardzo złożone i następczą wiele problemów wynikających z konieczności uwzględnienia rzeczywistych radiacyjnych właściwości powierzchni przegród budowlanych, współczynników ich konfiguracji, temperatury



Rys. 5.12. Schemat skali lokalnej z podziałem na miejską warstwę przyścienną i miejską warstwę graniczną

Fig. 5.12. Scheme of the local scale with the partition into the urban canopy layer and urban boundary layer

powierzchni przegród oraz pochłaniania promieniowania ciepłego przez gazy zawarte w powietrzu. Należy ponadto poprawnie określić wartość tzw. „temperatury otoczenia”, która zależy od elementów wymienionych wyżej oraz od topografii terenu. Jedną z możliwości opisu temperatury otoczenia T_{ot} przedstawił Clarke [34] w postaci:

$$T_{ot}^4 = \alpha T_r^4 + \beta T_{gr}^4 + \gamma T_{bu}^4 \quad (5.1)$$

gdzie:

T_r , T_{gr} , T_{bu} – temperatury, odpowiednio, promieniowania nieboskłonu, gruntu oraz otaczających budynków (K),

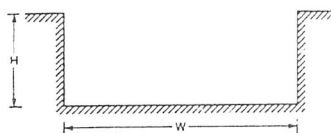
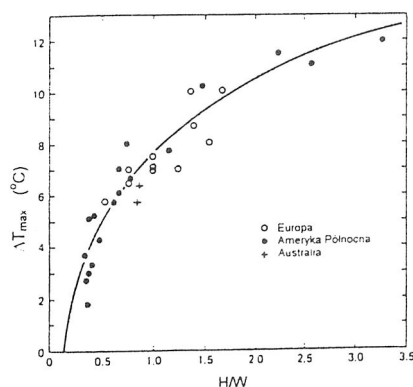
α , β , γ – współczynniki konfiguracji w odniesieniu do nieboskłonu, gruntu i najbliższego otoczenia.

Przykładowe wartości współczynników konfiguracji podano w tabeli 5.1. Niestety Clarke nie przedstawił żadnych wyników badań bądź weryfikacji wyrażenia (5.1).

Tabela 5.1. Współczynniki konfiguracji powierzchni zewnętrznych budynku w odniesieniu do nieboskłonu, gruntu i najbliższego otoczenia [34]

Table 5.1. Representative values of sky, ground and obstruction view factors for external surfaces of building envelopes [34]

Lokalizacja	Współczynniki konfiguracji (równanie (5.1))		
	α	β	γ
Centrum miasta: budynki otaczające o tej samej wysokości, powierzchnie pionowe	0,36	0,36	0,28
Centrum miasta: wyższe budynki otaczające, powierzchnie pionowe	0,15	0,33	0,52
Miasto: powierzchnie pionowe	0,41	0,41	0,18
Dzielnice peryferyjne: powierzchnie pionowe	0,45	0,45	0,10
Centrum miasta: dachy strome	0,50	0,20	0,30
Miasto: dachy strome	0,50	0,30	0,20
Dzielnice peryferyjne	0,50	0,50	0,00



Rys. 5.13. Empiryczna zależność między geometrią kanionu ulicy (H/W w centrum miasta) i maksymalną intensywnością wyspy ciepła $\Delta T_{\max}$ [146]

Fig. 5.13. Experimental dependence between the geometry of the street canyon (H/W in the city) and maximum intensity of the heat island $\Delta T_{\max}$ [146]

W literaturze tematu znajdujemy wiele prób opisów i modeli obliczeniowych bilansu wymiany ciepła między budynkami położonymi po obu stronach ulicy, w różnej konfiguracji [144–146, 172, 183, 194]. Przykładowe wyniki badań przeprowadzonych przez Oke [146] przedstawiono na rys. 5.13, gdzie $\Delta T_{\max}$ jest maksymalną wartością różnicy temperatury powietrza między centrum miasta a najbliższą okolicą.

Znane są również próby tworzenia modeli obliczeniowych wymiany ciepła w zabudowie budynków dla różnej ich konfiguracji. Modele te różnią się stopniem komplikacji, trudno też jest wykonać analizy porównawcze wyników uzyskanych z różnych modeli obliczeniowych [181], ponieważ pomiary w warunkach rzeczywistych z reguły są jednostkowe i bardzo kosztowne. Modele te są w swej naturze raczej teoretyczne i pozostają nie potwierdzone pomiarami.

5.5. Możliwości zastosowania modelu obliczeniowego

Sformułowany w niniejszej pracy model matematyczny oddziaływania ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek pozwala na rozwiązanie szeregu problemów związanych głównie z analizą bilansu ciepłego przegród budowlanych pełnych i przezroczystych. Model ten umożliwia:

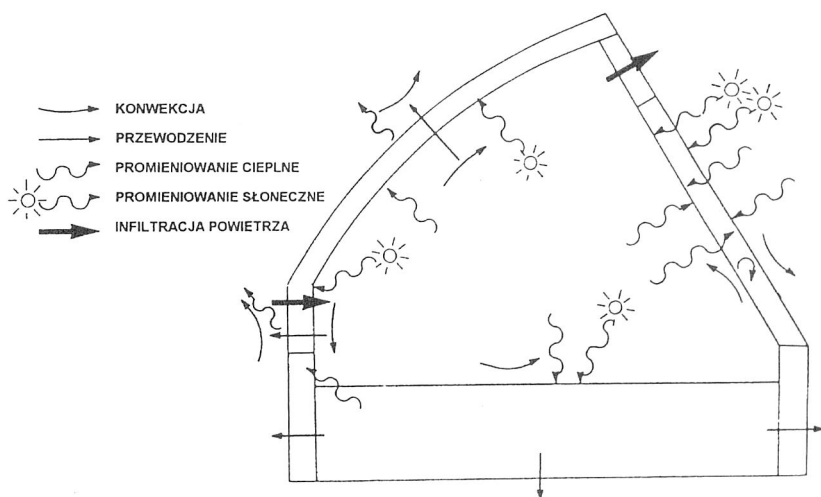
1. Obliczanie wartości natężenia promieniowania ciepłego atmosfery i środowiska zewnętrznego oraz odwzorowanie oddziaływania tego promieniowania na budynek; w konsekwencji pozwala to na kompleksową analizę i ocenę wpływu promieniowania długofalowego na bilans promieniowania oraz na bilans cieplny przegród budowlanych, pochylonych do 90° , w różnych warunkach pogodowych, w warunkach ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła (rozdz. 6).

2. Analizę wpływu radiacyjnych własności zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych, tj. własności spektralnie selektywnych dla promieniowania krótko- i długofalowego, na bilans cieplny przegród. W ramach analizy nieustalonej wymiany ciepła przegród budowlanych ze środowiskiem zewnętrznym, na podstawie zaproponowanego w rozdziale 6.2.2 modelu obliczeniowego, bazującego w części związanej z przewodzeniem ciepła na metodzie impulsowej funkcji przejścia, możliwe jest wykonanie obliczeń wpływu różnie skonfigurowanych własności spektralnie selektywnych na bilans promieniowania i bilans cieplny przegród. Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono w rozdziale 6.2.2. Możliwe jest również zastosowanie zaproponowanego modelu obliczeniowego nieustalonej wymiany ciepła przez przegrody do doboru optymalnych własności spektralnie selektywnych dla przegród pod kątem kształtowania bilansu ciepłego w skali roku.

3. Określenie bilansu ciepłego dowolnego radiatora oraz wyznaczenie jego niezbędnych charakterystyk efektywności chłodzenia radiacyjnego, tj. mocy chłodzenia radiacyjnego (różnicowych strat ciepła przez promieniowanie) oraz wskaźnika temperatury radiatora.

4. Uzupełnienie archiwalnej bazy danych meteorologicznych. Ponieważ promieniowanie długofalowe atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, sformułowany model obliczeniowy pozwala na uzupełnienie archiwalnej bazy danych meteorologicznych o wartość natężenia tego promieniowania dla Wrocławia i okolic (na podstawie standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych). Uzupełnione wieloletnie dane pogodowe umożliwiłyby między innymi analizę trendu zmian wartości natężenia promieniowania cieplnego atmosfery przy powierzchni gruntu, uwarunkowane zmieniającym się stopniem zanieczyszczenia atmosfery.

5. Analizę obliczeniową bilansu cieplnego budynków o dużym stopniu przeszkleń, w tym szklarni, w skali roku. Bilans cieplny tego typu obiektów zdeterminowany jest głównie radiacyjną wymianą ciepła w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego. Stąd szczególnego znaczenia nabiera prawidłowe określenie poszczególnych składowych bilansu promieniowania, a w tym długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego. Poniżej przedstawiono przykładowy schemat wymiany ciepła w szklarni, z wyszczególnieniem składowych bilansu cieplnego [163].



Rys. 5.14. Schemat wymiany ciepła przez elementy składowe szklarni [163]

Fig. 5.14. Scheme of the heat exchange by the elements of a greenhouse

6. Analizę obliczeniową bilansu cieplnego dla okien [143]. Z uwagi na bardzo złożony charakter zjawisk fizycznych występujących podczas przepływu ciepła przez okno, jeszcze do niedawna charakterystyki termiczne okien określone były jedynie w drodze badań. Zaledwie od kilku lat możliwa jest kompleksowa analiza numeryczna bilansu cieplnego okien za pomocą odpowiedniego oprogramowania, które pozwala między innymi na określenie wartości współczynników przenikania ciepła dla okien w funkcji: rodzaju zastosowanych szyb, rodzaju i grubości warstwy gazu wypełniają-

cego zestaw szyb zespolonych, materiału ramy, kąta pochylenia okna, rodzaju i właściwości powłok spektralnie selektywnych pokrywających szyby w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, warunków pogodowych, itp. W analizie przepływu ciepła przez zestaw szyb zespolonych należy ponadto uwzględnić: przewodzenie ciepła przez powierzchnie szklane, konwekcję i promieniowanie ciepła w przestrzeni między szybami, natężenie promieniowania słonecznego oraz natężenie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego. Tę ostatnią wielkość, którą można określić na podstawie sformułowanego w niniejszej pracy modelu oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek, można zastąpić odpowiadającą promieniowaniu długofalowemu średnią temperaturą promieniowania najbliższego otoczenia budynku.

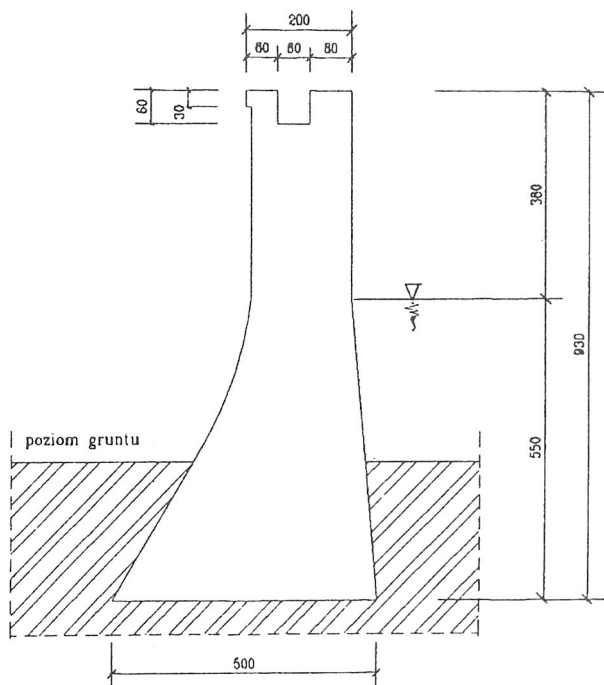
7. Zastąpienie przynajmniej części badań poligonowych z zakresu oceny efektywności energetycznej urządzeń bądź materiałów stosowanych w budownictwie, w kontekście poprawy charakterystyki energetycznej budynków. Promieniowanie długofalowe atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych. Do jego pomiaru wymagana jest kosztowna aparatura. Zaproponowane w tej pracy empiryczne formuły obliczeniowe pozwalają ominąć ten problem.

8. Określenie warunków brzegowych przy rozwiązywaniu nieustalonego bądź zmieniającego się periodycznie przenikania ciepła w analizie rozkładu temperatury i naprężeń termicznych w budowlach inżynierskich, takich jak zapory wodne, mosty, wiadukty, silosy.

Poniżej przedstawiono przykładowe zastosowanie modelu matematycznego oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na obiekty budowlane, opracowanego przez autora pracy, do obliczeń i analizy stanu naprężenia i odkształcenia rzeczywistej konstrukcji żelbetowo-kamiennej w postaci zapory wodnej, zlokalizowanej na Lago Bianco w Szwajcarii [153]. Podstawowym celem pracy była analiza propagacji uszkodzeń przestrzennych konstrukcji z uwzględnieniem wpływu zmian temperatury.

Zapora wodna, poddana analizie, znajduje się w Szwajcarii na wysokości 2234,60 m nad poziomem morza, nad zbiornikiem wodnym Lago Bianco. Wraz z drugą zaporą, znajdującą się na południu zbiornika, tworzą zespół urządzeń piętrzących wodę w przełęczy Bernina. Geometrię zapory pokazano na rys. 5.15; długość korony wynosi 280 m. Zaporę wykonano w dwóch etapach. Budowę obiektu rozpoczęto w roku 1910 i zakończono w roku 1912. W tym okresie zaporę zbudowano z łamanych skał granitowych na zaprawie cementowej. W latach 1941–1942 zaporę przebudowano, zwiększając wysokość korony o 3,80 m, stosując beton. Z uwagi na pojawiające się rysy, w latach 1992–1994 przeprowadzono ścisłą kontrolę stanu technicznego zapory. Kontrola objęła pomiar odkształceń obiektu, pomiar szerokości rozwarcia rys, temperatury na powierzchni betonu oraz określenie stanu zawilgocenia powierzchni zapory.

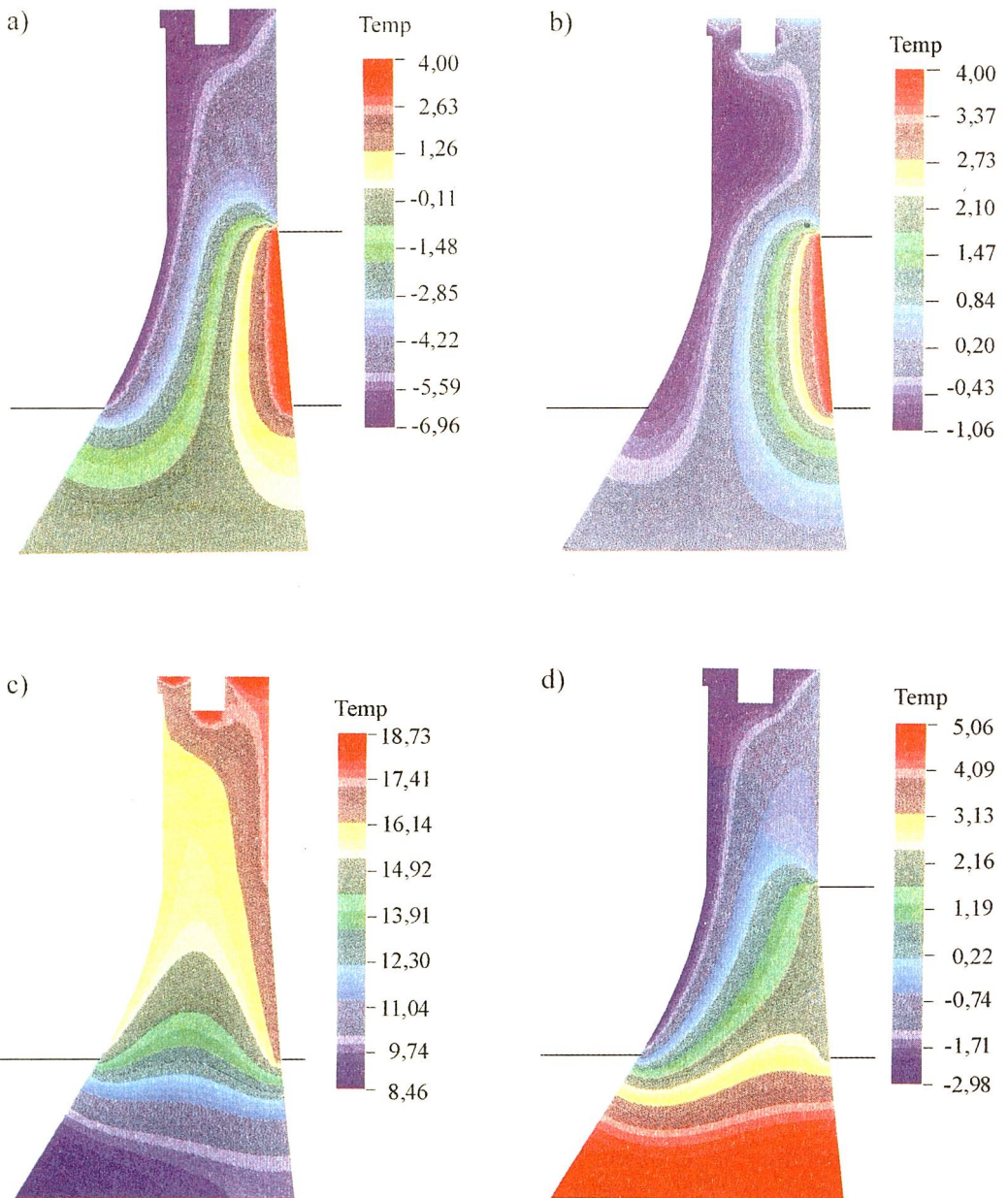
Analizę termiczną oraz wytrzymałościową zapory przeprowadzono numerycznie metodą elementów skończonych (MES), systemem obliczeniowym COSMOS/M (firmy Structural Research and Analysis Corporation w Santa Monica, California, USA). Obliczenia rozkładu temperatury na powierzchniach zewnętrznych i w przekroju zapory, naprężenia termiczne oraz odkształcenia zapory przeprowadzono w skali roku dla każdego miesiąca.



Rys. 5.15. Przekrój przez analizowaną zaporę wodną
Fig. 5.15. Section of the dam under investigation

Model matematyczny oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego, opracowany przez autora pracy, był wykorzystany do opisu warunków brzegowych w analizie termicznej konstrukcji zapory. Mimo że model ten nie był zweryfikowany dla warunków meteorologicznych lokalizacji zapory, wyniki obliczeń rozkładu temperatury na jej powierzchni oraz wewnątrz zapory wykazały dosyć dobrą zgodność z pomiarami. Dostępną zgodność uzyskano również między obliczonymi i zmierzonymi odkształceniami termicznymi zapory [153].

Przykładowe wyniki obliczeń rozkładu temperatury na powierzchni oraz w przekroju analizowanej zapory wodnej dla wybranych miesięcy przedstawiono na rys. 5.16.



Rys. 5.16. Obliczony rozkład temperatury na powierzchni i w przekroju analizowanej zapory dla miesięcy: a) stycznia, b) kwietnia, c) sierpnia d) listopada [153]

Fig. 5.16. Calculated distributions of the temperature at the surface and in the section of the dam under investigation for the following months: a) January, b) April, c) August, d) November [153]

6. WPŁYW DŁUGOFALOWEGO PROMIENIOWANIA ŚRODOWISKA ZEWNĘTRZNEGO NA BILANS CIEPLNY PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

6.1. Przenikanie ciepła przez przegrody w stanie ustalonym

6.1.1. Poprawka temperaturowa do obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego

W dotychczasowych obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli (np. obliczanie strat ciepła przez przegrody budowlane, wyznaczanie rozkładu temperatury w przegrodzie, itp.) wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględnia się w sposób, który nie odzwierciedla rzeczywistych zmian elementów tego środowiska i ich oddziaływania na przegrody budowlane. Dla okresu zimowego, w modelu ustalonej wymiany ciepła, zakłada się równość temperatury powietrza t_a i średniej temperatury promieniowania nieboskłonu t_r , ($t_a = t_r$). Jak wykazano wcześniej, temperatura nieboskłonu może być dla powierzchni poziomej (np. dla stropodachu), przy bezchmurnym niebie w nocy, niższa od temperatury powietrza nawet o około 20 °C. Tak znaczne różnice między temperaturami t_a i t_r powodują często występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego, tj. obniżenie się temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu o kilka stopni w stosunku do temperatury otaczającego powietrza, co jest ściśle związane ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie. Stąd wartość gęstości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez stropodach, obliczana przy założeniu równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania nieboskłonu, może się znacznie różnić od wartości rzeczywistej. Interesującą wydaje się więc odpowiedź na pytanie o błąd jaki popełnia się w obliczeniach strat ciepła metodą tradycyjną w stosunku do wielkości tych strat obliczonych przy założeniu, że temperatury te nie są sobie równe. Pytanie to można sformułować jeszcze inaczej, a mianowicie jaką wartość powinna mieć obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego (dla okresu zimowego), aby przyjęty model ustalonego, jednokierunkowego przepływu ciepła uwzględniał rzeczywiste radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, w zakresie promieniowania cieplnego. Szczegółową analizę tego problemu przedstawiono poniżej.

