

INSTYTUT BUDOWNICTWA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Raport serii PRE nr 24/82

BILANS CIEPLNY STROPODACHU
W WARUNKACH NIEUSTALONEJ
WYMIANY CIEPŁA

Henryk Nowak

Praca doktorska

PROMOTOR: prof.dr hab. Krzysztof CENA

SŁOWA KLUCZOWE: stropodachy, nieustalona wymiana ciepła,
środowisko zewnętrzne

Mgr inż. Henryk Nowak

Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Zespół Badawczy Fizyki Środowiska

ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, gmach C-7, pok. 615, tel. 20-33-25

50-370 WROCŁAW

Raport opracowano w ramach tematu badawczego 2301/3

pod kierownictwem dr inż. Lecha Śliwowskiego

Raport przygotowany w języku polskim.

Cel przygotowania raportu: Rozprawa doktorska

Symbol pracy: P

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw Instytutu Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej dnia 11.X.1982 r.

Pragnę gorąco podziękować Panu Profesorowi dr hab. Krzysztofowi Cenie za wszechstronną pomoc i ukierunkowanie moich badań.

Dziękuję również Panu dr inż. Lechowi Sliwowskiemu, kierownikowi zespołu badawczego, za opiekę w trakcie wykonywania niniejszej pracy.

Za cenne dyskusje i uwagi uprzejmie dziękuję członkom Zespołu Badawczego Fizyki Środowiskowej.

Pragnę podziękować także Panu mgr inż. Wiesławowi Grzeszczykowi za pomoc w przygotowaniu stanowiska pomiarowego i przeprowadzeniu prac doświadczalnych.

Dziękuję Panu dr inż. Jackowi Michalczykowi za uwagi w początkowej fazie realizacji niniejszej pracy.

S P I S T R E Ś C I

strona

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	3
STRESZCZENIE	5
1. WSTĘP	6
2. TEORIA	13
2.1. Radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na stropodachy	13
2.1.1. Promieniowanie słoneczne	13
2.1.2. Promieniowanie nieboskłonu, gruntu i otaczają- cych obiektów	21
2.2. Model jednokierunkowego nieustalonego przepływu ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną w warunkach asymetrii pola promieniowania środowis- ka zewnętrznego	28
2.2.1. Założenia modelu matematycznego	28
2.2.2. Lokalny bilans ciepła przenikającego przez stropodachy	36
2.2.3. Selektywne własności radiacyjne zewnętrznej po- wierzchni stropodachu	39
3. METODA OBLICZENIOWA	45
4. CHARAKTERYSTYKA PROGRAMÓW OBLICZENIOWYCH.....	57
5. OPIS BADAŃ	60
6. PRZYRZĄDY POMIAROWE	68
7. WYNIKI	71
8. DYSKUSJA	103
8.1. Radiacyjna wymiana ciepła między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym	103
8.1.1. Średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego	108
8.2. Nieustalona wymiana ciepła między stropodachem a otoczeniem	113
8.2.1. Bilans cieplny stropodachu	113

8.2.2. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu	118
8.2.3. Wpływ kąta pochylenia i zorientowania względem stron świata płaszczyzny stropodachu na jego bilans cieplny	123
8.2.4. Wpływ selektywnych własności radiacyjnych ze- wnętrznej powierzchni stropodachu na jego bi- lans cieplny	127
8.3. Obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego w modelu ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez stropodach, uwzględniająca rzeczy- wiste oddziaływanie środowiska zewnętrznego.....	137
8.4. Ocena przyjętego modelu i zastosowanej metody obliczeniowej	154
9. WNIOSKI	162
PISMIENNICTWO	164