W obliczeniach z zakresu bilansowania cieplnego przegród budowlanych i budynków często stosuje się tzw. skorygowaną słoneczną temperaturę powietrza t_{ac} definiowaną następująco [3]:

$$t_{ac} = t_a + \frac{a_s I_s}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (6.1)$$

gdzie:

- t_a – temperatura powietrza zewnętrznego, °C,
- a_s – współczynnik absorpcji promieniowania słonecznego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody,
- I_s – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego, Wm^{-2} ,
- ε – współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody,
- ΔR – różnica między promieniowaniem długofalowym środowiska zewnętrznego, docierającym do danej płaszczyzny i promieniowaniem ciała czarnego o temperaturze otaczającego powietrza, Wm^{-2} ,
- h_o – współczynnik przejmowania ciepła przez powierzchnię zewnętrzną, $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$,

Z postaci równania (6.1) wynika, że skorygowana temperatura powietrza t_{ac} dla różnych przegród budowlanych, w tych samych warunkach meteorologicznych, może być różna z uwagi na różne właściwości radiacyjne powierzchni zewnętrznych, na różny kąt pochylenia bądź inne zorientowanie względem stron świata.

Wyrażenie $\varepsilon \Delta R$ jest równoważne różnicowemu promieniowaniu długofalowemu R_{net} przegrody budowlanej, które oblicza się z zależności przedstawionych w rozdziale 3.4.1. Dla stropodachów w okresie zimowym i dla wszystkich przegród w nocy równanie (6.1) można zapisać [129]:

$$t_{ac} = t_a - \frac{R_{\text{net}}}{h_o} = t_a + \Delta t \quad (6.2)$$

gdzie Δt jest poprawką temperaturową (°C).

Różnicowe radiacyjne straty ciepła zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej R_{net} , obliczane ze wzoru (3.28) bądź (3.29), dla warunków bezchmurnego nieba są skierowane na zewnątrz i mają wartość ujemną. Stąd, poprawka temperaturowa Δt , uwzględniająca rzeczywiste oddziaływanie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane jest ujemna i obniża wartość obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego, przyjmowanej do obliczeń cieplnych. Średnią temperaturę promieniowania niebosłonu, występującą w równaniach (3.28) i (3.29) oblicza się ze wzoru:

$$t_r = (R_a / \sigma)^{0,25} - 273,15 \quad (6.3)$$

w którym natężenie promieniowania długofalowego atmosfery R_a określa się na podstawie sformułowanego w rozdziale 4 modelu matematycznego długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego.

Temperaturę zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej można obliczyć z zależności [132]:

$$t_s = (t_i / R + t_a h_c + t_r h_r) / (h_c + h_r + 1/R) \quad (6.4)$$

a gęstość strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę ze wzoru:

$$q = (t_i - t_s)/R \quad (6.5)$$

gdzie:

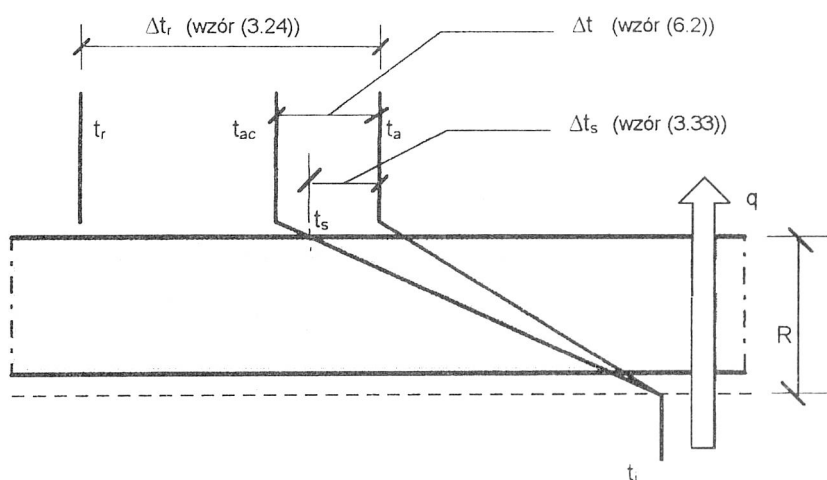
t_s, t_i, t_a, t_r – temperatury odpowiednio: zewnętrznej powierzchni przegrody, powietrza w pomieszczeniu, powietrza na zewnątrz oraz temperatura promieniowania nieboskłonu, °C,

h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$,

h_r – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$,

R – opór cieplny przegrody budowlanej (nie uwzględnia oporu przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej), $\text{m}^2 \text{K/W}$,

Oznaczenia wielkości występujących w równaniach od (6.2) do (6.5) pokazano również na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Oznaczenia wielkości wpływających na bilans cieplny stropodachu w warunkach ustalonej wymiany ciepła

Fig. 6.1. Denotations of the parameters influencing the heat balance of a flat roof at the conditions of stationary heat exchange

Analiza wzorów od (6.2) do (6.5) wskazuje, że wartość poprawki temperaturowej Δt zależy od oporu cieplnego przegrody budowlanej, kąta jej pochylenia, od emisyjności jej powierzchni zewnętrznej, prędkości wiatru oraz od temperatury nieboskłonu, wartości temperatury powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia.

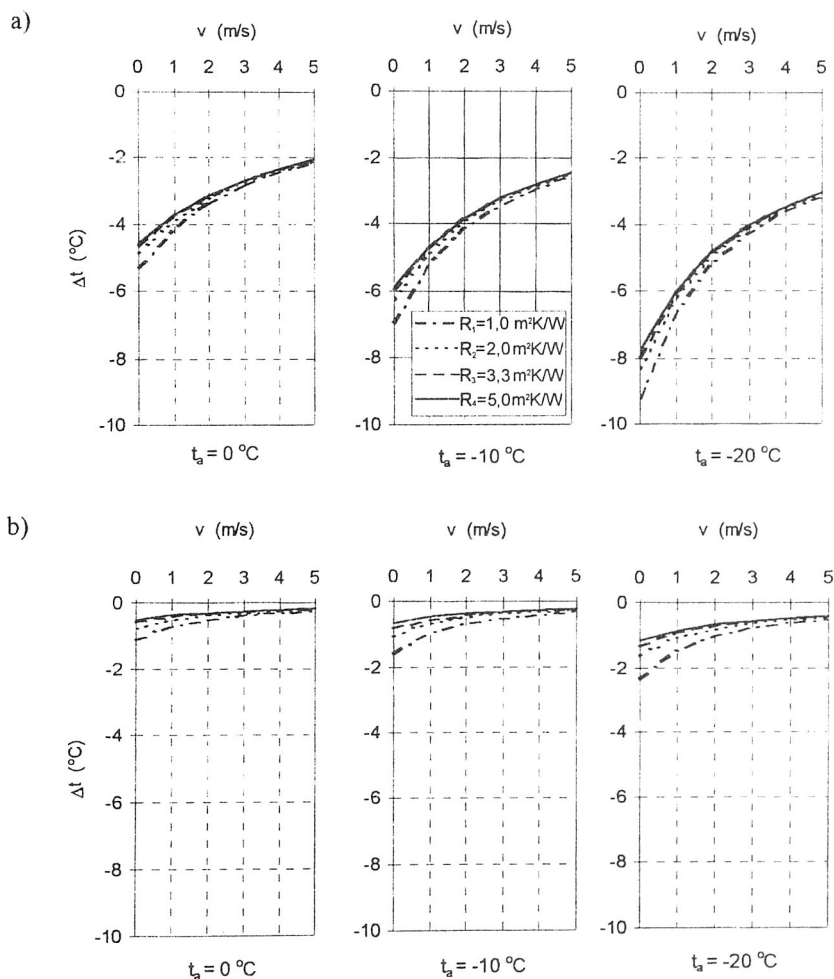
Badania mające na celu określenie wartości poprawki temperaturowej Δt wykonano na istniejącym budynku we Wrocławiu, według opisu w rozdz. 4.2. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w zimie wykazały, że dla stropodachu poprawka temperaturowa osiągnęła wartość około $-4,1$ °C, a dla ściany około $-1,2$ °C.

Przeprowadzono również analizę obliczeniową, mającą na celu określenie współzależności między wielkościami występującymi w przedstawionych powyżej równaniach. Przyjęto cztery wartości oporu cieplnego przegrody budowlanej: $R_1 = 1,0$, $R_2 = 2,0$, $R_3 = 3,33$ oraz $R_4 = 5,0$ (m^2KW^{-1}), co daje wartości współczynników przenikania ciepła, odpowiednio, $U_1 = 1,0$, $U_2 = 0,5$, $U_3 = 0,3$ i $U_4 = 0,2$ ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Założono wartość współczynnika emisyjności powierzchni zewnętrznej $\varepsilon = 0,9$. Przyjęto stałą wartość temperatury powietrza w pomieszczeniu $t_i = 20$ °C oraz temperatury powietrza zewnętrznego $t_a = 0$, $t_a = -10$ i $t_a = -20,0$ °C, zakładając jednocześnie warunki bezchmurnego nieba. Na rysunku 6.2 pokazano wyniki analizy, które potwierdzają sygnalizowaną wcześniej uwagę, że poprawka temperaturowa Δt dla stropodachu osiąga wartości ujemne, co oznacza obniżenie wartości obliczeniowej temperatury powietrza (równanie (6.2)). Bezwzględna wartość poprawki temperaturowej Δt rośnie wraz z obniżeniem się temperatury powietrza zewnętrznego i osiąga maksymalną wartość dla $t_a = -20$ °C, zarówno dla stropodachu jak i dla ścian. Dla danej temperatury powietrza zewnętrznego najmniejsze wartości poprawki temperaturowej otrzymano dla największego oporu cieplnego stropodachu lub ściany. Można również zauważyć, że bezwzględna wartość poprawki Δt zmniejsza się krzywoliniowo wraz ze zwiększaniem się prędkości wiatru. Jak można się było spodziewać, bezwzględne wartości poprawki temperaturowej dla ścian są znacznie mniejsze niż dla stropodachów, co wynika z kompensującego radiacyjnego oddziaływania gruntu oraz obiektów otaczających.

Powyższe obliczenia wykonano dla warunków bezchmurnego nieba. W rzeczywistości, bezwzględne wartości poprawki Δt będą mniejsze, zarówno dla stropodachów jak i dla ścian, z uwagi na częstość występowania dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze, co potwierdziły badania na obiekcie rzeczywistym. Obliczenie wartości poprawek Δt dla sezonu grzewczego dla danej lokalizacji powinno być zatem poprzedzone analizą częstości występowania dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze. Chmury, zwłaszcza o niskiej podstawie, w znacznym stopniu kompensują radiacyjne straty ciepła przegród budowlanych, łagodząc efekt „zimnego nieba” (bezchmurnego). W rezultacie wartości poprawek Δt będą nieco mniejsze, co potwierdzają również inni autorzy. Na przykład, w Szwajcarii zaleca się [194] przyjmować wartości $\Delta t = -5$ °C dla stropodachów oraz $\Delta t = -2$ °C dla ścian; w USA natomiast zaleca się [3] odpowiednio $\Delta t = -4$ °C i $\Delta t = 0$ °C, zatem wyniki uzyskane z badań we Wrocławiu mieszczą się w zakresie proponowanym przez innych autorów.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że wykonywanie obliczeń strat ciepła przez przegrody budowlane, w ustalonym stanie przepływu, przy założeniu równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego jest zbyt dużym uproszczeniem i może prowadzić do znacznych błędów w określaniu wielkości strat ciepła. W celu ograniczenia tych błędów zaleca

się w obliczeniach metodą tradycyjną (stan ustalony przepływu) uwzględniać rzeczywiste ciepłne promieniowanie środowiska zewnętrznego poprzez wprowadzenie poprawki temperaturowej Δt , obniżającej wartość obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego. Wartość tej poprawki będzie prawdopodobnie różna w różnych regionach kraju w zależności od stopnia zanieczyszczenia atmosfery oraz frekwencji dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze. Dobór wartości poprawki temperaturowej Δt powinien być uzasadniony stosownymi pomiarami oraz analizą danych meteorologicznych dla danej lokalizacji.



Rys. 6.2. Wartości poprawki temperaturowej Δt w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego, oporu cieplnego oraz prędkości wiatru dla: a) stropodachu, b) ściany

Fig. 6.2. The values of temperature correction Δt as a function of the ambient air temperature, thermal resistance and the wind velocity

Wartość poprawki temperaturowej zależy od kąta pochylenia przegrody, oporu cieplnego, własności emisyjnych jej powierzchni zewnętrznej oraz od temperatury powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia, temperatury nieboskłonu, prędkości wiatru oraz od stopnia zachmurzenia nieba. Z uwagi na charakter zmian długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego oddziałującego na przegrody budowlane (rozdz. 2) wartości poprawek Δt powinny być zróżnicowane dla stropodachów, dla przegród pochyłonych (np. połacie dachowe) i dla ścian.

W przypadku analizowania bilansu cieplnego przegród budowlanych dla okresu kilku lub też kilkunastu dni zimowych, można korzystać wprost z wyników obliczeń przedstawionych na rys. 6.2. Dla okresu dłuższego natomiast, np. dla zimy, zaleca się skorygować obliczeniową wartość temperatury powietrza (wzór (6.2)) o poprawkę temperaturową Δt ; dla Wrocławia i okolic do obliczeń można przyjąć $\Delta t = -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla stropodachu oraz $\Delta t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla ścian oraz wartości pośrednie dla przegród pochyłonych (połacie dachowe).

6.1.2. Korekta bilansu cieplnego

Wprowadzenie poprawki temperaturowej Δt do obliczeń bilansu cieplnego stropodachów prowadzi do wyznaczenia większej wartości gęstości strumienia ciepła przenikającego (traconego) przez stropodach. Poniżej przeprowadzono analizę obliczeniową, mającą na celu określenie wielkości błędu jaki popełnia się przy obliczaniu strat ciepła przez stropodachy w dotychczas stosowanym modelu, a więc przy założeniu równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania otoczenia. Obliczono gęstość strumienia ciepła przepływającego przez stropodach (równanie (6.7)), a następnie tę samą wielkość według obowiązującego wzoru normowego:

$$q_N = U(t_i - t_a) \quad (6.6)$$

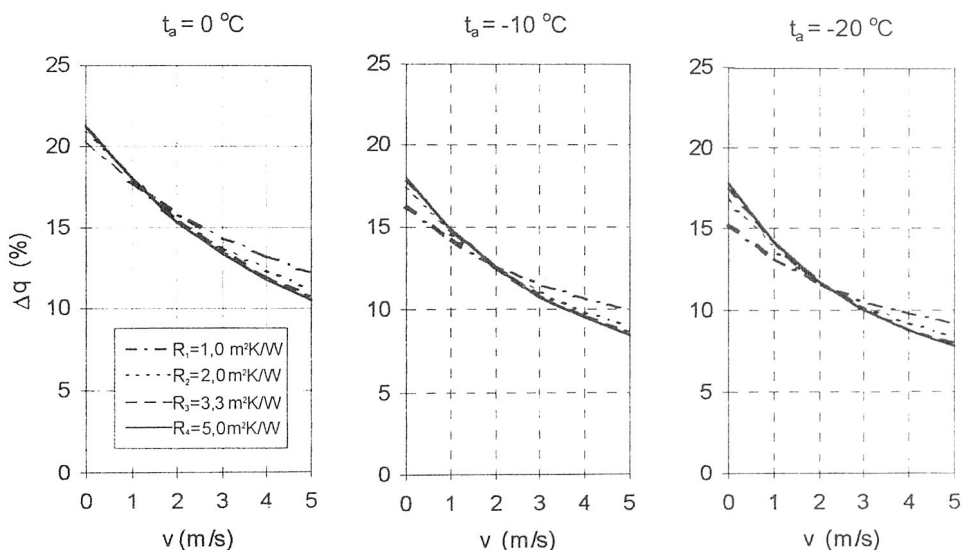
w którym q_N jest gęstością strumienia ciepła (Wm^{-2}), U jest współczynnikiem przenikania ciepła ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Następnie obliczono procentową względną różnicę między wielkościami q (równanie (6.5)) oraz q_N (równanie (6.6.)) odniesioną do wielkości normowej q_N , ze wzoru:

$$\Delta q = [(q - q_N)/q_N] 100\% \quad (6.7)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 6.3. Obliczenia wykazały, że konsekwencją stosowania w obliczeniach strat ciepła przez stropodachy założenia upraszczającego o równości temperatury powietrza i promieniowania atmosfery, jest wyznaczenie mniejszej wartości gęstości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez stropodachy w stosunku do wartości rzeczywistej. Błąd popełniany w obliczeniach cieplnych metodą tradycyjną wzrasta dla wyższej temperatury powietrza zewnętrznego (tj. dla $t_a = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, rys. 6.3). Dla danej temperatury powietrza t_a błąd ten rośnie wraz ze

wzrostem oporu cieplnego przegrody, a jednocześnie maleje krzywoliniowo wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Przykładowo, dla temperatury powietrza zewnętrznego równej $t_a = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, dla poprawnie zaizolowanych stropodachów, o oporach cieplnych R_3 i R_4 , błąd ten wynosi średnio od około 13 do 15% przy prędkości wiatru do 2 m/s (rys. 6.3).

Powyższa analiza obliczeniowa została przeprowadzona, podobnie jak w przypadku poprawki temperaturowej Δt , dla warunków bezchmurnego nieba – w praktyce oznacza to okres od kilkunastu do około 30 dni w sezonie grzewczym, w zależności od panujących warunków meteorologicznych. W obliczeniach bilansu cieplnego stropodachów dla okresu znacznie dłuższego, np. dla całego sezonu ogrzewczego, należy uwzględnić frekwencję występowania dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze. W rezultacie wspomniany wyżej błąd popełniany w obliczeniach cieplnych metodą tradycyjną będzie nieco mniejszy.