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a_s - współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni stropodachu dla promieniowania słonecznego
- c - stopień zachmurzenia nieba
- c_p - ciepło właściwe $[J\ kg^{-1}K^{-1}]$
- d - grubość przegrody $[m]$
- $q_1(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_k(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła wymienianego przez konwekcję w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_l(\tau)$ - natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego absorbowanego przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_L(\tau)$ - natężenie różnicowego promieniowania długofalowego wymienianego między zewnętrzną powierzchnią stropodachu a środowiskiem zewnętrznym w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_o(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_r(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $q_s(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego absorbowanego przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- s - zespolony operator przekształcenia Laplace'a
- $v(\tau)$ - prędkość wiatru w chwili τ $[m\ s^{-1}]$
- z - zespolony operator przekształcenia $\mathcal{Z}$
- $A(s), B(s), C(s), D(s)$ - elementy macierzy transmisji
- $I_{T_\beta}(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem β w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $K(z)$ - impulsowa funkcja przeniesienia
- $R_A(\tau)$ - natężenie promieniowania nieboskłonu na płaszczyznę poziomą w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- $R_\beta(\tau)$ - natężenie promieniowania nieboskłonu i gruntu na płaszczyznę nachyloną pod kątem β w chwili τ $[W\ m^{-2}]$
- t - temperatura $[^{\circ}C]$
- T - temperatura $[K]$

- $T_e(\tau)$ - temperatura powietrza na zewnątrz stropodachu w chwili τ [K]
 $T_i(\tau)$ - temperatura powietrza w pomieszczeniu pod stropodachem w chwili τ [K]
 $T_{is}(\tau)$ - temperatura wewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ [K]
 $T_{os}(\tau)$ - temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ [K]
 $T_r(\tau)$ - średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego w chwili τ [K]
 $\Theta(0,s)$ - transformata Laplace'a temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu
 $\Theta(d,s)$ - transformata Laplace'a temperatury wewnętrznej powierzchni stropodachu
 $Q(0,s)$ - transformata Laplace'a gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu
 $Q(d,s)$ - transformata Laplace'a gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni stropodachu
 $\alpha_k(\tau)$ - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję w chwili τ [W m⁻²K⁻¹]
 $\alpha_r(\tau)$ - współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie w chwili τ [W m⁻²K⁻¹]
 β - kąt pochylenia stropodachu względem poziomu [°]
 ε - współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni stropodachu
 λ - przewodność cieplna właściwa [W m⁻¹K⁻¹]
 ρ - gęstość materiału przegrody [kg m⁻³]
 σ - stała Stefana-Boltzmann [W m⁻²K⁻⁴]
 τ - czas [s]

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono model nieustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez wielowarstwowy stropodach pełny, poddany oddziaływaniu środowiska zewnętrznego i środowiska cieplnego w pomieszczeniu pod stropodachem. Szczególną uwagę zwrócono na radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego, w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego. Przeanalizowano wpływ kąta pochylenia, zorientowania względem stron świata oraz własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na jego bilans cieplny.

W części doświadczalnej pracy badano zmienność elementów środowiska zewnętrznego oraz uzyskano ilościową informację o efektach nieustalonej wymiany ciepła między stropodachem a tym środowiskiem. Zmierzone wielkości meteorologiczne posłużyły w części obliczeniowej jako dane wejściowe do sprawdzenia poprawności przyjętego modelu nieustalonego, jednokierunkowego przepływu ciepła przez stropodach wielowarstwowy z nieustalonymi warunkami brzegowymi. Ponadto przeprowadzono obliczenia modelowe /bez wykonywania pomiarów/ dla typowych stropodachów pełnych, dla których przyjęto warunki meteorologiczne zarejestrowane w części eksperymentalnej.

Stwierdzono, że przyjęty w niniejszej pracy model nieustalonej wymiany ciepła w połączeniu z metodą obliczeniową Stephensona i Mitalasa zadowalająco odzwierciedla rzeczywiste procesy cieplne zachodzące między środowiskiem zewnętrznym, stropodachem i środowiskiem cieplnym pomieszczenia pod stropodachem. Podano ilościowe wnioski dotyczące wpływu kąta pochylenia, zorientowania względem stron świata oraz własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na wielkość zysków lub strat ciepła przez stropodach w różnych porach roku.

1. WSTĘP

W ostatnich latach, z powodu zmian jakie zaszły w technice budowlanej, a przede wszystkim w wyniku szerokiego zastosowania prefabrykacji oraz nowych materiałów budowlanych, często niedostatecznie zbadanych, uwidocznił się problem właściwej ochrony cieplnej budowli. Ma on szczególne znaczenie dla pomieszczeń mieszkalnych, ze względu na utrzymanie odpowiednich warunków mikroklimatycznych oraz zapewnienie długotrwałego i bezawaryjnego użytkowania tych pomieszczeń.

Problematyka strat ciepła w budownictwie, zaostrowana w ostatnich latach sytuacją paliwowo-energetyczną, w wielu krajach stanowi przedmiot dużego zainteresowania i szczegółowych analiz /Colliver i inni [24], Jones, Hendrix [53], Kusuda [64], [65], Sonderegger [117], Van Der Bruggen [128]/. Prowadzone badania obejmują szeroki zakres problemów - od doskonalenia metod pomiaru energochłonności i strat energetycznych /Paljak, Petterson [88], Stępniewski [122], Marszałek [73] /, poprzez rozwiązania konstrukcyjne budowli /Ashton [3], Basnett [7], Siviour [114], [115]/, wyposażenie techniczne budynków, technologię wykonawstwa, eksploatację /Badot [6], Coldicutt [20]/, aż po poszukiwanie nowych źródeł energii. Prace te wykonywane są w wielu ośrodkach naukowych, z których można wymienić National Bureau of Standards w Waszyngtonie, Building Research Establishment w Wielkiej Brytanii, Federal Institute for Material Testing w Szwajcarii i inne, zaś publikacje wydawane są m.in. w ASHRAE Transaction Building and Environment, Energy and Building, Haustechnik - Bau-physic-Umwelt-technik i innych.

W stosunku do ilości publikacji z zakresu zagadnień wymienionych wyżej, niewiele jest opracowań dotyczących zewnętrznego

środowiska fizycznego, w kontekście jego oddziaływania na przegrody budowlane. Dotyczy to zwłaszcza opisu otoczenia w okresie zimowym dla którego przyjęto, że jedynym wskaźnikiem oceny cieplnej środowiska zewnętrznego jest temperatura powietrza. Dla okresu letniego obliczenia zysków ciepła przegród budowlanych od nasłonecznienia wykonywano w oparciu o tak zwaną słoneczną temperaturę powietrza, wprowadzoną w 1944 roku przez Mackey'a i Wrighta [69], [70]. Wielkość ta opisywała środowisko zewnętrzne przy działaniu promieniowania słonecznego i stosowana była dla mniej lub bardziej uproszczonych praktycznych metod obliczania zysków ciepła przez przegrody budowlane /Mielnicki [77]/. Słoneczna temperatura powietrza nie uwzględniała jednak wymiany ciepła przez promieniowanie długofalowe między zewnętrzną powierzchnią przegrody, a środowiskiem zewnętrznym - nie uwzględniała więc rzeczywistego oddziaływania środowiska.

Proces wymiany ciepła przez przegrody budowlane, oddzielające pomieszczenia użytkowane przez człowieka od klimatu zewnętrznego, jest nieustalony w czasie. Wynika to między innymi z zależności od czasu czynników klimatu zewnętrznego, określających wymianę ciepła budynku z otoczeniem /temperatura powietrza, promieniowanie słoneczne, prędkość wiatru itp./ oraz z nierównomierności pracy urządzeń ogrzewczych. Opis matematyczny procesu nieustalonej wymiany ciepła przez przegrody budowlane jest złożony i w związku z tym, w wielu zastosowaniach inżynierskich z zakresu fizyki cieplnej budowli, stosowano na ogół model ustalonego przepływu ciepła, który w sposób uproszczony opisuje proces przenikania ciepła przez przegrody budowlane. W modelu tym wpływ

cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględniony jest jedynie przez określenie współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie, będącego składnikiem całkowitego współczynnika przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody. Wartość współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie obliczono dla wyidealizowanych warunków atmosferycznych, ustalając ją na stałym poziomie.

Wielu autorów, między innymi Goldstein [40] i Pogorzelski [100], zwracało uwagę na to, że wzory opisujące jednokierunkowy ustalony przepływ ciepła przez przegrody budowlane są słuszne jedynie wówczas, gdy średnia temperatura promieniowania otoczenia jest równa temperaturze powietrza. Równość tych temperatur zachodzi bardzo rzadko i nawet w pomieszczeniach mieszkalnych różnica między temperaturami promieniowania i powietrza może wynosić kilka stopni Celsjusza. Według badań Browna i Istfálta [11], a następnie Swinbanka [123], temperatura nieboskłonu może być, dla powierzchni poziomej, przy bezchmurnym niebie w nocy, niższa od temperatury powietrza nawet o 20°C . Tak znaczne różnice między temperaturą powietrza i promieniowania otoczenia powodują często, zwłaszcza w porze nocnej przy bezchmurnym niebie, występowanie temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu niższej o kilka stopni od temperatury otaczającego powietrza, co ściśle jest związane ze znacznymi stratami ciepła przez promieniowanie /Clark, Cena [17], [18], [19]/. Występuje wówczas zjawisko tak zwanego radiacyjnego chłodzenia stropodachu /"radiative cooling"/.