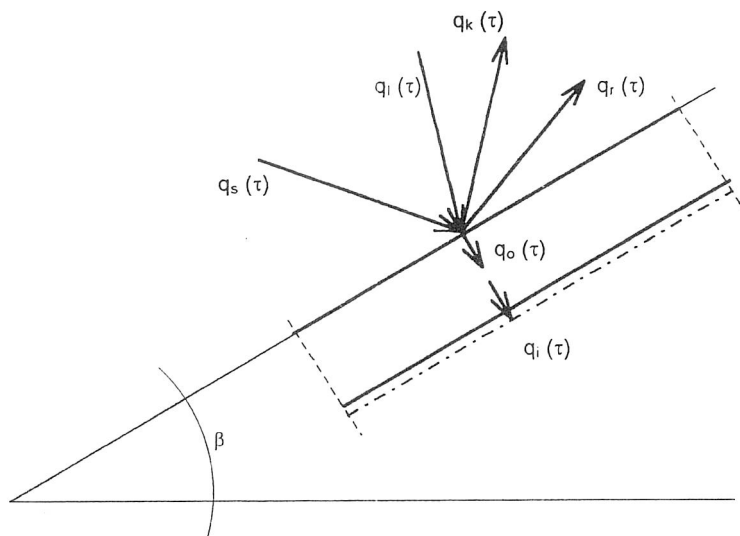
Rys. 6.3. Wartości procentowej różnicy Δq (równanie (6.7)) dla stropodachu w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego, oporu cieplnego oraz prędkości wiatru
Fig. 6.3. The values of percentage difference Δq (Eq. (6.7)) for a flat roof as a function of the ambient air temperature, thermal resistance and the wind velocity

Konsekwencją wprowadzenia do obliczeń cieplnych poprawki temperaturowej Δt jest obliczenie większej wartości gęstości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez stropodachy w stosunku do wartości otrzymanej z obliczeń metodą tradycyjną. Dla stropodachów pełnych różnice te, w stosunku do wyników metody tradycyjnej, mogą wynosić średnio około 16÷18% przy temperaturze powietrza $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i około 13÷15% przy temperaturze $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, przy prędkości wiatru do 2 m/s.

6.2. Nieustalona wymiana ciepła przez przegrody budowlane

6.2.1. Model bilansu cieplnego przegrody

Zewnętrzna powierzchnia przegrody budowlanej wymienia ciepło z najbliższym środowiskiem zewnętrznym drogą promieniowania (w zakresie promieniowania słonecznego oraz cieplnego) oraz drogą konwekcji. Składniki bilansu cieplnego dla przegrody budowlanej, nachylonej pod kątem β względem poziomu, przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Składniki bilansu cieplnego zewnętrznej powierzchni przegrody; $q_k(\tau)$ jest gęstością strumienia ciepła przewodzonego przy powierzchni wewnętrznej w chwili τ (W m^{-2}), pozostałe składniki bilansu zgodnie z opisem do równania (6.8)

Fig. 6.4. The elements of the heat balance for the outer surface of the building envelope; $q_k(\tau)$ is the density of the heat flux at the inner surface at the time τ (W m^{-2}), the other denotations see Eq. (6.8)

Dla zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w każdej chwili τ zachodzi równowaga cieplna opisana równaniem [126, 127]:

$$q_s(\tau) + q_l(\tau) + q_o(\tau) = q_k(\tau) + q_r(\tau) \quad (6.8)$$

w którym:

$q_s(\tau)$ – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego (bezpośredniego i rozproszonego) absorbowanego w chwili τ (W m^{-2}),

$q_l(\tau)$ – natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, absorbowane w chwili τ (W m^{-2}),

$q_o(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła przewodzonego przy powierzchni zewnętrznej w chwili τ (W m^{-2}),

$q_k(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję w chwili τ (W m^{-2}),

$q_r(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię zewnętrzną, w chwili τ (W m^{-2}),

Poszczególne składowe równania (6.8) oblicza się następująco:

$$q_s(\tau) = a_s I_s(\tau) + (1-a)I_s(\tau) \quad (6.9)$$

Ponieważ drugi składnik prawej strony powyższego równania, tj. promieniowanie słoneczne odbite od powierzchni przegrody najczęściej jest wielkością pomijalnie małą, równanie (6.9) można zapisać:

$$q_s(\tau) = a_s I_s(\tau) \quad (6.10)$$

gdzie:

a_s – współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni przegrody dla promieniowania słonecznego,

$I_s(\tau)$ – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego w chwili τ (W m^{-2}),

Natężenie pochłanianego promieniowania długofalowego wyraża równanie:

$$q_l(\tau) = \varepsilon R_\beta(\tau) \quad (6.11)$$

w którym:

ε – współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody,

$R_\beta(\tau)$ – natężenie promieniowania długofalowego (cieplnego) najbliższego otoczenia budynku w chwili τ (W m^{-2}),

Natężenie promieniowania długofalowego $R_\beta(\tau)$ określa się na podstawie sformułowanego w rozdziale 4 modelu obliczeniowego oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek.

Strumień ciepła wymieniany przez konwekcję oblicza się ze wzoru:

$$q_k(\tau) = h_c(\tau)[T_s(\tau) - T_a(\tau)] \quad (6.12)$$

w którym:

$h_c(\tau)$ – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję w chwili τ ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

$T_s(\tau)$ – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody w chwili τ (K),

$T_a(\tau)$ – temperatura otaczającego powietrza w chwili τ (K).

Gęstość strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody wyraża zależność:

$$q_r(\tau) = \varepsilon \sigma [T_s(\tau)]^4 \quad (6.13)$$

w której σ jest stałą Stefana–Boltzmann.

Gęstość strumienia ciepła $q_o(\tau)$, przewodzonego przy zewnętrznej powierzchni przegrody oblicza się według zastosowanej metody obliczeniowej – w niniejszej pracy zastosowano metodę impulsowej funkcji przejścia (rozdział 6.2.2).

Równanie (6.8) można zatem zapisać w postaci:

$$a_s I_s(\tau) + \varepsilon R_\beta(\tau) + q_o(\tau) = h_c(\tau)[T_s(\tau) - T_a(\tau)] + \varepsilon \sigma [T_s(\tau)]^4 \quad (6.14)$$

Powyższe równanie jest w niniejszej pracy podstawowym wyrażeniem do obliczania bilansu cieplnego przegrody budowlanej, poddanej oddziaływaniu zmiennych w czasie elementów środowiska zewnętrznego i pozwala na wszechstronną analizę tego bilansu w kontekście między innymi racjonalnego użytkowania energii cieplnej w budynku w skali roku.

Równowaga cieplna zewnętrznej powierzchni przegrody (lub innej powierzchni czynnej) decyduje o wielkości i zwrocie strumieni składowych w danej chwili τ , a więc determinuje chwilowe zyski bądź straty ciepła. Z tego faktu oraz z postaci równania (6.14) wynika wprost wpływ radiacyjnych własności powierzchni a_s i ε (rozdz. 3.2) oraz jej kąta pochylenia β na chwilowe efekty ilościowe nieustalonej wymiany ciepła przegrody ze środowiskiem zewnętrznym. Współczynnik absorpcji a_s powierzchni zewnętrznej decyduje bowiem o ilości promieniowania słonecznego pochłanianego przez tę powierzchnię. Wartość współczynnika emisyjności ε powierzchni warunkuje wielkość różnicowego promieniowania długofalowego między daną powierzchnią a promieniowaniem niebosłonu, gruntu i obiektów otaczających. Kąt pochylenia β powierzchni decyduje między innymi o ilości docierającego długofalowego promieniowania atmosfery i najbliższego otoczenia budynku. Reasumując, zmiana radiacyjnych własności zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej (a_s , ε) oraz jej kąta pochylenia (β) lub położenia płaszczyzny względem stron świata prowadzi bezpośrednio do zmiany chwilowych wartości gęstości strumieni cieplnych (równanie (6.14)), co w konsekwencji wpływa na całkowite efekty ilościowe nieustalonej wymiany ciepła między rozważaną przegrodą budowlaną a środowiskiem zewnętrznym.

Występujące w równaniu bilansowym (6.8) wielkości $q_r(\tau)$ oraz $q_l(\tau)$ jednoznacznie determinują bilans promieniowania długofalowego R_{net} zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej. Po dodatkowym uwzględnieniu natężenia absorbowanego całkowitego promieniowania krótkofalowego (słonecznego) $q_s(\tau)$ uzyskujemy całkowity bilans promieniowania $R_l(\tau)$ zewnętrznej powierzchni przegrody opisany równaniem:

$$R_l(\tau) = q_s(\tau) - R_{\text{net}}(\tau) \quad (6.15)$$

Zatem całkowity bilans promieniowania $R_l(\tau)$ zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej jest różnicą między natężeniem pochłoniętego promieniowania krótkofalowego $q_s(\tau)$ i natężeniem różnicowego promieniowania długofalowego $R_{\text{net}}(\tau)$. Równanie (6.15) można również zapisać:

$$R_l(\tau) = q_s(\tau) + q_l(\tau) - q_r(\tau) \quad (6.16)$$

$$R_l(\tau) = a_s I_s(\tau) + \varepsilon R_{\beta}(\tau) - \varepsilon \sigma [T_s(\tau)]^4 \quad (6.17)$$

Analizując wymianę ciepła przez promieniowanie zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej z najbliższym otoczeniem, oczywiście należy mieć na uwadze, że równocześnie przegroda wymienia ciepło przez konwekcję i przez przewodzenie, co uwzględniają równania bilansowe (6.8) i (6.14). Całkowity bilans cieplny przegrody w danej chwili τ jest wypadkową wymienionych elementów.

6.2.2. Metoda impulsowej funkcji przejścia do obliczania nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrody wielowarstwowe

6.2.2.1. Założenia modelu obliczeniowego

Przedmiotem analizy w niniejszej pracy jest między innymi proces nieustalonej wymiany ciepła między wielowarstwową przegrodą budowlaną a otaczającym ją środowiskiem zewnętrznym. Proces ten jest ściśle związany z dynamicznymi charakterystykami cieplnymi przegrody, które zasadniczo wpływają na efekt akumulacji ciepła i stateczność cieplną przegrody ([95–101, 130, 156]). Dynamiczne właściwości cieplne przegród budowlanych, ograniczających ogrzewaną kubaturę budynku, mają istotny wpływ na chwilowe obciążenia instalacji grzewczych i klimatyzacyjnych, na komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach oraz na zużycie energii cieplnej w budynkach. Znajomość tych właściwości przegród konieczna jest zwłaszcza wówczas, gdy są stosowane układy regulacji automatycznej, których zadaniem jest utrzymywanie założonych warunków cieplnych w pomieszczeniach, niezależnie od zmiany warunków atmosferycznych lub też występowania innych zakłóceń w postaci dodatkowych zysków lub strat ciepła w pomieszczeniach lub zmiany parametrów pracy urządzenia grzewczego. Powyższe zagadnienia nabierają obecnie w Polsce szczególnego znaczenia z uwagi na konieczność dostosowania naszych wymagań w zakresie izolacyjności termicznej przegród budowlanych do norm obowiązujących w krajach Unii Europejskiej o podobnym co Polska klimacie [157, 158].

Wymiana ciepła między przegrodą budowlaną a jej najbliższym otoczeniem jest realizowana za pomocą trzech istotnie różnych pod względem fizycznym sposobów,

to jest przewodzenia, konwekcji i promieniowania. Podstawą tworzenia modelu takiego procesu jest równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych (równanie Fouriera), uzupełnione równaniami przejmowania ciepła przez konwekcję i promieniowanie. Równanie Fouriera dla jednokierunkowego nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrodę, przy założeniu stałości w czasie jej gęstości, ciepła właściwego i współczynnika przewodności cieplnej oraz braku wewnętrznych źródeł ciepła, jest postaci:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (6.18)$$

gdzie:

τ – czas (s),

x – współrzędna normalna względem powierzchni przegrody, określająca położenie punktu (m),

$T(x, \tau)$ – zależność funkcyjna temperatury od położenia punktu i czasu,

λ – przewodność cieplna właściwa (W/(mK)),

c_p – ciepło właściwe (J/(kgK)),

ρ – gęstość materiału (kg/m³).

Równanie (6.18) można również przedstawić następująco:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (6.19)$$

gdzie $a = \lambda / \rho c_p$ jest współczynnikiem wyrównywania temperatury (m²/s).

Stałość współczynników λ , ρ , c_p jest konsekwencją przyjęcia założenia niezmienności w czasie tych wielkości w zakresie temperatury spotykanej w budownictwie oraz założenia jednorodności i izotropowości materiałów przegrody. Założenie jednowymiarowości pola temperatury przyjmuje się w większości problemów rozwiązywanych na potrzeby fizyki budowli. Przestaje ono wystarczać przy ocenie własności cieplnych przegród budowlanych w miejscach występowania mostków termicznych.

Wyznaczenie funkcji $T(x, \tau)$ z równania Fouriera, czyli określenie stanu pola temperatury, wymaga sprecyzowania obszaru, w którym rozpatruje się przewodzenie ciepła (warunki geometryczne) oraz podania warunków brzegowych i warunku początkowego (warunki graniczne).

W rozpatrywanym problemie przewodzenie ciepła odbywa się przez przegrodę wielowarstwową. Założono, że modelem strukturalnym przegrody jest nieprzezroczysta płyta równoległościenna, złożona z warstw o stałych grubościach i że poszczególne warstwy są wykonane z różnych, ale jednorodnych i izotropowych materiałów.

Założono również, że własności termofizyczne materiałów, tj. przewodność cieplna, gęstość oraz ciepło właściwe dla każdej warstwy są stałe.

Modelem przewodzenia ciepła przez przegrodę wielowarstwową jest układ liniowych równań różniczkowych (6.20), złożony z równań postaci (6.18), określonych dla każdej warstwy przegrody; warstwy ponumerowane są od 1 do n w kierunku od powierzchni zewnętrznej ($x = 0$) do powierzchni przegrody od strony pomieszczenia ($x = d$):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_{p1}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} && \text{dla } 0 \leq x \leq d_1 \\
 \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_{p2}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} && \text{dla } d_1 \leq x \leq d_1 + d_2 \\
 &\vdots && \\
 \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_n}{\rho_n c_{pn}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} && \text{dla } \sum_{k=1}^{n-1} d_k \leq x \leq \sum_{k=1}^n d_k
 \end{aligned} \tag{6.20}$$

gdzie

$d_k, c_{pk}, \rho_k, \lambda_k$ – odpowiednio: grubość, ciepło właściwe, gęstość, przewodność cieplna właściwa dla warstwy k ,
 n – ilość warstw przegrody.

Na granicach styku między poszczególnymi warstwami obowiązuje warunek brzegowy IV rodzaju, zakładający równość (ciągłość) temperatury i strumienia ciepła na brzegu wspólnym dla dwóch warstw, przy czym gęstość strumienia ciepła wynika z prawa Fouriera.

Powierzchnie graniczne przegrody budowlanej (powierzchnia zewnętrzna oraz powierzchnia od strony pomieszczenia) wymieniają ciepło z otaczającym ośrodkiem przez konwekcję i przez promieniowanie. Przyjęto, że w wymianie ciepła przez promieniowanie bierze udział (rys. 3.1) promieniowanie krótkofalowe (słoneczne), absorbowane przez zewnętrzną powierzchnię przegrody oraz promieniowanie długofalowe środowiska zewnętrznego absorbowane i promieniowanie długofalowe emitowane przez tę powierzchnię. Założono również, że emisja i pochłanianie promieniowania odbywają się na powierzchniach granicznych przegrody oraz że powierzchnie te mają jednorodne własności radiacyjne, to znaczy stałe wartości współczynników emisyjności, absorpcyjności oraz refleksyjności.

W zakresie wymiany ciepła przez konwekcję założono, że średnia wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję, w danej chwili, jest jednakowa na całej powierzchni przegrody.

Za warunek brzegowy, opisujący sposób wymiany ciepła na powierzchni zewnętrznej (w układzie „przegroda–środowisko zewnętrzne”), przyjęto warunek brzegowy I rodzaju, to znaczy warunek Dirichleta. Sformułowanie tego warunku oznacza podanie rozkładu temperatury na powierzchni granicznej w danej chwili, to znaczy:

$$T(0, \tau) = f(\tau) \quad \text{dla } \tau \geq 0 \quad (6.21)$$

Sposób wymiany ciepła na powierzchni granicznej układu „przegroda–pomieszczenie” określono warunkiem brzegowym III rodzaju, który oznacza, że wymiana ciepła na tej powierzchni odbywa się według prawa Newtona, to znaczy:

$$-\lambda_n \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=d} = h_c(\tau) [T_i(\tau) - T(x, \tau)] + h_r(\tau) [T_r(\tau) - T(x, \tau)] \bigg|_{x=d} \quad (6.22)$$

gdzie:

λ_n – przewodność cieplna właściwa dla warstwy od strony pomieszczenia (W/(mK)),

$h_c(\tau)$ – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, w chwili τ (W/(m² K)),

$h_r(\tau)$ – współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, w chwili τ (W/(m² K)),

$T_i(\tau)$ – temperatura powietrza w pomieszczeniu, w chwili τ (K),

$T_r(\tau)$ – średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu, w chwili τ (K),

$T(x, \tau)|_{x=d}$ – temperatura na powierzchni od strony pomieszczenia, w chwili τ (K).

Sformułowanie warunku (6.22) polega na podaniu rozkładu współczynników h_c i h_r oraz temperatury T_i i T_r w dowolnej chwili. Dla jednoznaczności rozwiązania postawionego problemu należy określić warunek początkowy, to znaczy podać rozkład temperatury w rozpatrywanym obszarze w chwili $\tau = 0$. Przyjęto, że w chwili $\tau = 0$ temperatura w rozpatrywanym obszarze $0 \leq x \leq d$ wynosiła 0 °C.

W sformułowanym powyżej zagadnieniu nieustalonej wymiany ciepła występują nieustalone warunki brzegowe w postaci zmieniającej się w czasie temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej oraz zmieniających się w czasie współczynników przejmowania ciepła h_c i h_r , a także temperatury T_i i T_r , opisujących sposób wymiany ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia.

Jedną z metod rozwiązywania zagadnień nieustalonego przepływu ciepła jest metoda operatorowa, wykorzystująca przekształcenie Laplace’a [101, 147, 156, 190]. Stosując transformację Laplace’a do rozwiązywania zagadnienia jednokierunkowego, nieustalonego przepływu ciepła przez przegrodę wielowarstwową można otrzymać, w drodze przekształceń, równanie macierzowe, które wiąże transformaty Laplace’a temperatury i gęstości strumienia ciepła na jednej powierzchni granicznej prze-

grody z transformatami Laplace'a tych wielkości na drugiej powierzchni granicznej. Równanie to jest postaci:

$$\begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ Q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Theta(d,s) \\ Q(d,s) \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

gdzie:

s – zmienna zespolona (operator przekształcenia Laplace'a),

$\Theta(0,s)$, $Q(0,s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody,

$\Theta(d,s)$, $Q(d,s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia,

$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ – macierz transmisji dla przegrody [170].

Macierz transmisji dla przegrody wielowarstwowej jest iloczynem macierzy transmisji dla poszczególnych warstw, to znaczy:

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} * \dots * \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

przy czym macierz transmisji dla warstwy k jest postaci:

$$\begin{bmatrix} A_k(s) & B_k(s) \\ C_k(s) & D_k(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_k) & Z_k \sinh(\gamma_k) \\ \sinh(\gamma_k)/Z_k & \cosh(\gamma_k) \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

gdzie:

$$\gamma_k = d_k \sqrt{\frac{c_{pk} \rho_k s}{\lambda_k}} \quad (6.26)$$

$$Z_k = \sqrt{\frac{1}{\lambda_k c_{pk} \rho_k s}} \quad (6.27)$$

Z uwagi na to, że wymianę ciepła na powierzchni granicznej układu przegroda–pomieszczenie określono za pomocą warunku brzegowego III rodzaju, równanie macierzowe (6.23) przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ Q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Theta_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

gdzie:

$\Theta_i(s)$ – transformata Laplace’a temperatury powietrza w pomieszczeniu,

$Q_i(s)$ – transformata Laplace’a gęstości strumienia ciepła od strony pomieszczenia,

$\begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – macierz transmisji dla warstwy powietrza o zerowej pojemności cieplnej i o oporze cieplnym R_i (opór przyjmowania ciepła).

Wykonanie analiz przedstawionych w niniejszej pracy wymaga znajomości rozkładu temperatury i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych przegrody. Nie zachodzi więc konieczność określania pola temperatury w całym obszarze zmienności współrzędnej x ($0 \leq x \leq d$). Takie podejście stosuje się również w analizie symulacyjnej procesów wymiany ciepła w budynkach przy określaniu bilansu cieplnego pomieszczeń [101].