Stropodach poddany jest całodobowemu oddziaływaniu środowiska zewnętrznego, interesującym wydaje się więc jaki wpływ na końco-

wy rezultat bilansu cieplnego ma uwzględnienie rzeczywistej zmienności tego środowiska, a zwłaszcza uwzględnienie jego radiacyjnego oddziaływania w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego. To, między innymi, skłoniło autora niniejszej pracy do podjęcia próby przeanalizowania tego problemu.

Stropodachy już od blisko 50-ciu lat /Houghteen i inni [48] / stanowią temat licznych opracowań z zakresu fizyki cieplnej budowli, zarówno w kraju jak i za granicą. Można tutaj wymienić prace poruszające problemy nadmiernego zawilgocenia stropodachów /Czarnowski i inni [28], Pieniążek [95], Płoński [97], Sitko, Wyrwa [113] oraz Szarejko [124] /, doboru współczynnika przenikania ciepła dla pełnych stropodachów lekkich pod kątem komfortu cieplnego wewnątrz /Czarnowski, Kuska [29] /, optymalizacji doboru wielkości otworów wentylacyjnych stropodachów dwudzielnych /Czarnowski, Hleblonek [30] /, zagadnień eksploatacyjnych stropodachów pełnych /Fuksa [34], Schild i inni [112] /, drewnianych /Cornish [25], Dinwoodie [31], McIntyre, Birch [74] / oraz stropodachów dwudzielnych na blachach fałdowych /Andersen [2] /.

Osobną grupę tematyczną stanowią opracowania dotyczące przepływu ciepła w warunkach ustalonych przez stropodachy wentylowane /Gertis [37], [38], Goldstein [40], Jerszow, Sołdatow, Kuzanow [52], Kuzanow, Sołdatow [66] i Odelski [35] / oraz przez stropodachy pełne /Burch [13], [15], Rossiter, Mathey [107], Pichowkin [94], Sodha i inni [116] /.

Inną problematyką badawczą stanowi pomiar izolacyjności cieplnej stropodachów przy użyciu urządzenia termowizyjnego umieszczonego na pokładzie samolotu /tak zwana termografia lotnicza/ - Burch [13], [19], Goldstein [40], Lawrence [67] .

Jak już wspomniano wcześniej, przy sprzyjających warunkach bezchmurnej nocy w zimie, wskutek niekorzystnego radiacyjnego oddziaływania nieboskłonu, temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza /chłodzenie radiacyjne/. Jednym z pierwszych, którzy zwrócili na to zjawisko uwagę był Cullen [27], który z początkiem lat sześćdziesiątych badał rozkłady temperatur w wybranych przekrojach różnie izolowanych stropdachów w okresie letnim i zimowym. Zauważył on, że w czasie bezchmurnych nocy w zimie, temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu obniżyła się o 11°C w stosunku do temperatury otaczającego powietrza w wyniku intensywnego wypromieniowania energii do nieboskłonu.

W 1967 roku Høglund, Mitalas i Stephenson [47] potwierdzili występowanie zjawiska radiacyjnego chłodzenia stropdachów, zwłaszcza podczas bezchmurnych nocy w zimie. Podobne wnioski wysunęli Goliński, Halupczak i Werszko [42], którzy z początkiem lat siedemdziesiątych badali wpływ promieniowania słonecznego i atmosfery na bilans cieplny wagonów kolejowych w miesiącach letnich. W wyniku intensywnego wypromieniowania energii w czasie pogodnych nocy w czerwcu i w lipcu, temperatura zewnętrznej powierzchni wagonu obniżyła się o kilka stopni w stosunku do temperatury otaczającego powietrza.