Poniżej przedstawiono ogólny opis zastosowanej metody obliczeniowej impulsowej funkcji przejścia [170], pozwalającej wyznaczyć, w oparciu o równanie macierzowe (6.28), rozkład temperatury i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych przegrody dla przypadku nieustalonych warunków brzegowych.

6.2.2.2. Metoda obliczeniowa

Do rozwiązania problemu nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrody wielowarstwowe zastosowano metodę impulsowej funkcji przejścia, opracowaną przez Stephenson’a i Mitalasa [170], będącą udoskonaleniem metody „współczynników odpowiedzi” [104]. Opracowanie metody impulsowej funkcji przejścia było inspirowane między innymi pilną potrzebą zmodyfikowania metody współczynników odpowiedzi, która powodowała zajmowanie bardzo dużej części pamięci operacyjnej komputerów (miało to miejsce pod koniec lat sześćdziesiątych i na początku lat siedemdziesiątych) oraz potrzebą przyspieszenia wykonywania obliczeń. Metoda współczynników odpowiedzi wymagała stosowania komputerów o dużej, jak na początek lat siedemdziesiątych, pamięci operacyjnej; liczba współczynników odpowiedzi dla wielowarstwowej przegrody budowlanej, w zależności od ilości i układu warstw oraz właściwości cieplno-fizycznych poszczególnych warstw, wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu, a nawet do ponad stu. W praktyce oznaczało to, że dla każdej analizowanej przegrody należało pamiętać „historię” wartości poszczególnych składowych bilansu cieplnego (temperatura powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia, temperatura i gęstość strumienia ciepła na powierzchniach granicznych przegrody, prędkość wiatru, itd.) w ilości równej ilości współczynników odpowiedzi.

Zatem, przyjmując krok obliczeniowy równy na przykład 1 godzinę, dla każdej przegrody należało pamiętać godzinowe wartości wszystkich składowych bilansu cieplnego dla okresu najczęściej od dwóch do czterech dni, co wydłużało czas obliczeń i powodowało kłopoty natury technicznej.

W metodzie impulsowej funkcji przejścia, która jest równoważna metodzie współczynników odpowiedzi [170], występuje maksymalnie do 7 współczynników, co przy kroku obliczeniowym równym 1 godzina oznacza konieczność uwzględnienia poszczególnych składowych bilansu cieplnego maksymalnie do 6 godzin wstecz. Ciągi współczynników metody impulsowej funkcji przejścia są szybciej zbieżne do zera niż ciągi współczynników odpowiedzi.

Metoda impulsowej funkcji przejścia pozwala na dokonywanie obliczeń rozkładu temperatury i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych przegrody, z uwzględnieniem rzeczywistej zmienności elementów środowiska zewnętrznego, tj. zmienności według dowolnej funkcji czasu. Metoda stwarza także możliwość uwzględnienia zmienności współczynników przejmowania ciepła (na powierzchniach granicznych przegrody) w funkcji temperatury powierzchni, temperatury otaczającego powietrza, warunków wietrznych lub chropowatości powierzchni, pod warunkiem jednak, że znana jest formuła matematyczna opisująca tę zmienność.

Stephenson i Mitalas wykorzystują w swojej metodzie pewną odmianę przekształcenia Laplace'a, noszącą nazwę przekształcenia $\mathcal{Z}$, wygodną do stosowania w przypadku funkcji dyskretnych.

Niech $f(n\Delta)$ będzie funkcją dyskretną o wartościach różnych od zera występujących jedynie w chwilach impulsowania odległych od siebie o czas Δ . Transformatą $\mathcal{Z}$ dyskretniej funkcji $f(n\Delta)$ nazywa się następujące wyrażenie:

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(n\Delta)z^{-n} \quad (6.29)$$

w którym z jest zespolonym operatorem przekształcenia.

W literaturze [83], [147] dostępne są tablice, w których zestawiono funkcje dyskretne (oryginały) oraz ich transformaty $\mathcal{Z}$ (obrazy). Na podstawie tych tablic można w prosty sposób znaleźć transformaty $\mathcal{Z}$ mniej skomplikowanych funkcji dyskretnych lub odwrotnie, znając transformaty wyznaczyć oryginały.

Ciekawą własnością transformaty $\mathcal{Z}$ dowolnej funkcji dyskretniej jest to, że współczynniki wielomianu, którym się transformata wyraża (wyrażenie (6.29)), są wartościami danej funkcji dyskretniej w chwilach impulsowania. Własność ta pozwala na natychmiastowe znajdowanie transformaty $\mathcal{Z}$ funkcji o dowolnym przebiegu w czasie.

Podstawową wielkością wykorzystywaną w metodzie Stephensona i Mitalasa jest impulsowa funkcja przejścia („pulse transfer function”), zwana również transmitancją impulsową. Impulsowa funkcja przejścia jest definiowana jako stosunek transformaty

odpowiedzi układu do transformaty $\mathcal{S}$ wymuszenia układu. Układ stanowi tu wielowarstwowa przegroda budowlana, natomiast wymuszenie lub odpowiedź, w zależności od przyjętych warunków brzegowych, stanowi temperatura powierzchni zewnętrznej lub powierzchni przegrody od strony pomieszczenia, gęstość strumienia ciepła przy powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej przegrody. Jeżeli przez $O(z)$ oznaczmy transformatę $\mathcal{S}$ odpowiedzi układu a przez $I(z)$ transformatę $\mathcal{S}$ wymuszenia, to z definicji impulsowej funkcji przeniesienia wynika, że:

$$O(z) = K(z) * I(z) \quad (6.30)$$

gdzie $K(z)$ jest impulsową funkcją przeniesienia.

Transmitancję impulsową można zapisać w postaci ilorazu wielomianów:

$$K(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_j z^{-j}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_p z^{-p}} \quad (6.31)$$

Po uwzględnieniu wyrażeń (6.30) i (6.31) zachodzi:

$$O(z) * D(z) = I(z) * N(z) \quad (6.32)$$

Dokonując transformacji odwrotnej równania (6.32), otrzymujemy odpowiedź układu w chwili dyskretnej $\tau = m\Delta$ postaci:

$$O(m\Delta) = \frac{1}{b_0} \{ a_0 I(m\Delta) + a_1 I[(m-1)\Delta] + \dots + a_j I[(m-j)\Delta] + \\ - b_1 O[(m-1)\Delta] - b_2 O[(m-2)\Delta] - \dots - b_p O[(m-p)\Delta] \} \quad (6.33)$$

Znajomość impulsowej funkcji przejścia układu oraz transformaty $\mathcal{S}$ wymuszenia pozwala więc na wyznaczenie odpowiedzi układu. Transmitancja impulsowa zatem syntetycznie i jednoznacznie określa dynamiczne właściwości cieplne układu. Przegrodę budowlaną traktuje się jako układ dynamiczny o dwóch wejściach i dwóch wyjściach (temperatura i gęstość strumienia ciepła na obu powierzchniach granicznych przegrody), jej własności dynamiczne opisuje więc macierz impulsowych funkcji przejścia, a nie jedna funkcja, jak dla układu z jednym wejściem i jednym wyjściem.

Metoda Stephensona i Mitalasa polega na znalezieniu macierzy impulsowych funkcji przejścia dla przegrody budowlanej wielowarstwowej w oparciu o znaną dla przegrody macierz transmisji (wyrażenie (6.24)). Macierz impulsowych funkcji przejścia oraz warunki graniczne pozwalają wyznaczyć poszukiwane rozkłady temperatury lub gęstości strumieni ciepła na powierzchniach granicznych przegrody.

Z zależności (6.31) wynika, że aby jednoznacznie określić transmitancję impulsową układu wystarczy wyznaczyć współczynniki wielomianów licznika $a_0, a_1, a_2, \dots, a_l$ oraz mianownika $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$. Wartości tych współczynników oblicza się w oparciu o znaną dla przegrody macierz transmisji, która z kolei jest funkcją własności fizycznych materiałów poszczególnych warstw oraz układu tych warstw. Z uwagi na przyjęte warunki brzegowe (wyrażenie (6.22)) wyjściowe równanie macierzowe jest postaci:

$$\begin{bmatrix} Q(0,s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{B(s)} & -\frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & -\frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ \Theta_i(s) \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$\Theta(0,s), Q(0,s)$ – transformaty Laplace’a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody,

$\Theta_i(s)$ – transformata Laplace’a temperatury powietrza w pomieszczeniu,

$Q_i(s)$ – transformata Laplace’a gęstości strumienia ciepła na powierzchni od strony pomieszczenia.

Występująca w równaniu (6.34) macierz kwadratowa jest wyjściową macierzą transmisji do wyznaczania współczynników wielomianów impulsowych funkcji przejścia dla przegrody. Wyznaczone wartości współczynników umożliwiają rekurencyjne obliczanie kolejnych wartości dyskretnych na wyjściu przegrody na podstawie znajomości poprzednich wartości dyskretnych na wyjściu przegrody oraz dyskretnych wartości na wejściu przegrody. Podstawową zaletą metody jest to, że macierz impulsowych funkcji przejścia dla przegrody budowlanej wyznacza się tylko raz, a odpowiedź przegrody oblicza się już z prostych zależności uwarunkowanych jedynie postacią wymuszenia. Gęstości strumieni ciepłych na powierzchniach granicznych przegrody dla przyjętego modelu wymiany ciepła (rys. 6.5) oblicza się ze wzorów:

$$q_o(\tau) = \sum_{k=0}^j a_k T_s(\tau - k) - \sum_{k=0}^j c_k T_i(\tau - k) - \sum_{l=1}^p b_l q_o(\tau - l) \quad (6.35)$$

$$q_i(\tau) = \sum_{k=0}^j c_k T_s(\tau - k) - \sum_{k=0}^j d_k T_i(\tau - k) - \sum_{l=1}^p b_l q_i(\tau - l) \quad (6.36)$$

w których:

$q_o(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody w chwili τ ,

$q_i(\tau)$ – gęstość strumienia ciepła na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia w chwili τ ,

- $T_s(\tau - k)$ – temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej w chwili $(\tau - k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, j$,
 $T_i(\tau - k)$ – temperatura powietrza w pomieszczeniu w chwili $(\tau - k)$, $k = 0, 1, 2, \dots, j$,
 a_k, c_k, d_k, b_l – współczynniki odpowiednich funkcji przejścia ($k = 0, 1, 2, \dots, j$; $l = 1, 2, \dots, p$)

Sposób obliczania wartości współczynników impulsowej funkcji przejścia, będącej odpowiednikiem operatorowej funkcji przejścia $A(s)/B(s)$ (jeden z elementów macierzy transmisji z równania (6.34)) przedstawiono w pracy [170].

Bilans cieplny przegród budowlanych, poddanych oddziaływaniu zmiennych w czasie elementów środowiska zewnętrznego, oblicza się według równania bilansowego (6.14) oraz równań (6.35) i (6.36) na podstawie między innymi wyliczonych dla danej przegrody współczynników impulsowej funkcji przejścia. Ocenę zaproponowanego modelu bilansu cieplnego przegrody budowlanej przedstawiono w rozdziale 6.2.5.

Metoda Stephensona i Mitalasa pozwala także na obliczanie temperatury oraz gęstości strumienia ciepła w dowolnym przekroju przegrody, równoległym do jej powierzchni granicznych. Przyjmuje się wtedy, że płaszczyzna przekroju dzieli umownie przegrodę na dwie warstwy o różnych macierzach transmisji. Wypadkowa macierz transmisji dla przegrody jest więc postaci:

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_o(s) & B_o(s) \\ C_o(s) & D_o(s) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

Punktem wyjścia przy wyznaczaniu temperatury i gęstości strumienia ciepła w płaszczyźnie przekroju jest następujące równanie macierzowe:

$$\begin{bmatrix} \Theta^x(s) \\ Q^x(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_i(s)}{B(s)} & \frac{B_o(s)}{B(s)} \\ \frac{D_i(s)}{B(s)} & \frac{A_o(s)}{B(s)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Theta(0, s) \\ \Theta_i(s) \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

w którym:

$\Theta^x(s)$, $Q^x(s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio temperatury i gęstości strumienia ciepła w płaszczyźnie przekroju przegrody,

$\Theta(0, s)$, $\Theta_i(s)$ – transformaty Laplace'a, odpowiednio temperatury na zewnętrznej powierzchni przegrody i temperatury powietrza w pomieszczeniu.

W analizie obliczeniowej niustalonej wymiany ciepła przez przegrody budowlane istotne znaczenie mają nie tyle przebiegi gęstości strumienia ciepła wewnątrz przegrody, ile przebiegi gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na jej powierzchni od strony pomieszczenia, bezpośrednio wpływające na bilans cieplny pomieszczenia.

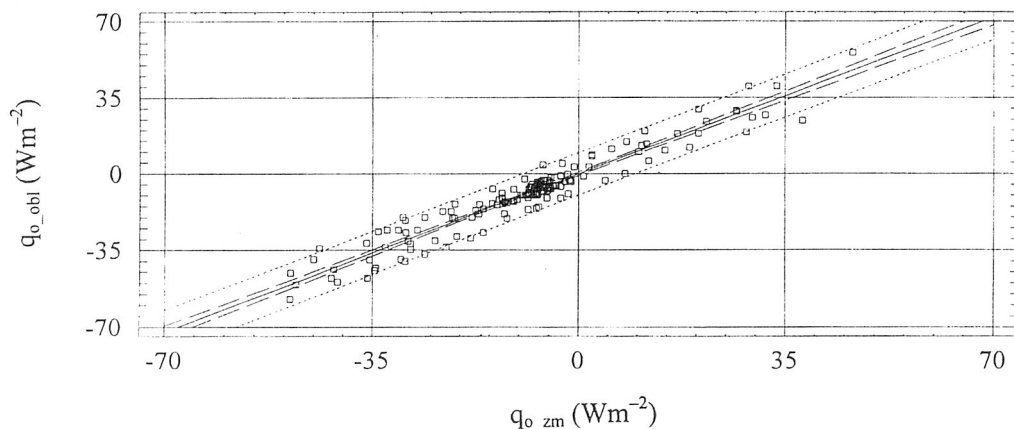
Metoda impulsowej funkcji przejścia pozwala na dokonywanie obliczeń nieustalonego przenikania ciepła przez przegrody budowlane wielowarstwowe z uwzględnieniem rzeczywistej zmienności elementów środowiska zewnętrznego, dla różnie sformułowanych nieustalonych warunków brzegowych. Przebiegi czasowe gęstości strumieni ciepłych i temperatury wyznacza się dla powierzchni granicznych przegrody lub w dowolnym przekroju wewnątrz przegrody. Praktyczną zaletą stosowania tej metody jest to, że wymuszenie (np. przebieg temperatury powietrza na zewnątrz lub natężenie promieniowania długofalowego atmosfery) podaje się w postaci wartości w chwilach dyskretnych, na przykład co 1 godzinę. Wymuszenie zatem może być dowolną funkcją czasu o dowolnie skomplikowanych kształtach. Dokładność obliczonych współczynników impulsowej funkcji przejścia zależy od przyjętego przedziału dyskretyzacji. Autorzy metody, po przetestowaniu metody dla różnych przegród budowlanych i różnych wymuszeń podają, że przyjęcie kroku czasowego $\Delta=1$ godzina zapewnia zadawalającą dokładność [170]. Zasadniczą zaletą metody obliczeniowej jest to, że dla danej przegrody budowlanej wystarczy wyznaczyć współczynniki impulsowej funkcji przejścia tylko raz. Wartości tych współczynników są charakterystyczne dla danej przegrody budowlanej i w sposób jednoznaczny opisują jej dynamiczne właściwości cieplne, niezależnie od postaci wymuszenia. Do ilościowego określenia efektów nieustalanej wymiany ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną, dla której znane są współczynniki impulsowej funkcji przejścia, wystarczy więc znajomość termicznego oddziaływania środowiska zewnętrznego oraz oddziaływania środowiska termicznego panującego w pomieszczeniu. Celowym wydaje się być opracowanie katalogu wartości współczynników impulsowej funkcji przejścia dla typowych przegród budowlanych stosowanych w naszym kraju, podobnie jak to przedstawiono w opracowaniu ASHRAE Handbook Fundamentals (1989) [3] dla przegród stosowanych w USA, co znacznie ułatwiłoby korzystanie z przedstawionej metody obliczeniowej do analizy wybranych zagadnień z zakresu fizyki budownictwa bądź przez specjalistów z zakresu ogrzewnictwa i klimatyzacji w Polsce.

6.2.3. Ocena modelu bilansu cieplnego przegrody

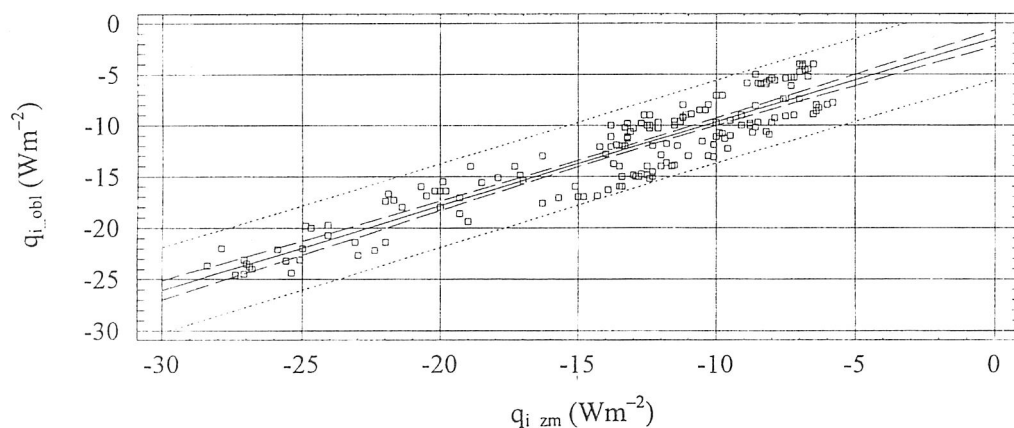
Zaproponowany model bilansu cieplnego przegrody budowlanej (równania (6.14) oraz (6.35) i (6.36)), bazujący w części związanej z przewodzeniem ciepła na metodzie impulsowej funkcji przejścia oraz uwzględniający radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, został zweryfikowany stosownymi pomiarami na obiekcie rzeczywistym, zgodnie z opisem w rozdziale 4.2. Poprawność przyjętego modelu i zastosowanej metody obliczeniowej sprawdzono poprzez porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń numerycznych oraz określenie niezbędnych charakterystyk statystycznych. Obliczenia numeryczne zrealizowano specjalnie w tym celu napisanym

programem komputerowym. Wyniki analizy porównawczej przedstawiono na rys. 6.5 i 6.6 oraz w tabeli 6.1.

a)



b)



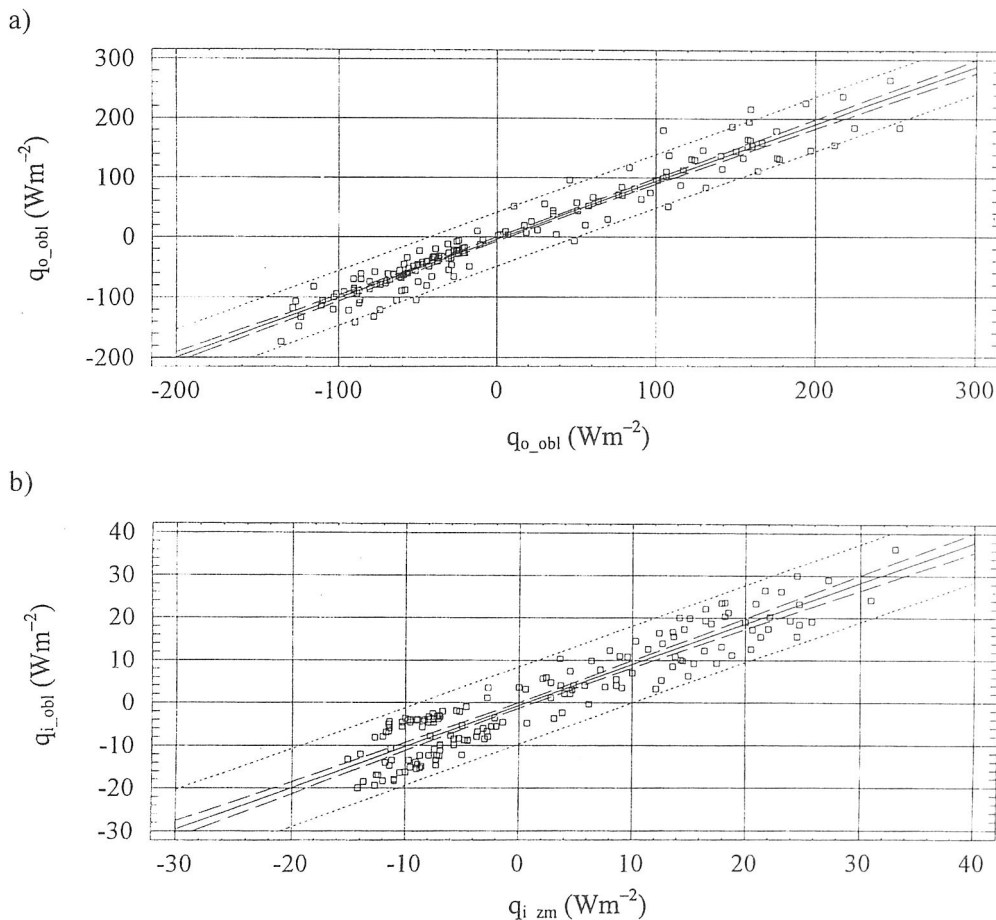
Rys. 6.5. Porównanie obliczonych i zmierzonych wartości gęstości strumienia ciepła przewodzonego przy granicznych powierzchniach stropodachu pomiarowego, na podstawie badań przeprowadzonych w okresie zimowym: a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia od strony pomieszczenia

Fig. 6.5. Comparison of the calculated and measured values of the heat flux densities at the boundary surfaces of a flat roof based on the measurements made at the winter time

Dobra zgodność przebiegów gęstości strumienia ciepła, na granicznych powierzchniach stropodachu pomiarowego, otrzymanych na podstawie obliczeń i użytych z pomiarów (tabela 6.1), pozwala jednoznacznie stwierdzić, że przyjęty model bilansu cieplnego przegrody oraz zastosowana metoda obliczeniowa impulsowej

funkcji przejścia (w części związanej z przewodzeniem ciepła) stanowią wystarczająco dokładny opis jakościowy i ilościowy niustalonych procesów cieplnych zachodzących w układzie: środowisko zewnętrzne–przegroda budowlana–pomieszczenie.