Kolejnymi autorami, którzy stwierdzili występowanie radiacyjnego chłodzenia stropdachów byli: w 1976 roku Owczarek [87], który jednak nie komentował zachodzącego zjawiska, w 1978 roku Goldstein [40], w 1979 roku Kneubühl i inni [59], [60], Płoński, Pogorzelski [98], w 1980 roku Burch [15], Nowak [83] i w 1982 roku Grzeszczyk, Nowak, Marszałek i Cena [44].

Zjawisko radiacyjnego chłodzenia stropodachów znane jest więc od prawie dwudziestu lat, przy czym jego ilościowe ujęcie możliwe jest od niedawna. Wynika to stąd, iż dopiero od kilku lat znane są metody obliczania wartości długofalowego promieniowania nieboskłonu w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego i stopnia zachmurzenia nieba /Unsworth, Monteith [126], [127], Cole [21], [22] /; dla warunków bezchmurnej nocy uczynił to Swinbank [123]. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż w Polsce żadne obserwatorium meteorologiczne nie dokonuje pomiarów wartości natężenia promieniowania nieboskłonu, ograniczając się jedynie do pomiarów związanych z promieniowaniem słonecznym. Ponadto, również od niedawna możliwe jest, dzięki zastosowaniu maszyn cyfrowych, obliczenie z dużą dokładnością nieustalonego, jednokierunkowego przenikania ciepła przez przegrody budowlane /Stephenson, Mitalas [121], Kusuda [64], [65], Sonderegger [117], Mehta, Woods [75] / w warunkach zmieniających się w czasie czynników atmosferycznych, oddziaływujących na przegrodę.

Podsumowując, można stwierdzić, że w dotychczasowych obliczeniach strat ciepła z budynków stosowano model ustalonego przepływu ciepła oraz zasadnicze założenie upraszczające, a mianowicie równość temperatur powietrza i promieniowania środowiska, co nie odpowiada rzeczywistym warunkom wymiany ciepła między budynkiem a otoczeniem. Konsekwencją stosowania modelu ustalonego przepływu ciepła było również pominięcie wpływu pojemności cieplnej przegrody budowlanej.

Celem niniejszej pracy jest analiza procesu nieustalonej wymiany ciepła między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym przy całościowym ujęciu najistotniejszych składników tej wymiany, ze szczegól-

nym uwzględnieniem wpływu promieniowania słonecznego i promieniowania nieboskłonu na bilans cieplny stropodachu.

Promieniowanie słoneczne charakteryzuje się tak zwanym przestrzennym rozkładem, to znaczy, że w danej chwili czasowej, na różnie zorientowane i nachylone pod dowolnymi kątami powierzchnie, oddziałuje inna wartość natężenia tego promieniowania. Podobnie przedstawiają się własności promieniowania nieboskłonu, przy czym orientacja powierzchni ma tutaj mniejsze znaczenie.

Innym celem pracy jest próba ilościowego określenia wpływu kąta pochylenia i orientacji względem stron świata płaszczyzny stropodachu oraz wpływu własności promiennych jego zewnętrznej powierzchni na bilans cieplny.

Zasadnicze tezy niniejszej pracy są następujące:

1. Promieniowanie długofalowe środowiska zewnętrznego znacząco wpływa na bilans cieplny stropodachu.
2. Odpowiedni dobór kąta pochylenia płaszczyzny stropodachu i jej zorientowania względem stron świata oraz dobór własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu może ograniczyć niekorzystne efekty cieplne w postaci nadmiernych zysków ciepła od nasłonecznienia latem oraz strat ciepła zimą.

2. TEORIA

2.1. Radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na stropodachy

2.1.1. Promieniowanie słoneczne

W czasie przenikania przez atmosferę, promieniowanie Słońca ulega stopniowemu osłabieniu wskutek selektywnego i nieselektywnego pochłaniania oraz rozpraszania promieni słonecznych przez gazy atmosferyczne, aerozol, przez kropelki wody i kryształki lodu w chmurach oraz przez zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Powoduje to, że natężenie promieniowania bezpośredniego, dociera — jącego do powierzchni Ziemi, jest znacznie mniejsze od stałej słonecznej $/1360 \text{ W m}^{-2}/$. Zmienia się też skład widmowy promieniowania; promienie o różnej długości fali są bowiem w atmosferze niejednakowo pochłaniane i rozpraszane.