Uzyskanie dobrej zbieżności wielkości zmierzonych i obliczonych jest, między innymi, wynikiem niewątpliwych zalet zastosowanej metody obliczeniowej Stephenson i Mitalasa, opisanych w rozdz. 6.2.2.2 oraz wystarczająco dokładnego opisu oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek, według sformułowanego w rozdziale 4.5 modelu obliczeniowego.

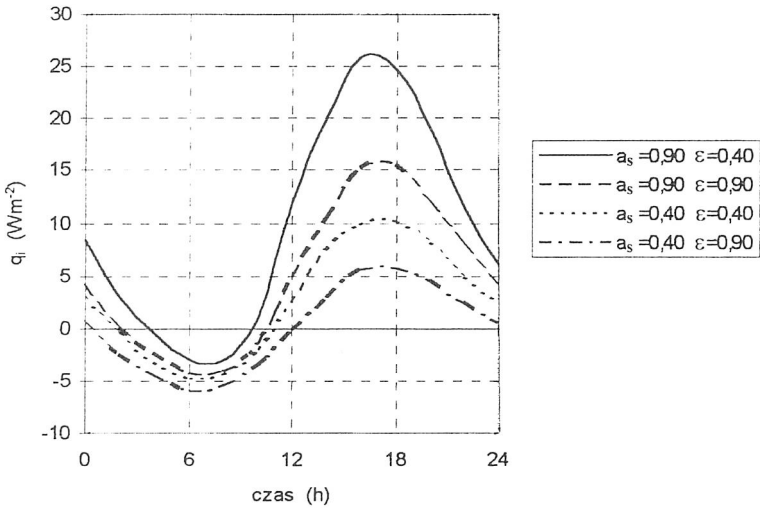


Rys. 6.6. Porównanie obliczonych i zmierzonych wartości gęstości strumienia ciepła przewodzonego na granicznych powierzchniach stropodachu pomiarowego, na podstawie badań przeprowadzonych w okresie letnim: a) powierzchnia zewnętrzna, b) powierzchnia od strony pomieszczenia

Fig. 6.6. Comparison of the calculated and measured values of the heat flux densities at the boundary surfaces of a flat roof based on the measurements made at the summer time

Tabela 6.1. Wyniki analizy statystycznej regresji liniowej (równanie ogólne: $q_{zm} = a + bq_{obl}$) dla strumieni ciepłych przewodzonych przy powierzchniach granicznych badanego stropodachu
Table 6.1. Results of the statistical analysis (general equation $q_{zm} = a + bq_{obl}$) for heat fluxes conducted at the boundary surfaces of a flat roof under investigation

Nr równania	Współcz. a (W m ⁻²)	Współcz. b	Współcz. korelacji	Odchylenie standardowe R_{zm}	Odchylenie standardowe współcz. a	R^2 (%)
okres zimowy						
q_i	-1,47	0,82	0,921	2,05	0,39	84,81
q_o	-0,23	1,03	0,962	4,91	0,43	92,54
okres lata						
q_i	-0,64	0,96	0,932	4,58	0,35	86,80
q_o	-3,87	0,98	0,970	22,81	1,76	94,19



Rys. 6.7. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych zmienności w czasie gęstości strumieni ciepłych na powierzchni stropodachu od strony pomieszczenia w lecie, dla różnych właściwości spektralnie selektywnych powierzchni zewnętrznej. Obliczenia przeprowadzono na bazie równań (6.14), (6.35) i (6.36)
Fig. 6.7. Exemplary results of numerical calculations of the heat flux densities at the surface of a flat roof at the side of the compartment in summer for various spectral-selective outer surfaces. The calculations were done basing on Eqs. (6.14), (6.35) and (6.36)

Na rysunku 6.7 przedstawiono przykładowe możliwości obliczeniowe zaproponowanego modelu bilansu cieplnego przegrody budowlanej. Pokazano wyniki obliczeń numerycznych wartości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na powierzchni stropodachu od strony pomieszczenia dla różnych własności spektralnie selektywnych jego powierzchni zewnętrznej (dla różnych wartości współczynnika selektywności, wyrażenie (3.7)),

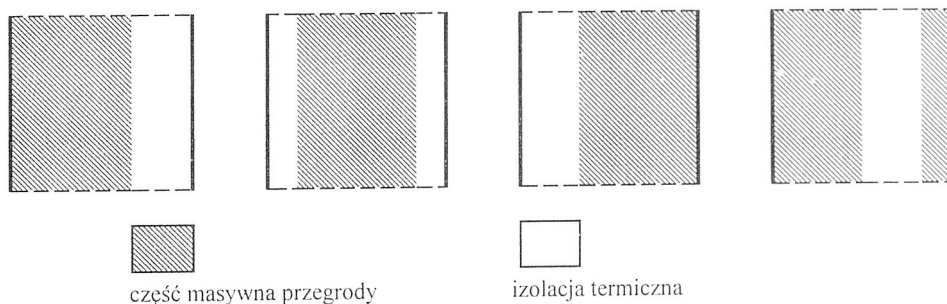
dla okresu zimy i lata. Zaproponowany model obliczeniowy bilansu cieplnego mógłby być zatem wykorzystany do wielokryterialnej optymalizacji doboru spektralnie selektywnych radiacyjnych właściwości zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych pod kątem kształtowania optymalnego bilansu cieplnego przegród i pomieszczeń w skali roku [111, 112], z uwzględnieniem wymagań w zakresie zapewnienia warunków komfortu cieplnego [174–177]. Do rozwiązania powyższego zagadnienia może również być wykorzystany zaproponowany w tej pracy model oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek – wartość natężenia tego promieniowania jest uwzględniana w równaniu bilansowym (6.14).

Inną możliwością zastosowania zaproponowanego modelu obliczeniowego bilansu cieplnego przegrody budowlanej jest analiza jej dynamicznych własności cieplnych, które, jak zasygnalizowano w rozdziale 6.2.2, zasadniczo wpływają na akumulację i stateczność cieplną przegrody oraz budynku. Stateczność cieplna budynku, która zależy głównie od stateczności cieplnej przegród ograniczających jego kubaturę ogrzewaną, jest rozumiana jako zdolność do utrzymywania stałej bądź zmieniającej się w dopuszczalnych granicach temperatury powietrza wewnątrz, przy naturalnych wahaniach temperatury powietrza zewnętrznego. Dobra stateczność cieplna budynku jest wskazana zwłaszcza w okresie letnim, gdyż znacznie poprawia warunki komfortu cieplnego przebywających tam ludzi oraz ogranicza bądź eliminuje konieczność stosowania urządzeń klimatyzacyjnych. Zagadnienia te nabierają obecnie w Polsce szczególnego znaczenia w związku z wprowadzeniem nowych technologii wykonawstwa przegród budowlanych, a zwłaszcza ścian, z tendencją do wykonywania coraz to lżejszych przegród.

stropodachy



ściany



Rys. 6.8. Przykładowe struktury przegród zewnętrznych
Fig. 6.8. Exemplary cross-section of building envelopes

Na rysunku 6.8 pokazano przykłady przegród budowlanych reprezentujących różne typy rozkładów oporów cieplnych i pojemności cieplnej.

Zaproponowany model bilansu cieplnego przegród budowlanych umożliwia przeprowadzenie analizy zakresu zmienności dynamicznych własności przegród o strukturze pokazanej na rysunku 6.8 lub podobnej, z możliwością jednoczesnej analizy wpływu własności spektralnie selektywnych powierzchni zewnętrznej na bilans cieplny. Jako dynamiczne własności cieplne przegród należy w tym wypadku rozumieć zdolność do tłumienia przepływającego przez nią ciepła (wskaźnik tłumienia) oraz tzw. przesunięcie fazowe.

7. PODSUMOWANIE

7.1. Uwagi końcowe i wnioski

Racjonalne użytkowanie energii cieplnej w budynkach wymaga między innymi konstruowania odpowiednich modeli obliczeniowych bilansujących zużycie tej energii w skali roku. Modele te powinny uwzględniać odpowiednio przetworzone lokalne dane meteorologiczne, w tym również dane w zakresie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego. Zasadniczą trudnością jest jednak fakt, że zarówno w Polsce jak i w innych krajach promieniowanie ciepłe atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych. Z tego powodu najczęściej udział promieniowania długofalowego w bilansie cieplnym budynków jest pomijany bądź uwzględniany w sposób nie odzwierciedlający rzeczywistego oddziaływania tego promieniowania. Niejednokrotnie promieniowanie ciepłe atmosfery dla konkretnej lokalizacji oblicza się z formuł empirycznych opracowanych dla innych regionów. Decyzja o tym, który z istniejących empirycznych modeli obliczeniowych umożliwia uzyskanie najlepszej zgodności zmierzonych i obliczonych wartości tego promieniowania dla rozważanej lokalizacji powinna być dogłębnie uzasadniona stosownymi pomiarami dla danego regionu. W razie braku takiej zgodności należy na podstawie pomiarów sformułować model obliczeniowy dla danej lokalizacji. Stosowanie bowiem uproszczeń, polegających na pominięciu lub błędnym oszacowaniu udziału promieniowania długofalowego w bilansie cieplnym budynków, powoduje w konsekwencji niedoszacowanie zapotrzebowania na ciepło w sezonie grzewczym.

Przedstawiony w niniejszej pracy model oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek umożliwia obliczanie natężenia tego promieniowania dla różnych warunków pogodowych, dla dowolnie pochyłonych przegród w funkcji standardowo mierzonych wielkości meteorologicznych.

Z uwagi na charakter kątowej i spektralnej zmienności promieniowania długofalowego atmosfery, udział tego promieniowania w bilansie cieplnym przegród poziomych (stropodachy), pochyłonych (połacie dachowe) i pionowych (ściany) jest różny. Stropodachy są najbardziej narażone na niekorzystny wpływ z punktu widzenia strat ciepła, radiacyjnego oddziaływania atmosfery. W czasie bezchmurnych nocy powierzchnie poziome (stropodachy, grunt) narażone są na występowanie zjawiska chłodzenia radiacyjnego, tj. obniżania się ich temperatury poniżej temperatury otaczającego powietrza. W pracy podano metody kształtowania bilansu promieniowania długofalowego danego radiatora, którym jest również przegroda budowlana oraz sposób obliczania charakterystyk chłodzenia radiacyjnego, tj. mocy chłodzenia radiacyjnego i wskaźnika temperatury radiatora.

Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej, a w konsekwencji jej bilans cieplny, może być kształtowany przez zastosowanie powierzchni o odpowiednich własnościach spektralnie selektywnych w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego. W pracy zaproponowano model bilansu cieplnego przegrody w warunkach nieustalanej wymiany ciepła, na bazie metody impulsowej funkcji przejścia, z uwzględnieniem oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania cieplnego oraz własności spektralnie selektywnych dla zewnętrznej powierzchni przegrody. Podano również sposób uwzględnienia oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego w bilansie cieplnym przegród budowlanych dla ustalonych warunków przepływu ciepła.

Zamieszczone w pracy wyniki badań i analiz umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Przedstawiony model obliczeniowy oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek jest miarodajny i wystarczająco dokładny do obliczania natężenia promieniowania cieplnego atmosfery i najbliższego otoczenia budynku. Model ten pozwala przede wszystkim na uściślenie opisu radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania cieplnego, a tym samym umożliwia kompleksową analizę wymiany ciepła dowolnego poziomego lub pochylonego do 90° radiatora, którym jest również przegroda budowlana, w różnych porach roku oraz przy dowolnym stopniu zachmurzenia nieba, w funkcji temperatury otaczającego powietrza lub alternatywnie w funkcji temperatury punktu rosy.

2. Model obliczeniowy cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego umożliwia rozwiązanie wielu problemów technicznych, związanych głównie z wymianą ciepła przegród budowlanych, pełnych oraz przezroczystych i pozwala na:

- a) kompleksową analizę i ocenę wpływu promieniowania długofalowego na bilans cieplny dowolnie pochylonych przegród budowlanych w warunkach ustalonego i nieustalonego przenikania ciepła,

- b) analizę wpływu różnie skonfigurowanych właściwości radiacyjnych powierzchni spektralnie selektywnych na bilans promieniowania i bilans cieplny przegród budowlanych i budynków,

- c) określenie bilansu cieplnego dowolnego radiatora oraz wyznaczenie jego niezbędnych charakterystyk efektywności chłodzenia radiacyjnego, tj. mocy chłodzenia radiacyjnego (różnicowych strat ciepła przez promieniowanie długofalowe) oraz wskaźnika temperatury radiatora,

- d) uzupełnienie archiwalnej bazy danych meteorologicznych – ponieważ promieniowanie długofalowe atmosfery nie jest standardowo mierzone na stacjach meteorologicznych, sformułowany model obliczeniowy pozwala na uzupełnienie archiwalnej bazy danych meteorologicznych dla Wrocławia i okolic o wartości natężenia tego promieniowania. Uzupełniona baza danych meteorologicznych mogłaby być wykorzystana do analizy trendu zmian promieniowania cieplnego atmosfery oraz mogłaby być przedmiotem zainteresowania specjalistów z innych dziedzin, np. agrotechników,

e) przeprowadzenie analizy obliczeniowej bilansu cieplnego budynków o dużym stopniu przeszklenia, w tym szklarni, oraz obliczanie bilansu cieplnego pojedynczych okien, z różnymi zestawami szyb zespolonych wypełnionych różnymi gazami,

f) wyeliminowanie przynajmniej części badań poligonowych z zakresu oceny efektywności energetycznej urządzeń bądź materiałów stosowanych w budownictwie, pod kątem poprawy charakterystyki cieplnej budynków,

g) określenie warunków brzegowych przy rozwiązywaniu i analizie rozkładu temperatury oraz naprężeń termicznych w budowlach inżynierskich (np. zapory wodne, mosty, wiadukty).

3. Zaproponowany w niniejszej pracy model bilansu cieplnego przegród budowlanych dla warunków nieustalonego przenikania ciepła, bazujący w części związanej z przewodzeniem ciepła na metodzie impulsowej funkcji przejścia, wystarczająco dokładnie opisuje rzeczywiste procesy cieplne zachodzące między środowiskiem zewnętrznym, przegrodą budowlaną i środowiskiem w pomieszczeniu, które ta przegroda oddziela. Model ten, uwzględniający radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego, może być zastosowany do analizy i doboru spektralnie selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni przegród budowlanych w kontekście kształtowania optymalnego bilansu cieplnego budynku w skali roku. Może być również zastosowany do analizy dynamicznych własności przegród budowlanych o różnej strukturze, tj. o różnym typie rozkładów oporów cieplnych i pojemności cieplnej.

4. W dotychczas wykonywanych obliczeniach cieplnych dla przegród budowlanych, wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględnia się w sposób, który nie odzwierciedla rzeczywistych zmian elementów tego środowiska i ich oddziaływania na przegrody budowlane. Aby ograniczyć błąd w określaniu wielkości strat ciepła przez przegrody, zaleca się w obliczeniach metodą tradycyjną, tj. dla stanu ustalonego przepływu, uwzględniać rzeczywisty wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego poprzez wprowadzenie do obliczeń poprawki temperaturowej Δt , obniżającej wartość obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego. Wartość tej poprawki zależy od kąta pochylenia przegrody, oporu cieplnego, własności emisyjnych jej powierzchni zewnętrznej oraz od temperatury powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia, temperatury promieniowania nieboskłonu, prędkości wiatru oraz od stopnia zachmurzenia nieba. Ze względu na występujący kątowny i spektralny charakter zmian długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, oddziałującego na przegrody budowlane, wartości poprawek Δt powinny być zróżnicowane dla stropodachów, dla ścian i przegród pochyłonych (np. połacie dachowe). Dla stropodachów pełnych, zlokalizowanych we Wrocławiu i w najbliższej okolicy, o pochyleniu poniżej 10° oraz współczynnika emisyjności powierzchni zewnętrznej równym 0,9, wartość tej poprawki dla całego sezonu grzewczego wynosi $\Delta t = -4^\circ\text{C}$, dla ścian $\Delta t = 0^\circ\text{C}$ (dla pośrednich kątów pochylenia można przyjąć wartości pośrednie). W przypadku analizy bilansu cieplnego przegród dla okresów

krótszych niż sezon grzewczy, zaleca się stosować wartości poprawek temperaturowych przedstawionych na rys. 6.2. Konsekwencją wprowadzenia do obliczeń cieplnych poprawki temperaturowej Δt jest zwiększenie wartości gęstości strumienia ciepła przepływającego (traconego) przez stropodachy w stosunku do wartości otrzymanej z obliczeń metodą tradycyjną. Dla stropodachów pełnych różnice te, w stosunku do wyników metody tradycyjnej, mogą wynosić średnio około 16–18%, przy temperaturze powietrza wynoszącej 0 °C i około 13–15% przy temperaturze –10 °C, przy prędkości wiatru do 2 m/s.

7.2. Kierunki dalszych badań

Uzyskane i przedstawione w pracy wyniki analiz nie wyczerpują wszystkich omówionych lub z konieczności tylko zasygnalizowanych problemów. W nawiązaniu do sformułowanych wniosków końcowych postulowane przez autora kierunki dalszych badań są następujące:

1. Uściślenie opisu ilościowego wpływu rodzaju zachmurzenia na wartość docierającego promieniowania długofalowego atmosfery dla obszaru Polski.