Pomiary promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi dokonywane są zazwyczaj w płaszczyźnie poziomej, do której dociera zarówno promieniowanie bezpośrednie I_{DH} z kierunku od Słońca, jak i promieniowanie rozproszone I_{dH} , które nie ma określonego kierunku, gdyż dociera ono z całego sklepienia niebieskiego.

Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego wyraża się wzorem:

$$I_{TH} = I_{DH} + I_{dH} = I_{DN} \sin \alpha + I_{dH} , \quad (2.1)$$

gdzie:

I_{TH} - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnię poziomą, $[\text{W m}^{-2}]$,



I_{DH} - natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego, padającego na płaszczyznę poziomą, $[W m^{-2}]$,

I_{dH} - natężenie rozproszonego /dyfuzyjnego/ promieniowania słonecznego, padającego na płaszczyznę poziomą, $[W m^{-2}]$,

I_{DN} - natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego w kierunku normalnej do powierzchni, $[W m^{-2}]$,

α - wzniesienie Słońca, $[^{\circ}]$.

Oslabienie /estynkcję/ bezpośredniego promieniowania słonecznego w atmosferze można, w sposób uproszczony, opisać wzorem /Nowicki [84], Molga [81], Jones [53] /:

$$I_{DN} = I_0 D^{pm}, \quad (2.2)$$

gdzie:

I_0 - stała słoneczna, $[W m^{-2}]$,

D - przepuszczalność atmosfery idealnej, $[-]$,

m - długość optycznej drogi promieniowania, $[-]$,

p - współczynnik zamglenia atmosfery, $[-]$.

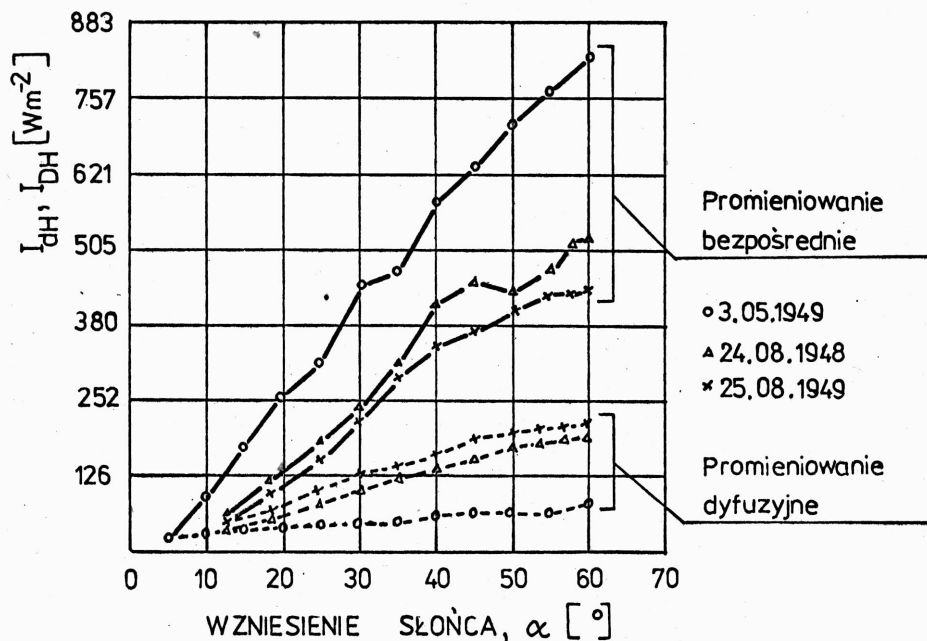
Długość drogi optycznej m zmienia się wraz ze zmianą wysokości położenia Słońca. W przybliżeniu wartość tego współczynnika oblicza się ze wzoru:

$$m = 1/\sin\alpha. \quad (2.3)$$

Dokładne pomiary wykazały, że wartość współczynnika m zmienia się od $m=1$ dla $\alpha=90^{\circ}$ do $m=38,24$ dla $\alpha=0^{\circ}$ /Hrgian [49] /. Wartość współczynnika zamglenia p jest ściśle związana z zanieczyszczeniem powietrza w danej miejscowości, które z kolei zmienia

się w poszczególnych porach roku. Współczynnik p przyjmuje wartości od $6 \div 8$ dla terenów przemysłowych do $2 \div 2,5$ dla terenów górskich /Nowicki [84] /.