2. Eksperymentalne opracowanie metody wyznaczania tzw. „temperatury otoczenia” dla budynków zlokalizowanych w miejscach o różnej gęstości zabudowy, pod kątem bilansowania ciepłego budynków w skali roku.

3. Wielokryterialna optymalizacja doboru spektralnie selektywnych radiacyjnych własności zewnętrznych powierzchni przegród budowlanych pełnych i przezroczystych, pod kątem maksymalnej efektywności energetycznej i minimalizacji kosztów eksploatacji, w kontekście kształtowania całorocznego bilansu ciepłego budynków, z uwzględnieniem wymagań dotyczących utrzymania warunków komfortu ciepłego w pomieszczeniach.

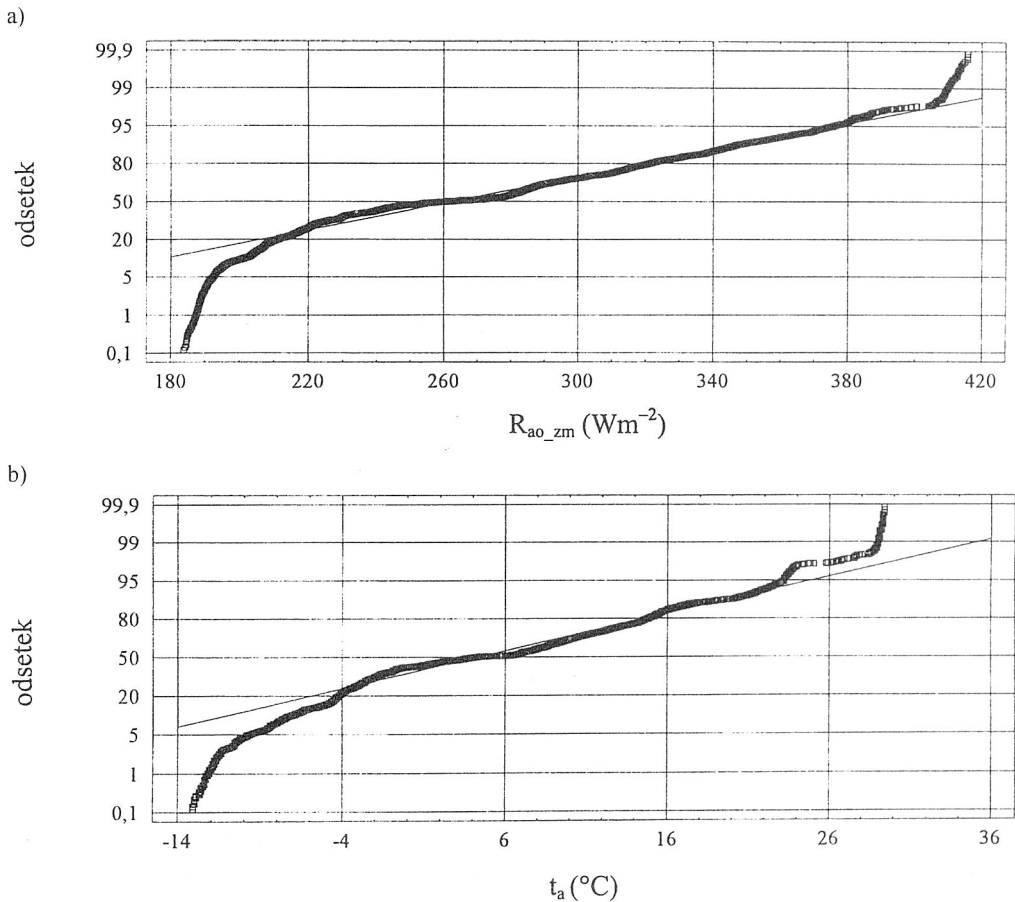
4. Kompleksowa analiza i ocena możliwości wykorzystania zjawiska chłodzenia radiacyjnego w Polsce do chłodzenia pomieszczeń w budynkach mieszkalnych oraz użyteczności publicznej w okresie lata, z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych i ekologicznych.

5. Analiza wpływu ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na dyfuzję i kondensację pary wodnej w przegrodach budowlanych. W ramach realizacji postulowanego tematu badawczego szczególną uwagę, zdaniem autora, powinny zwrócić kwestie opracowania modelu dyfuzji pary wodnej w przegrodzie w polu promieniowania ciepłego oraz analiza wpływu zjawiska chłodzenia radiacyjnego na proces kondensacji pary wodnej w przegrodzie, na naturalne wysychanie przegrody oraz wpływu na trwałość materiałów przegrody.

DODATEK

Wyniki analizy statystycznej dopasowania postaci rozkładu wielkości pomiarowych i porównania alternatywnych modeli

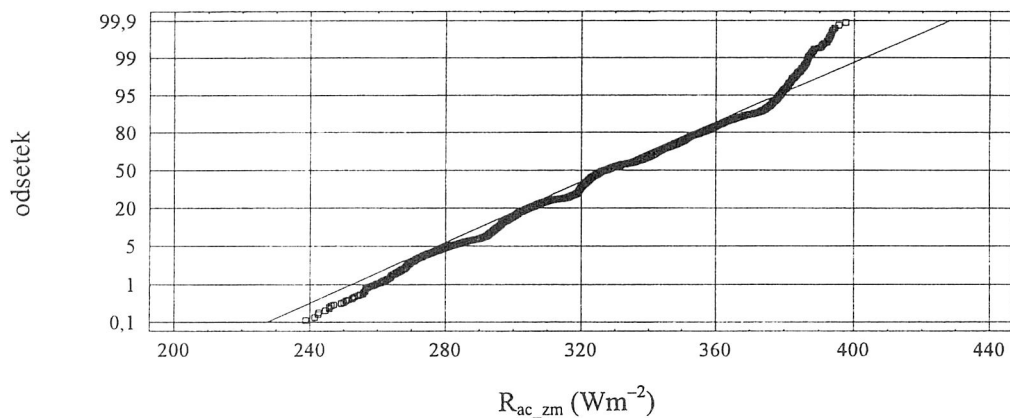
Na rysunkach D.1 oraz D.2 przedstawiono wyniki procedury statystycznej dopasowania postaci rozkładu natężenia promieniowania cieplnego atmosfery i temperatury otaczającego powietrza do rozkładu normalnego dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba.



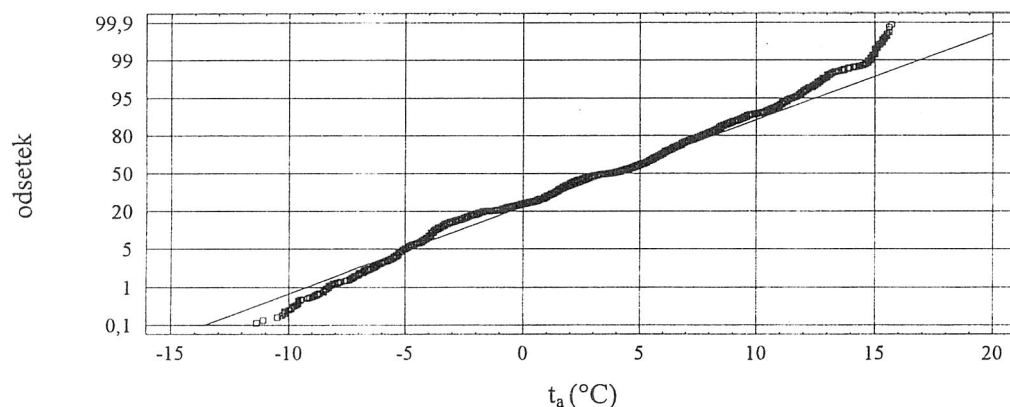
Rys. D.1. Wykresy prawdopodobieństwa rozkładu normalnego w warunkach bezchmurnego nieba dla: a) natężenia promieniowania cieplnego atmosfery (R_{ao_zm}), b) temperatury otaczającego powietrza (t_a)

Fig. D.1. Normal probability plots for clear sky: a) for the intensity of thermal atmospheric radiation (R_{ao_zm}), b) for ambient air temperature (t_a)

a)



b)



Rys. D.2. Wykresy prawdopodobieństwa rozkładu normalnego w warunkach całkowicie zachmurzonego nieba dla: a) natężenia promieniowania cieplnego atmosfery (R_{ac_zm}), b) temperatury otaczającego powietrza (t_a)

Fig. D.2. Normal probability plots for overcast sky: a) for the intensity of thermal atmospheric radiation (R_{ac_zm}), b) for ambient air temperature (t_a)

W rozdziale 4.4. przedstawiono funkcje liniowe, wygenerowane na podstawie pomiarów, na obliczanie natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą w funkcji temperatury powietrza. Poniżej zestawiono wyniki analizy statystycznej regresji prostej porównania alternatywnych modeli obliczeniowych dla danych pomiarowych: natężenia promieniowania cieplnego atmosfery na płaszczyznę poziomą (R_{ao_zm} lub R_{ac_zm}) w funkcji temperatury otaczającego powietrza (t_a), dla warunków bezchmurnego i całkowicie zachmurzonego nieba.

Porównanie alternatywnych modeli regresji prostej dla warunków bezchmurnego nieba (zależność między R_{ao_zm} i t_a):

Model	Wsp. korelacji	R-kwadrat
Pierw. kwadr.-Y	0,9816	96,35%
Wykładniczy	0,9807	96,18%
Liniowy	0,9799	96,03%
Odwrotnościowy-Y	-0,9723	94,53%
Odwrotnościowy-X	<brak dopasowania>	
Podwójnie odwrotn.	<brak dopasowania>	
Logarytmiczny-X	<brak dopasowania>	
Iloczynowy	<brak dopasowania>	
Pierw. kwadr.-X	<brak dopasowania>	
Krzywa typu S	<brak dopasowania>	
Logistyczny	<brak dopasowania>	
Log-probit	<brak dopasowania>	

Porównanie alternatywnych modeli regresji prostej dla warunków całkowitego zachmurzenia (zależność między R_{ac_zm} i t_a):

Model	Wsp. korelacji	R-kwadrat
Liniowy	0,9408	88,50%
Pierw. kwadr.-Y	0,9407	88,49%
Wykładniczy	0,9397	88,29%
Odwrotnościowy-Y	-0,9343	87,30%
Odwrotnościowy-X	<brak dopasowania>	
Podwójnie odwrotn.	<brak dopasowania>	
Logarytmiczny-X	<brak dopasowania>	
Iloczynowy	<brak dopasowania>	
Pierw. kwadr.-X	<brak dopasowania>	
Krzywa typu S	<brak dopasowania>	
Logistyczny	<brak dopasowania>	
Log-probit	<brak dopasowania>	

LITERATURA

- [1] ADAMSKI M., MARKS W., *Multicriteria optimization of shapes and structures of external walls of energy conservation buildings*. Archives of Civil Engineering, 39,1, 1993, s. 77–91.
- [2] ADDEO A., MONZA R., PERALDO M., BARTOLI B., COLUZZI B., SILVESTRINI V., TROISE G., *Selective covers for natural cooling devices*. Nuovo Cimento, Vol. 1C, 1978, pp. 419–429.
- [3] ASHRAE Handbook, *Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, 1989.
- [4] ALADOS-ARBOLEDAS L., JIMÉNEZ J.I., CASTRO-DÍEZ Y., *Thermal radiation from skies in Granada*. Theor Appl. Climatol. Vol. 37, 1986, pp. 84–85.
- [5] ALADOS-ARBOLEDAS L., OLMO F.J., VIDA J., JIMÉNEZ J.I., *Analysis of the performance of a model for estimating thermal atmospheric radiation under cloudy conditions*. The National Solar Energy Conference, Solar 90, March 19–22, Austin, Texas, 1990, pp.473–477.
- [6] ANGSTRÖM A., *A study on radiation of the atmosphere*. Smithsonian Misc.Coll., Vol. 65, 1915, pp.57–69.
- [7] AOKI T., *Development of a line-by-line model for the infrared radiative transfer in the earth's atmosphere*. Pap. Meteorol.Geophys., vol. 39, 1988, pp. 53–88.
- [8] ASSEM E., CLARKE J., HAND JH., HENSEN J., PERNOT C., STRACHAN P., ESP-r, *A building energy simulation environment*. User Guide, Version 8, ESRU Manual U93/2, Glasgow, 1993
- [9] BAC S., ROJEK M., *Meteorologia i klimatologia*. PWN, Warszawa 1981.
- [10] BERDAHL P., MARTIN M., *Spectral Radiance of the Clear Midlatitude-Summer Atmosphere*. Volume of Extended Abstracts for the 1980 Int. Radiat. Symp., Fort Collins, Colorado, p. 167.
- [11] BERDAHL P., FROMBERG R., *The thermal radiance of clear skies*. Solar Energy, Vol. 29, 1982, pp. 299–314.
- [12] BERDAHL P., MARTIN M., SAKKAL F., *Thermal performance of radiative cooling panels*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 6, 1983, pp. 871–880.
- [13] BERDAHL P., MARTIN M., *Emissivity of clear skies*. Solar Energy, Vol. 32, 1984, pp. 663–664.
- [14] BERDAHL P., *Radiative cooling with MgO and/or LiF layers*. Applied Optics, Vol. 23, 1984, pp. 370–372.
- [15] BERDAHL P., BRETZ S.E., *Preliminary survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials*. Energy and Buildings, Vol. 25, 1997, pp. 149–158.
- [16] BERGER X., BURIOT D., GARNIER F., *About the equivalent radiative temperature for clear skies*. Solar Energy, Vol. 32, No. 6, 1984, pp. 725–733.
- [17] BERGER X., AWANOU C.N., BATHIEBO J., *Expressions for computing the radiative cooling flux from the sky in different climates*. International Journal of Ambient Energy, Vol. 9, No. 3, 1988, pp. 155–164.
- [18] BERNING P.H., *Principles of design of architectural coatings*. Applied Optics, Vol. 22, 1983, pp. 4127–4141.

- [19] BESS T.D., CARLSON A.B., DENN F.M., *Earth radiation budget experiment (ERBE) data sets for global environment and climate change studies*. Ninth Conference on Atmospheric Radiation, Long Beach, California, February 2–7, 1997, pp.4.
- [20] BLISS R.A., *Atmospheric radiation near the surface of the ground: a summary for engineers*. Solar Energy, Vol. 5. 1961, pp. 103–120.
- [21] BOBROWSKI D., *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. WNT, Warszawa 1980.
- [22] BRETZ S.E., AKBARI H., *Long-term performance of high-albedo roof coatings*. Energy and Buildings, Vol. 25, 1997, pp. 159–167.
- [23] BRUNT D., *Notes on radiation in the atmosphere*. Quart. Jour. R. Meteor. Soc., Vol. 58, 1932, p.309–420.
- [24] BURCH D.M., *Infrared audits of roof heat loss*. ASHRAE Transactions, Vol. 86, Part 2, 1980, s. 209–226
- [25] CARMODY J., SELKOWITZ S., HESCHONG L., *Residential windows.A Guide to New Technologies and Energy Performance*. W.W.Norton & Company, Inc., New York, London 1996.
- [26] CATALANOTI S., CUOMO V., PIRO G., RUGGI D., SILVESTRI V., TROISE G., *The radiative cooling of selective surfaces*. Solar Energy, Vol. 17, 1975, pp. 83–89.
- [27] CENA K., GRZESZCZYK W., MARSZALEK K., NOWAK H., ŚLIWIŃSKA E., *Skorygowana temperatura powietrza w procesie wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie przegród budowlanych*. Prace Naukowe Instytutu Boddownictwa Politechniki Wr., Nr 37, Seria: Konferencje, Nr 7, „Problemy Fizyki i Ochrony Budowli”, Wrocław, 29.09.1982, s.26–33.
- [28] CENA K., GRZESZCZYK W., MARSZALEK K., NOWAK H., ŚLIWIŃSKA E., *Radiative heat balance of building envelopes*. The Fourth Symposium on Thermogrammetry, Budapest 28 – 30 March, 1983, pp. 226–228.
- [29] CENTENO M.V., *New formulae for the equivalent night sky emissivity*. Solar Energy, Vol.28, No.6, 1982, pp.489–498.
- [30] CERES Science Team: *Clouds and the Earth's radiant energy system (CERES) algorithm theoretical basis document*, NASA, RP-1376, December 1995.
- [31] CHARLOCK T., HERMAN B.M., *Discussion of the Elsasser formulation for infrared fluxes*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 15, 1976, pp. 657–661.
- [32] CHARLOCK T., HERMAN B.M., ZDUNKOWSKI W., *Comments on „Discussion of the Elsasser formulation for infrared fluxes”*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 15, 1976, pp.1317–1319.
- [33] CLARK G., *Passive/hybrid comfort cooling by thermal radiation*. Proc. Int. Passive and Hybrid Cooling Conf., Miami Beach, 1981, pp. 682–714.
- [34] CLARKE J.A., *Energy simulation in building design*. Adam Hilger Ltd. Bristol and Boston, 1985.
- [35] COLE R.J., *The longwave radiative environment around buildings*. Building and Environment, Vol. 11, 1976, pp.3–13.
- [36] COLE R.J., *The longwave radiation incident upon the external surface of buildings*. Building Services Engineering, Vol. 44, 1976, pp. 195–206.

- [37] COULSON K.L., *Solar and terrestrial radiation. Method and measurements*. Academic Press, New York, San Francisco, London 1975.
- [38] CZEPLAK G., KASTEN F., *Parametrisierung der atmosphärischen Wärmestrahlung bei bewölktem Himmel*. Meteorologische Rundschau, No. 6, 1988, s. 184–187.
- [39] DEGELMAN L.O., *A statistically-based hourly weather data generator for driving energy simulation and equipment design software for buildings*. Building Simulation '91 Conference, Sophia-Antipolis, Nice, France, 20–22 August, 1991, pp. 592–599.
- [40] DUFNER K.L., WOLFE D.E., BAILEY D.T., ARYA S.P., *Determination of climate variation within metropolitan areas*, Phase I Summary. ASHRAE Transactions, Vol.99, Part I, 1993, pp. 430–449.
- [41] DMOCHOWSKI M., GRZESZCZYK W., ŁAKOMY T., MARSZALEK K., NOWAK H., ŚLIWOWSKI L., *Model wymiany ciepła pomiędzy budynkiem a środowiskiem fizycznym, które go otacza*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, 25–27 października, 1989, s. 9–13.
- [42] DMOCHOWSKI M., GRZESZCZYK W., ŁAKOMY T., MARSZALEK K., NOWAK H., ŚLIWOWSKI L., *A building and its physical environment*. Scientific Papers of the Institute of Building Engineering of the Technical University of Wrocław, No. 65, Monographs No. 28, Wrocław 1992, Poland.
- [43] DOE-2 Science Team: *DOE-2 Basics Manual* (v. 2.1E), LBL, University of California, Berkeley, 1995, USA
- [44] DUFFIE J.A., BECKMANN W.A., *Solar energy thermal processes*. John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1980.
- [45] DZIENISZEWSKI W., *Zagadnienia modelowania matematycznego naturalnych procesów przepływowych powietrza i wymiany ciepła w budynkach*. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię”, ENERGODOM '96, Kraków–Mogilany, październik 1996, s. 77–91.
- [46] DZIENISZEWSKI W., *Równania strukturalnej wymiany ciepła i powietrza w obszarach budynków*. 6 Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce” ŁÓDŹ '97, Łódź 1997, s. 30–43.
- [47] ELSASSER W.M., *Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere*. Harvard Meteorological Studies, no 6, Cambridge, Harvard University Press, 1942.
- [48] ELSASSER W.M., CULBERTSON M.F., *Atmospheric radiation tables*. Meteorological Monogr., Vol. 4, No 23, 1960.
- [49] ERIKSSON T.S., GRANQVIST C.G., *Radiative cooling computed for model atmospheres*. Applied optics, Vol. 21, No. 23, 1982, pp. 4381–4388.
- [50] ERIKSSON T.S., LAUSHIKU E.M., GRANQVIST C.G., *Materials for radiative cooling to low temperatures*. Proceedings of SPIE, August 23–25, 1983, San Diego, Califor. Vol. 428, pp. 105–111.
- [51] ERIKSON T.S., *Surface coating for radiative cooling to low temperatures*. Chalmers University of Technology, Department of Physics, Göteborg, Sweden, 1985.
- [52] ESTOURNEL C., GUEDALIA D., *Improving the diagnostic relation for the nocturnal boundary-layer height*. Boundary-Layer Meteorology, Vol. 53, 1990, pp. 191–198.

- [53] FARYNIAK L., PIOTROWSKI J.Z., *Skorygowana wartość Q_v w obliczeniach wskaźnika E*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1997, s.52–56.
- [54] FEUSSNER P., *Einführung in die Meteorologie II*, 53, Mannheim, 1973
- [55] FINGER G., THIEBAUD F., ZÜRCHER CH., KNEUBÜHL F.K., FRANK TH., *IR-properties of the atmosphere relevant to energy losses of buildings caused by heat radiation*. Fourth International Conference on Infrared and Millimeter Waves and their Applications, December 10–15, 1979, Miami Beach, Florida, pp. 55–56.
- [56] FRANK TH., PÜNTENER T.W., *Oberflächen temperaturen von besonnten Fensterglassscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima and Komfort*. NEFF-Project Nr. 266, 1986.
- [57] GERTIS K., ERHORN H., *Infrarotwirksame Schichten zur Energieeinsparung bei Gebäuden?* Gesundheits-Ingenieur, Vol. 103, Heft 1, 1982, s.20–24, 33–34.
- [58] GIVONI B., *Solar heating and night radiation cooling by a roof radiation trap*. Energy and Buildings, Vol. 1, 1977, pp. 141–145.
- [59] GIVONI B., *Cooling by longwave radiation*. Passive Solar Journal, Vol. 1, No. 3, 1982, pp.131–150.
- [60] GIVONI B., *Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems*. Energy and Buildings, Vol. 17, 1991. pp. 177–199.
- [61] GOLDSTEIN R.J., *Appliaction of aerial infrared thermography to measurement of building heat loss*. ASHRAE Transactions, Vol.84, Part 1, 1978.
- [62] GRANQVIST C.G., *Optical coating for energy efficiency and solar applications; some recent developments*. SPIE Vol. 401 – Thin Film Technologies, 1983, pp. 330–340.
- [63] GRANQVIST C.G., *Spectrally selective surfaces for heating and cooling applications*. SPIE Optical Engineering Press, Vol. TT1, Washington, 1989.
- [64] GRANQVIST C.G., HJORTSBERG A., *Surfaces for radiative cooling: SiO films on Al*. Appl. Physics Lett. Vol. 36(2), 1980, pp.139–141.
- [65] GRENIER P., *Refrigeration radiative. Effet de serre inverse*. Reuve de Phsique Appliquee, Vol. 14, 1979, pp. 87–90.
- [66] GRUBER A., *Determination of the Earth-Atmosphere Radiation Budget from NOAA Satellite Data*. NOAA Technical Report, Meteorological Satellite Laboratory, NOAA, Washington, D.C., 1982.
- [67] GRZESZCZYK W., NOWAK H., MARSZALEK K., *Wpływ absorpcyjnych i emisyjnych właściwości powierzchni przegród budowlanych na wartość współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wr., Nr 37. Seria: Konferencje, Nr 7, „Problemy Fizyki i Ochrony Budowli”, Wrocław 29.09.1982, s. 67–72.
- [68] GRZESZCZYK W., MARSZALEK K., NOWAK H., *Badania selektywnych własności powierzchni materiałów budowlanych*. Materiały Jedenastej Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, WSI Opole, 27–28.09. 1982, s. 117–118.
- [69] GRZESZCZYK W., MARSZALEK K., NOWAK H., *Experimental research of radiative heat balance of building energy conservation aspect*. The Second Symposium on Thermo-Technical Measurements, Budapest 16–18 April, 1984, pp. 195–199.

- [70] GRZESZCZYK W., NOWAK H., MARSZALEK K., CENA K., *Skorygowana temperatura powietrza jako wskaźnik termiczny środowiska budynków*. Archiwum Inżynierii Łądowej, tom XXXI, z. 1–2, 1985, s. 213–228.
- [71] HAMBERG I., SVENSSON J.S., ERIKSSON T.S., GRANQVIST C.G., ARRENIUS P., NORIN F., *Radiative cooling and frost formation on surfaces with different thermal emittance: theoretical analysis and practical experimence*. Applied Optics, Vol. 26, No. 11, 1987, pp. 2131–2136.
- [72] HARISSON A.W., WALTON M.R., *Radiative cooling of TiO₂ white paint*. Solar Energy, Vol.20, 1978, pp. 185–188.
- [73] HEAD A.K., Australian Patent No. 239364 and 1962, U.S.Patent No.3,043,112
- [74] HJORTSBERG A., GRANQVIST C.G., *Radiative cooling with selectivity emitting ethylene gas*. Appl. Physics Lett. Vol. 39, 1981, pp. 507–509.
- [75] HOLTSLAG A.A.M., ULDEN VAN A.P., *Estimates of incoming shortwave radiation and net radiation from standard meteorological data*. The Netherlands, KNMI, Report W.R. 80–6, De Bilt 1980.
- [76] IDSO S.B., JACKSON R.D., *Thermal radiation from the atmosphere*. Journal of Geophys. Research. Vol. 74, 1969, pp. 5397–5403.
- [77] IDSO S.B., *Systematic deviations of clear sky atmospheric thermal radiation from predictions of empirical formulae*. Quart.J.Roy. Met. Soc., Vol. 98, 1972, pp. 399–401.
- [78] IDSO S.B., *A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μ m and 10.5- to 12.5- μ m thermal radiation from cloudless skies*. Water Resources Research, Vol. 17, No. 2, 1981, pp. 295–304.
- [79] JANUSZEWSKI J., *Oddziaływanie chłodzące nieboskłonu*. COW, Nr 2, 1991, s 33–34.
- [80] JENDO S., MARKS W., *Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji inżynierskich*. Rozpr. Inż. 34, 4, 1986, s. 457–481.
- [81] JĘDRZEJUK H., MARKS W., *Optymalizacja kształtu i struktury budynków oraz wykorzystania źródeł ciepła. Sformułowanie zagadnienia*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1997, s. 182–189.
- [82] IMÉNEZ J.I., ALADOS-ARBOLEDAS L., CASTRO-DIEZ Y., BALLESTER G., *On the estimation of long-wave radiation flux from clear skies*. Theor. Appl. Climatol, Vol. 38, 1987, pp. 37–42.
- [83] JURY E.J., *Przekształcenie Σ i jego zastosowanie*. WNT, Warszawa 1970.
- [84] KISHORE V.V.N., *Assessment of natural cooling potential for buildings in different climatic conditions*. Building and Environment, Vol. 23, No. 3, 1988, pp. 215–223.
- [85] KIMBALL B.A., *Cooling performance of night sky radiations*. Solar Energy, Vol. 34, No. 1, 1985, pp. 19–33.
- [86] KLEMM P., *Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych. Wybrane modele i metody badań*. Tom 1 (praca zbiorowa), Politechnika Łódzka, Łódź, 1993.
- [87] KLEMM P., *Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych. Modele fizyczne i metody badań*. Tom 2 (praca zbiorowa), Politechnika Łódzka, 1994.
- [88] KLEMM P., *Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych. Materiały kompozytowe*. Tom 3 (praca zbiorowa), Politechnika Łódzka, 1995.

- [89] KLEMM K., JABŁOŃSKI M., KLEMM P., *Wpływ wiatru na lokalne wartości współczynnika przejmowania ciepła*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1997, s. 202–207.
- [90] KLEMM P., GAWIN D., KONCA P., WOŹNIAK J., *Wyniki symulacji komputerowych procesów wymiany ciepła w budynkach jednorodzinnych z wybranymi biernymi systemami słonecznymi*. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Projektowania, Realizacji i Eksploatacji Budynków o Niskim Zapotrzebowaniu na Energię” – ENERGODOM, Politechnika Krakowska, Kraków, październik 1996, s. 151–158.
- [91] KNEIZYS F.X., SHETTLE E.P., GALLERY W.O., CHETWYND J.H., JR., ABREU L.W., SELBY J.E.A., FENN R.N., MCCLATCHEY R.A., *Atmospheric transmittance/radiance computer code LOWTRAN 5*. U.S. Air Force Laboratory, Hanscom AFB, Massachusetts, Technical Report AFGL-TR-80-0067, 1980.
- [92] KNEUBÜHL F.K., ZÜRCHER CH., THIEBAUD F., FINGER G., SAGELSDORFF R., FRANK TH., *Thermal radiation and building envelopes*. The International Conference 'Energy Conservation in the Built Environment', CIB Proceedings, Copenhagen, 1979, session 2, pp. 173–194.
- [93] KNEUBÜHL F.K., FINGER G., THIEBAUD F., ZÜRCHER CH., SAGELSDORFF R., FRANK TH., *Energy saving by reduction of thermal radiation from building envelopes*. The International Congress on Building Energy Management, Portugal, May 12–15, 1980.
- [94] KONDRATYEW K.Y., *Radiation in the Atmosphere*. Chap. 6, Academic Press, New York, 1969.
- [95] KOSSECKA E., *Bilans cieplny prostych systemów helio-grzewczych i przegród budowlanych w długich przedziałach czasu*. Archiwum Inżynierii Lądowej, Vol. 37, nr 2, 1991.
- [96] KOSSECKA E., PRĘTCZYŃSKI Z., *Analysis of heat transfer through the exterior building walls*. Archives of Civil Engineering. Vol. 38, No 3, 1992, pp.249–262.
- [97] KOSSECKA E., *Heat transfer through building wall elements of complex structure*. Arch. Civ. Eng., Vol. 38, No 1–2, 1992, pp. 117–126.
- [98] KOSSECKA E., KOSNY J., CHRISTIAN J.E., *A Simple Algorithm for Determining the Thermal Resistance of a Wall Based on Measurements of Surface Heat Flux and Temperature*. Building Research Journal, Vol. 3, No. 1, Spring 1994, pp. 57–66.
- [99] KOSSECKA E., *Prosty stochastyczny model cieplny budynku*. XL Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PBITB, Tom 6, Krynica 1994, s. 37–44.
- [100] KOSSECKA E., KOŚNY J., *Przybliżone modelowanie dynamiki cieplnej elementów ścian budynków o złożonej strukturze*. II Sympozjum Naukowe „Heat and Moisture Transfer”, Szklarska Poręba 1996, s. 61–76.
- [101] KOSSECKA E., *Wybrane zagadnienia dynamiki cieplnej ścian budynków*. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Studia z Zakresu Inżynierii nr 45, Warszawa 1998.
- [102] KOSTKOWSKI E., *Promieniowanie cieplne*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1993.
- [103] KRAUJALIS M.W., *Próba określenia wielkości promieniowania efektywnego na obszarze Polski*. Przegląd Geograficzny, Nr 37/1, 1965, s. 77–92.

- [104] KUSUDA T., *Thermal Response Factors for Multi-Layer Structures of Various Heat Conduction Systems*. ASHRAE Trans. Vol. 75, No 1, 1969, pp. 241–271.
- [105] LANDRO B., MCCORMICK P.G., *Effect of surface characteristics and atmospheric conditions on radiative heat loss to a clear sky*. Int. J. Heat and mass transfer, Vol. 23, 1980, pp. 613–620.
- [106] LASKOWSKI L., *Wybrane zagadnienia fizyki miasta*. COIB, Warszawa 1987.
- [107] LASKOWSKI L., *Systemy biernego ogrzewania słonecznego. Zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Studia z Zakresu Inżynierii nr 34, Warszawa 1993.
- [108] LLEBOT J.E., JORGE J., *Some results of thermal atmospheric radiation measurements in Manresa (Spain)*. Solar Energy, Vol. 32, No. 4, 1984, pp. 473–477.
- [109] LOUDON A.G., *Summertime temperatures in buildings*. U.K., Build. Research Station, Current Paper No. 47, 1968.
- [110] MADANY A., *Fizyka atmosfery. Wybrane zagadnienia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- [111] MARKS W., *Zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu budynków energooszczędnych*. Zeszyty Naukowe Nr 88, Budownictwo 19, Zielona Góra 1989.
- [112] MARKS W., *Zagadnienia optymalizacji w fizyce budowli*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1995, s. 249–256.
- [113] MARKS W., *Podstawy optymalizacji materiałów kompozytowych*. W pracy pod redakcją P. Klemma: Fizyka Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, t.3, Materiały Kompozytowe, Politechnika Łódzka, Łódź, 1995, s. 5–28.
- [114] MARTIN M., BERDAHL P., *Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program*. Solar Energy, Vol. 33, No. 3/4, 1984, pp. 241–252.
- [115] MARTIN M., BERDAHL P., *Characteristics of infrared sky radiation in the United States*. Solar Energy, Vol. 33, No. 3/4, 1984, pp. 321–336.
- [116] MARTIN M., *Radiative cooling*. Cook J. editor, Passive cooling, Series: Solar heat technologies, No. 8, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [117] MATHIS K., *Validation of models for estimating atmospheric radiation*. EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Section Applied Physics in Building, Dübendorf, Switzerland, June 1991.
- [118] MATSUTA M., TERADA S., ITO H., *Solar heating and radiative cooling using a solar collector-sky radiator with a spectrally selective surface*. Solar Energy, Vol. 39, No. 3, 1987, pp. 183–186.
- [119] MIARA K., PASZYŃSKI J., GRZYBOWSKI J., *Zróżnicowanie przestrzenne promieniowania na obszarze Polski*. Przegląd Geograficzny, T. LiX, z. 4, 1987, s. 487–509.
- [120] MICHAŁOWSKA-SMAK A., *Spatial distribution of the net long-wave radiation in Poland*. Publ. Inst. Geophys, Polish Academy of Science, D-9, No. 132, 1979, pp. 75–95.
- [121] MICHELL D., BIGGS K.L., *Radiation cooling of buildings at night*. Applied Energy, Vol. 5, 1979, pp. 263–275.
- [122] MONTEITH J.L., *Fizyka środowiska biologicznego*. PWN, Warszawa 1977.

- [123] MOSTREL M., GIVONI B., *Windscreens in radiant cooling*. Passive Solar Journal, Vol. 1, No.4, 1982, pp. 229–238.
- [124] NOWAK H., *Radiative heat transfer between the outside surface of the flat roof and the thermal environment*. Third International Conference on Infrared Physics, ETH Zurich, Switzerland, July 23–27, 1984, pp. 347–349.
- [125] NOWAK H., MARSZALEK K., GRZESZCZYK W., *Wpływ promieniowania środowiska zewnętrznego na straty ciepła przez stropodachy*. XXX Jubileuszowa Konferencja KILiW PAN I KN PZITB, Krynica 1984, Referaty, tom III, cz.V, s. 181–186.
- [126] NOWAK H., *The influence of solar and thermal radiation on the thermal balance of the flat roof*. International Conference on Passive and Low Energy Architecture in Housing, PLEA '86, Pecs, Hungary, September 1–5, 1986, Vol. II, pp. 48–59.
- [127] NOWAK H., *Wpływ selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na jego bilans cieplny*. I Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, 11–13 listopada, 1987.
- [128] NOWAK H., *The sky temperature in net radiant heat loss calculations from low-sloped roofs*. Infrared Physics, Vol. 29, No. 2–4, 1989, pp. 231–232.
- [129] NOWAK H., *Radiative interaction between low-sloped roofs and the atmosphere*. The 6th Conference on Thermogrammetry and Thermal Engineering, 31 May – 2 June, 1989, pp. 453–496.
- [130] NOWAK H., *Obliczanie jednokierunkowego nieustalonego przewodzenia ciepła metodą impulsowej funkcji przeniesienia*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, 25–27 października, 1989, s.112–116.
- [131] NOWAK H., *The influence of the atmospheric radiation on the heat balance of low-sloped roofs*. International Conference on Millimeter Wave and Far Infrared Technology June 18–22, 1990, Beijing, China, T7.2, pp. 174–177.
- [132] NOWAK H., *The longwave radiative heat transfer of the building envelopes*. Infrared Physics, Vol. 32, 1991, pp. 357–363.
- [133] NOWAK H., *Długofalowe promieniowanie środowiska zewnętrznego a bilans cieplny przegród budowlanych*. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 26–28, 1991, s. 15–20.
- [134] NOWAK H., *Program komputerowy DOE-2 do obliczania zużycia energii w budynkach*. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 26–28, 1991, s. 78–83.
- [135] NOWAK H., CENA K., *The longwave radiation around buildings at different angles*. International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology, August 17–21, 1992, Beijing, China, Th1.3, pp. 451–454.
- [136] NOWAK H., *The longwave radiation around buildings*. Proceedings of an Interuniversity Research Seminar, Eindhoven University of Technology-Technical University of Wrocław, Eindhoven, The Netherlands, November 18–20, 1992, pp. 65–69.
- [137] NOWAK H., *Obliczanie promieniowania cieplnego wokół budynków*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec, 1993, s. 202–208.

- [138] NOWAK H., *On modelling of the longwave radiation around buildings*. Dept. Physical Aspects of the Built Environment (FAGO Group), Faculty of Architecture, Building and Planning, Eindhoven University of Technology, Report No. 94.40.K, August 1994, Eindhoven, The Netherlands.
- [139] NOWAK H., DE WIT M., SCHELLEN H., *Estimation of the atmospheric longwave radiation*. Proceedings of an Interuniversity Research Seminar, Technical University of Wrocław–Eindhoven University of Technology, Wrocław, Poland, November 23–25, 1994, pp. 193–198.
- [140] NOWAK H., ŚLIWOWSKI L., *Pomiary natężenia cieplnego promieniowania atmosfery w Eindhoven*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1995, s. 271–276.
- [141] NOWAK H., *Wybrane problemy ochrony cieplnej i termorenowacji budynków*. Kwartalnik „Warstwy”, Nr 1, styczeń–marzec 1996, s. 26–27.
- [142] NOWAK H., MARSZALEK K., *Thermographic survey of basement walls in multifamily buildings in Poland*. The International Conference on North American Tunneling '96, Washington, DC, USA, 21–24 April, 1996, pp. 823–829.
- [143] NOWAK H., *Analiza i ocena możliwości kształtowania bilansu cieplnego okien*. Kwartalnik „Okno”, Nr 1(8), 1997, s.196–204.
- [144] OKE T.R., *The energetic basis of the urban heat island*. Quart. J. of the Royal Meteor. Soc., Vol. 108, No. 455, 1982, pp. 1–24.
- [145] OKE T.R., *Boundary layer climates*. Methuen and Co. Ltd., London, 2nd edn., 1987.
- [146] OKE T.R., *Street design and urban canopy layer climate*. Energy and Buildings, Vol. 11, 1988, pp. 103–113.
- [147] OSIOWSKI J., *Zarys rachunku operatorowego*. WNT, Warszawa 1981.
- [148] OWCZAREK S., *Optymalizacja kształtu budynków energooszczędnych o podstawie wieloboku*. Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Studia z Zakresu Inżynierii nr 32, Warszawa 1992.
- [149] PALTRIDGE G.W., PLATT C.M., *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*. Elsevier, New York, 1976.
- [150] PARKER D.S., McILVAINE J.E.R., BARKASZI S.F., BEAL D.J., *Laboratory testing of reflectance properties of roofing materials*. Report No. FSEC–CR-670-93, 1993, Florida Solar Energy Center, FL, USA.
- [151] PASZYŃSKI J., *Atlas bilansu promieniowania w Polsce*. Dokumentacja Geograficzna IGPAN, Nr 2–4, Warszawa 1966.
- [152] PASZYŃSKI J., *Studies on the heat balance and on evaporation*. Geogr. Pol., 22, 1972, pp.35–51.
- [153] PIKUL Z., *Propagacja uszkodzeń w przestrzennych konstrukcjach żelbetowo-kamiennych z uwzględnieniem wpływu zmian temperatury*. Politechnika Wrocławska, Instytut Budownictwa, Wrocław 1996.
- [154] PŁOŃSKI W., POGORZELSKI J.A., *Fizyka budowli*. Arkady 1979.
- [155] PŁOŃSKI W., *Możliwości poprawienia bilansu energetycznego obiektów budowlanych*. Przegląd Budowlany, Nr 3, Warszawa 1988.

- [156] POGORZELSKI J.A., *Główne problemy niestacjonarnego przewodzenia ciepła w przegrodach budowlanych*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa PWr., Nr 9, Seria: Monografie, Nr 3, Wrocław 1973.
- [157] POGORZELSKI J.A., *Założenia polityki państwa w zakresie racjonalizacji użytkowania energii w sektorze komunalno-bytowym*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1995, s. 292–298.
- [158] POGORZELSKI J.A., ZIELIŃSKA H., *Wpływ parametrów budynków na wielkość sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania*. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię”, ENERGODOM '96, Kraków, październik 1996, s. 317–324.
- [159] POGORZELSKI J.A., FIRKOWICZ-POGORZELSKA K., *Deklarowana i obliczeniowa przewodność cieplna materiałów budowlanych*. Prace Instytutu Techniki Budowlanej, 1/98.
- [160] REAGAN J.A., ACKLAM D.M., *Solar reflectivity of common building materials and its influence on roof heat gain of typical southwestern USA residences*. Energy and Buildings, Vol. 2, 1979, pp. 237–248.
- [161] RING G., IBRAHIM I., KLEMM P., *Badania współczynników charakteryzujących radiacyjną wymianę ciepła przez przegrody nieprzezroczyste*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1993, s. 236–241.
- [162] ROACH W.T., *Measurements of atmospheric radiation and the heat balance at the ground at Kew, May 1953 – May 1954*. Air Ministry, Met. Society, Vol. 2, 1955.
- [163] ROSA R., *Solar and thermal radiation inside a multispans greenhouse*. J.Agric.Engng. Vol.40 1988, pp. 285–295.
- [164] SAITOH T., ONO T., *Utilization of seasonal sky radiation energy for space cooling*. ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 106, 1984, pp. 403–407.
- [165] SALA A., *Radiacyjna wymiana ciepła*. WNT, 1982.
- [166] SHIBATA K., AOKI T., *An infrared radiative scheme for the numerical models of weather and climate*. J. Geophys. Res., Vol. 94, 1989, pp. 14923–14943.
- [167] SIEGEL R., HOWELL J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York, 1981.
- [168] SODHA M.S., ASHUTOSH S., KUMAR A., SHARMA A.K., *Thermal performance of an evaporatively cooled multi-storey building*. Building and Environment, Vol. 21, No. 2., 1986, pp. 71–79.
- [169] STALEY D.O., JURICA G.M., *Effective atmospheric emissivity under clear skies*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 11, 1972, pp. 349.
- [170] STEPHENSON D.G., MITALAS G.P., *Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs*. ASHRAE Transactions, Vol. 77, Part 2, 1971, pp. 177–196.
- [171] STOPA-BORYCZKA M., BORYCZKA J., BŁAŻEK E., SKRZYPCZUK J.: *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. IX. Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 1995.
- [172] SWAID H., HOFFMAN M.E., *Climatic impacts of urban design features for high- and mid-latitude cities*. Energy and Building, Vol. 14, 1990, pp. 325–336.

- [173] SWINBANK W.C., *The longwave radiation from clear skies*. Quartely Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 89, 1963, pp. 339–348.
- [174] ŚLIWIŃSKA E., ŚLIWOWSKI L., *Komfort cieplny ludzi w mieszkaniach i miejscach pracy*. Ciepłownictwo Ogrzewanie Wentylacja, nr 10, 1987, s. 231–232.
- [175] ŚLIWOWSKI L., *Komfort cieplny w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 36, Seria: Monografie Nr 16, Wrocław 1982.
- [176] ŚLIWOWSKI L., *Mikroklimat w mieszkaniu*. COIB, Warszawa 1986.
- [177] ŚLIWOWSKI L., *Problemy badawcze mikroklimatu wewnątrz*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1995, s. 350–355.
- [178] TAHA H., AKBARI H., ROSENFELD A., HUANG J., *Residential cooling loads and the urban heat island – the effects of albedo*. Building and Environment, Vol. 23, No. 4, 1988, pp. 271–283.
- [179] The PASSYS Project, Phase 1. *Subgroup Model Validation and Development*, Final Report 1986–1989. Edited by Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark.
- [180] TIWARI G.N., UPADHYAY M., RAI S.N., *A comparison of passive cooling techniques*. Building and Environment, Vol. 29, No. 1, 1994, pp. 21–34.
- [181] TODHUNTER P.E., TERJUNG W.H., *Intercomparison of three urban climate models*. Boundary-Layer Meteorology, Vol. 42, 1988, pp. 181–205.
- [182] TODHUNTER P.E., *The response of urban canyon energy budgets to variable synoptic weather types – a simulation approach*. Atmospheric Environment Vol. 24B, 1990, pp. 35–42.
- [183] TSO C.P., CHAN B.K., HASHIM M.A., *An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis*. Energy and Buildings, Vol. 14, 1990, pp. 143–152.
- [184] UNSWORTH M.H., MONTEITH J.L., *Long-wave radiation at the ground (i) Angular distribution of incoming radiation*. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 101, 1975, pp. 1–13.
- [185] UNSWORTH M.H., *Long-wave radiation at the ground (ii) Geometry of interception by slopes, solids, and obstructed planes*. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 101, 1975, pp. 25–34.
- [186] UNSWORTH M.H., DALRYMPLE G.J., *Long-wave radiation at the ground (IV) Comparison of measurement and calculation of radiation from cloudless skies*. Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 104, 1978, pp. 989–997.
- [187] VERSEGHY D.L., MUNRO D.S., *Sensitivity studies on the calculation of the radiation balance of urban surfaces: Longwave radiation*. Boundary-Layer Meteorology, Vol. 48, 1989, pp. 1–18.
- [188] WILKES K.E., CHILDS P.W., *Thermal performance of clean horizontal radiant barriers under winter conditions: laboratory measurements and mathematical modeling*. ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part 1, 1993, pp. 603–613.
- [189] WISSE J.A., *Warmteoverdracht door straling in de atmosfeer*. Vereniging voor Studie-en Studentenbelangen (VSSD) te Delft – 1977.
- [190] WIŚNIEWSKI S., WIŚNIEWSKI T.S., *Wymiana ciepła*. WNT, Wyd. IV, Warszawa 1997.
- [191] WOLSKI L., *Analiza dotychczasowych metod do praktycznego wymiarowania termicznego obiektów szklarniowych*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1997, s. 403–410.

- [192] WOŹNIAK J., GAWIN D., KLEMM P., *Program ESP-version 8 (The European Reference Program for Energy Simulation) do symulacji procesów wymiany ciepła i masy w budynkach*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i w Praktyce”, Łódź, czerwiec 1993, s. 304–310.
- [193] YAMAMOTO G., *On a radiation chart*. Sci. Rep. Thoku University, Ser. 5, Vol. 4, 1952, pp. 9–23.
- [194] YOSHIDA A., TOMINGA K., WATATANI S., *Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season*. Energy and Buildings, Vol. 15–16, 1990/91, pp. 417–428.
- [195] ZDUNKOVSKI W.G., BARTH R.E., LOMBARDO F.A., *Discussion on the atmospheric radiation tables by Elsasser and Culbertson*. Pure Appl. Geophys., Vol. 63, 1966, pp. 211–219.
- [196] ZÜRCHER CH., FINGER G., KNEUBÜHL F.K., THIEBAUD F., VETSCH H., *Thermal radiation properties of building envelopes relevant to energy losses*. Proc. the 9th CIB Congres, August 15–19, Stockholm 1983, Vol. 3A, pp. 431–442.

INTERACTION OF ENVIRONMENTAL THERMAL RADIATION ON THE BUILDING

Rational use of thermal energy requires among the others constraction of suitable mathematical models allowing calculation of energy consumption within a period of a year. In such models local meteorological data including data on environmental thermal radiation should also be taken into consideration. The main obstacle is a fact that in Poland similarly as in other countries, thermal radiation of the atmosphere has not been routinely measured. Therefore contribution of longwave radiation to the heat balance of buildings is considered in an inappropriate way or even ignored. Quite often radiation for a particular location is calculated from empirical equations worked out for other regions. The choice of model enabling the best agreement between the measured and the calculated values should be preceded by thorough examination of the region. If such an agreement is not attained, a theoretical model for a particular localisation should be formulated, basing on the measurements. Application of simplified models, which neglect the contribution of longwave radiation to the heat balance of buildings or erroneously estimate such effects, leads to underation of energy consumption during the heating season.

— A verified mathematical model of an influence of environmental thermal radiation on the building has been presented. It enables calculation of the intensity of thermal radiation reaching horizontal planes as well as those sloping up to 90° at various weather conditions as a function of routinely measured parameters, such as air temperature, cloud cover factor or alternatively vapour pressure or dew point temperature. The influence of longwave radiation on the heat balance of building envelopes in the conditions of steady and unsteady heat transfer has been discussed. The possibility of the radiation balance shaping and, in consequence, of shaping the building envelopes heat balance by using spectral-selective surfaces with regard to long- and short wave radiation was also presented. Moreover, quantitative thermal effects and technical possibilities of obtaining assumed radiative characteristics of surfaces of building envelopes have been also pointed out. Possibilities of the application of the formulated model are also mentioned.

Due to a particular spectral and angular distribution of the thermal radiation of the atmosphere at night under clear sky conditions, main problems connected with the occurrence of the radiative cooling of the radiator (including building envelopes) are discussed. The influence of environmental longwave radiation on the heat balance of horizontal partitions (flat roofs), sloping partitions (pitched roofs) and vertical ones (walls) is different. Flat roofs (similarly as the ground) as the surfaces most exposed to

radiative interaction of the atmosphere, undergo radiative cooling. There are methods of shaping longwave radiation balance of a radiator and the procedures of calculation the characteristics of radiative cooling, i.e. net longwave radiation and sky temperature depression of a radiator presented. The methods of promoting (supporting) the radiative cooling effects, required spectral selective parameters of radiators in reference to thermal radiation as well as the range of sky temperature values strongly dependent on atmospheric thermal radiation are discussed too.

For the analysis and calculating the transient heat balance of building envelopes, a model based on the pulse transfer function method in its part concerning with heat conduction and covering radiative interaction of the environment in the range of short – and longwave radiation has been proposed and verified. Thermal radiation of environment in steady heat transfer through building envelopes is also taken into account.

Directions of future studies have been suggested.

SPIS TREŚCI

Wykaz podstawowych oznaczeń.....	4
1. Wstęp	6
1.1. Uwagi wprowadzające	6
1.2. Cel i zakres pracy.....	11
2. Promieniowanie ciepłe środowiska zewnętrznego	14
2.1. Wprowadzenie	14
2.1.1. Promieniowanie ciepłe w środowisku naturalnym	14
2.1.2. Promieniowanie długofalowe atmosfery	17
2.2. Radiacyjna wymiana ciepła w atmosferze	20
2.2.1. Przyjmowane skale uogólnienia.....	20
2.2.2. Wybrane modele obliczeniowe	24
2.2.2.1. Wykresy promieniowania ciepłego atmosfery – model Elsasser’a	24
2.2.2.2. Model obliczeniowy LOWTRAN	31
2.2.2.3. Podsumowanie	35
2.3. Empiryczne modele promieniowania ciepłego atmosfery na płaszczyznę poziomą.	35
2.3.1. Promieniowanie atmosfery w warunkach nieba bezchmurnego	35
2.3.2. Promieniowanie atmosfery przy niebie zachmurzonym	40
2.4. Empiryczne modele ciepłego promieniowania środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną	43
3. Chłodzenie radiacyjne powierzchni czynnej	46
3.1. Pasywne chłodzenie budynków – istota chłodzenia radiacyjnego	46
3.2. Powierzchnie spektralnie selektywne	49
3.3. Temperatura promieniowania nieboskłonu	57
3.3.1. Kalorymetryczna temperatura nieboskłonu	57
3.3.2. Spektralna temperatura nieboskłonu	58
3.3.3. Wskaźnik temperatury promieniowania nieboskłonu	63
3.4. Bilans promieniowania długofalowego	63
3.4.1. Promieniowanie różnicowe	63
3.4.2. Wskaźnik temperatury powierzchni czynnej	65
3.5. Bilans cieplny powierzchni czynnej	66
3.6. Metody wspomagania efektu chłodzenia radiacyjnego	67
3.6.1. Redukowanie konwekcyjnej wymiany ciepła	68
3.6.2. Radiatory spektralnie selektywne dla promieniowania ciepłego	69

4. Model oddziaływania cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek	77
4.1. Ogólne podstawy modelu	77
4.2. Badania doświadczalne	78
4.2.1. Cel i zakres badań ..	78
4.2.2. Przyrządy pomiarowe	81
4.3. Wyniki badań	83
4.3.1. Promieniowanie cieplne atmosfery na płaszczyznę poziomą	83
4.3.2. Promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego na płaszczyznę nachyloną	97
4.4. Empiryczne formuły obliczeniowe ..	101
4.5. Model obliczeniowy	105
4.5.1. Założenia i postać modelu	105
4.5.2. Weryfikacja modelu	110
4.5.3. Porównanie z wynikami wg modelu Cole'a	114
4.6. Analiza wrażliwości modelu obliczeniowego.	118
5. Promieniowanie cieplne środowiska zewnętrznego wokół budynków – dyskusja wyników	124
5.1. Analiza porównawcza wyników modelu obliczeniowego	124
5.2. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu	131
5.3. Wpływ kąta nachylenia płaszczyzny i zachmurzenia nieba na wartość docierającego promieniowania długofalowego	133
5.4. Radiacyjna wymiana ciepła między budynkami	139
5.5. Możliwości zastosowania modelu obliczeniowego	142
6. Wpływ długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego na bilans cieplny przegród budowlanych	147
6.1. Przenikanie ciepła przez przegrody w stanie ustalonym	147
6.1.1. Poprawka temperaturowa do obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego	147
6.1.2. Korekta bilansu cieplnego	152
6.2. Nieustalona wymiana ciepła przez przegrody budowlane	154
6.2.1. Model bilansu cieplnego przegrody	154
6.2.2. Metoda impulsowej funkcji przejścia do obliczania nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrody wielowarstwowe	157
6.2.3. Ocena modelu bilansu cieplnego przegrody	167
7. Podsumowanie	173
7.1. Uwagi końcowe i wnioski	173
7.2. Kierunki dalszych badań	176
Dodatek	177
Literatura	180

CONTENTS

List of main denotations.....	4
1. Preface.....	6
1.1. Introductory remarks.....	6
1.2. Aim and range of the dissertation.....	11
2. Thermal radiation of the environment	14
2.1. Introduction.....	14
2.1.1. Thermal radiation in the natural environment	14
2.1.2. The longwave radiation of the atmosphere	17
2.2. Radiative heat transfer in the atmosphere	20
2.2.1. Assumed generalization scales.....	20
2.2.2. Selected calculation models.....	24
2.2.2.1. Radiation charts of the atmosphere – Elsasser’s model	24
2.2.2.2. LOWTRAN model.....	31
2.2.2.3. Summary	35
2.3. Empirical models of the atmospheric thermal radiation on a horizontal plane	35
2.3.1. Atmospheric radiation under clear-sky conditions	35
2.3.2. Atmospheric radiation under cloudy-sky conditions	40
2.4. Empirical models of the environmental thermal radiation upon an inclined plane	43
3. Radiative cooling of the active surface.....	46
3.1. Passive cooling of buildings – the nature of radiative cooling.....	46
3.2. Spectral-selective surfaces.....	49
3.3. Sky temperature	57
3.3.1. Calorimetric sky temperature.....	57
3.3.2. Spectral sky temperature	58
3.3.3. Sky temperature depression	63
3.4. Longwave radiative balance	63
3.4.1. Net radiation.....	63
3.4.2. Surface temperature depression	65
3.5. Heat balance of the active surface	66
3.6. Methods of improving of the radiative cooling effect.....	67
3.6.1. Lowering of the convective heat transfer.....	68
3.6.2. Spectral-selective radiators for thermal radiation	69

4. Model of interactions of environmental thermal radiation on the building.....	77
4.1. General basis of the model.....	77
4.2. Experimental	78
4.2.1. The aim and range of the investigation	78
4.2.2. Experimental equipment	81
4.3. Results of examination.....	83
4.3.1. Thermal radiation of the atmosphere incident on a horizontal surface	83
4.3.2. Thermal radiation of the environment incident upon an inclined surface.....	97
4.4. Empirical formulae	101
4.5. Calculation model.....	105
4.5.1 Assumptions and form of the model	105
4.5.2. Verification of the model	110
4.5.3. Comparison with the results according to Cole's model	114
4.6. Sensitivity analysis of the calculation model.....	118
5. Thermal environmental radiation around buildings – discussion of the results	124
5.1. Comparative analysis of the calculation model results.....	124
5.2. Radiative balance of the outside surface of a flat roof	131
5.3. Influence of the plane inclination angle and cloudiness of the sky on the incoming longwave radiation.....	133
5.4. Radiative heat transfer between buildings.....	139
5.5. Possible application of the calculation model	142
6. Influence of the longwave environmental radiation on the heat balance of building envelopes	147
6.1. Steady-state heat transfer through building envelopes	147
6.1.1. Outside air temperature correction	147
6.1.2. Correction of the heat balance	152
6.2. Non-steady heat transfer through building envelopes	154
6.2.1. Model of the heat balance of a partition	154
6.2.2. Pulse transfer method of calculation of transient heat transfer through multilayer building envelopes	157
6.2.3. Evaluation of the heat balance model	167
7. Summary	173
7.1. Final remarks and conclusions.....	173
7.2. Future field of study.....	176
Appendix.....	177
References.....	180

PRACE NAUKOWE INSTYTUTU BUDOWNICTWA
(wydane w latach 1991–1998)

- Nr 60, Monografie nr 25, E. Kubica, *Nośność graniczna i sztywność słupów stalowych o przekrojach skrzynekowych zamkniętych*, Wrocław 1991
- Nr 61, Studia i Materiały nr 16, A. Borcz, M. Maj, A. Trochanowski, *Wytyczne projektowania budowy i użytkowania silosów żelbetowych*, Wrocław 1991
- Nr 62, Monografie nr 26, A. Kapelko, *Aspekty techniczno-ekonomiczne modyfikacji tworzyw cementowych wybranymi domieszkami chemicznymi*, Wrocław 1991
- Nr 63, Monografie nr 27, S. Kobiela, *Application of pressure cells in civil engineering*, Wrocław 1991
- Nr 64, Konferencje nr 20, *Problemy technologii i badań materiałów budowlanych*, Wrocław 1991
- Nr 65, Monografie nr 28, *A building and its physical environment* (praca zbiorowa pod red. L. Śliwowskiego), Wrocław 1992
- Nr 66, Monografie nr 29, B. Gosowski, *Stateczność przestrzenna stężonych podłużnie i poprzecznie pełnościennych elementów konstrukcji metalowych*, Wrocław 1992
- Nr 67, Monografie nr 30, M. Szechiński, *Deformacje zginanych elementów żelbetowych obciążonych długotrwale*, Wrocław 1996
- Nr 68, Konferencje nr 21, *Proceedings of the Third Interuniversity Research Conference*, Wrocław 1994
- Nr 69, Konferencje nr 22, *Materiały kompozytowe – właściwości, wytwarzanie, zastosowanie*. I Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1997
- Nr 70, Konferencje nr 23, *Budownictwo betonowe w energetyce*. I Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1998
- Nr 71, Konferencje nr 24, *Podstawy remontowe w budownictwie ogólnym*. VIII Konferencja naukowo-techniczna, Wrocław 1998



**Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”**

**Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
budynek A-1 PWr., tel. (0-71) 320 25 34;
„Tech”**

**plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. (0-71) 320 32 52
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową**

ISSN 0324-9875