Całkowite promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię Ziemi I_{TH} , przy zupełnym braku chmur, można obliczyć na podstawie analizy modelu atmosfery lub w oparciu o tabele wielkości atmosferycznych. Wartości składowych I_{DH} i I_{dH} zależą od wzniesienia Słońca oraz od warunków rozpraszania i pochłaniania promieni słonecznych w atmosferze. Przykład zmian wielkości I_{DH} i I_{dH} w funkcji kąta wzniesienia Słońca dla różnego stopnia przezroczystości atmosfery przedstawiono na rysunku 2.1. Stopień przezroczystości atmosfery definiuje się jako stosunek obserwowanego w danej chwili natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego w kierunku wiązki promieni do wartości tego promieniowania dla standardowej atmosfery dla tego samego kąta wzniesienia Słońca /Parmelee [92] /.



Rys. 2.1. Typowe zmiany wartości natężenia bezpośredniego I_{DH} i rozproszonego I_{dH} promieniowania słonecznego, padającego na płaszczyznę poziomą w warunkach bezchmurnego nieba, dla różnych stopni przezroczystości atmosfery.

Natężenia całkowitego promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu oblicza się ze wzoru:

$$I_{T\beta} = I_{DN} \cos\Theta + I_d, \quad (2.4)$$

gdzie:

- I_{DN} - natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego, padającego na płaszczyznę normalną do kierunku promieni słonecznych, obliczone z zależności 2.2, $[W m^{-2}]$,
- I_d - natężenie rozproszonego promieniowania słonecznego, padającego na daną płaszczyznę, $[W m^{-2}]$,
- Θ - kąt między normalną do powierzchni a kierunkiem promieni słonecznych, $[^\circ]$.

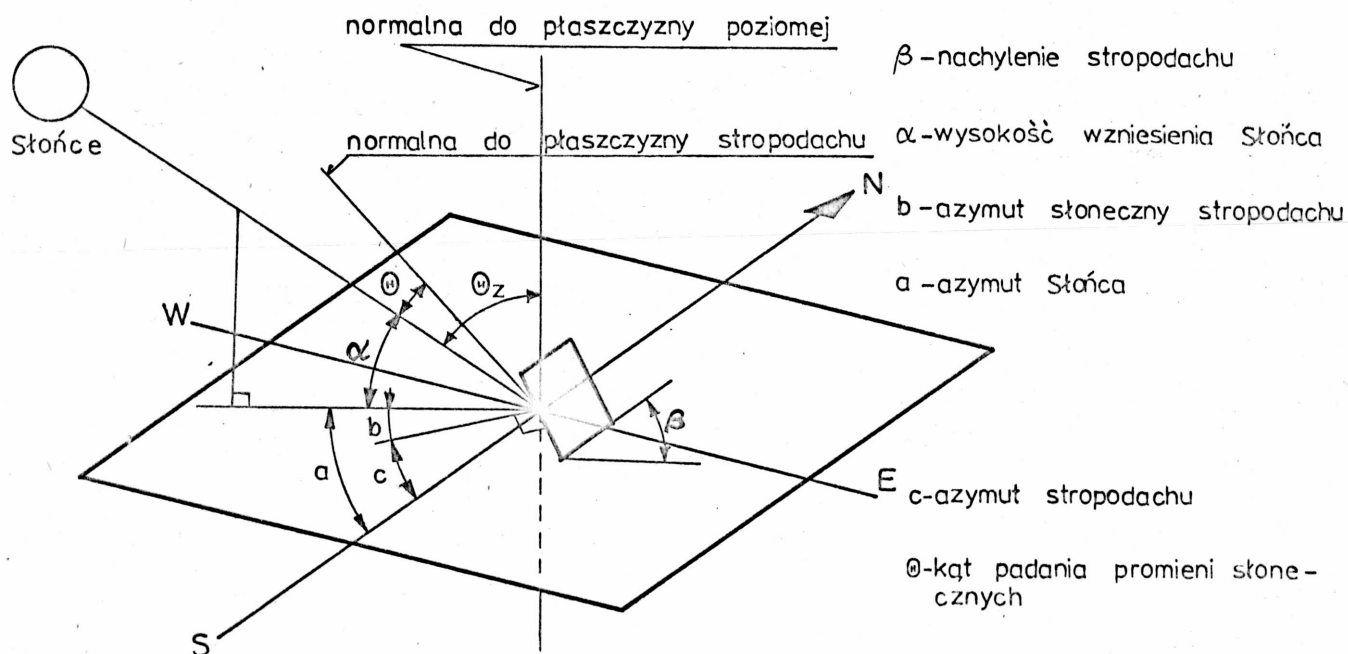
Podanie wyrażenia pozwalającego obliczyć wartość $\cos\Theta$ wymaga zdefiniowania innych kątów, określających położenie nachylonej pod kątem β przegrody w odniesieniu do Słońca oraz zorientowanie przegrody względem stron świata. Zależności kątowe pokazano na rysunku 2.2.

Kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na dowolną płaszczyznę, nachyloną do horyzontu pod kątem β , można obliczyć z zależności /Duffie, Beckmann [32] /:

$$\begin{aligned} \cos\Theta = & \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma + \\ & + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \\ & + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega, \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdzie:

- β - kąt pochylenia płaszczyzny względem poziomu,
- φ - szerokość geograficzna,
- ω - kąt przesunięcia godzinowego /przesunięcie kątowe Słońca w stosunku do położenia w południe/,



Rys. 2.2. Oznaczenie podstawowych kątów, opisujących położenie przegrody nachylonej pod kątem β , w odniesieniu do bezpośredniego promieniowania słonecznego.

δ - deklinacja Słońca /kątowe przesunięcie Słońca w stosunku do płaszczyzny równika Ziemi/, oblicza się ze wzoru:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right), \quad (2.6)$$

gdzie n jest kolejnym dniem roku.

Dla powierzchni poziomej / $\beta = 0$, $\gamma = 0$ / wzór (2.5) można zapisać:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega = \sin \alpha \quad (2.7)$$

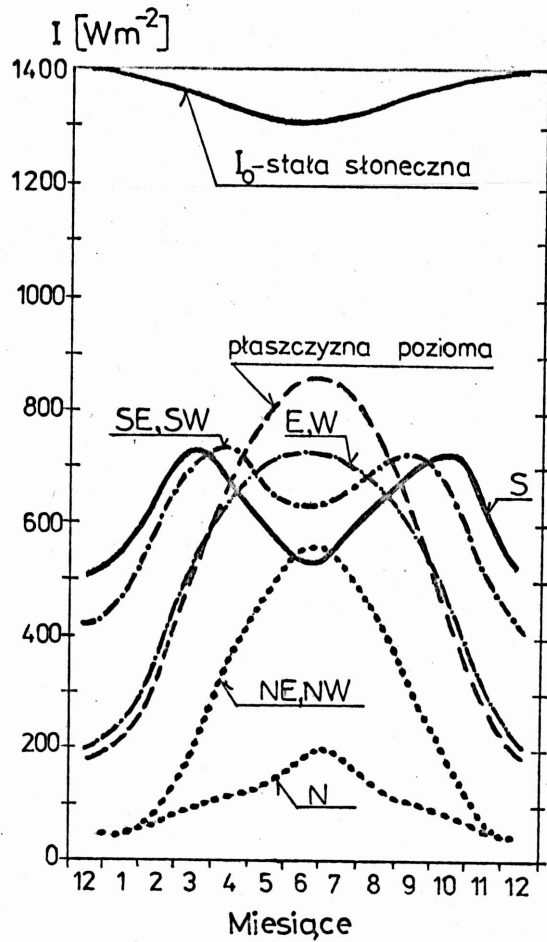
gdzie α jest wzniesieniem Słońca. Sposób obliczania wielkości I_d we wzorze (2.4) podają Coulson [26], Jones [54], Kimura [58], Paltridge, Platt [89].

Na rysunku 2.3 przedstawiono wykresy szczytowych wielkości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnię poziomą I_{TH} i różnie zorientowane powierzchnie pionowe I_{TV} dla 52° szerokości północnej /Malicki [71] /. Dla porównania naniesiono również zmianę wartości stałej słonecznej /Duffie, Beckmann [32] /.

Różna orientacja powierzchni względem stron świata pozostaje w ścisłym związku z natężeniem promieniowania słonecznego, dochodzącego do tej powierzchni w różnych miesiącach roku. Maksimum wartości natężenia padającego promieniowania słonecznego jest osiągana w innej porze dnia i roku dla dwóch powierzchni o innej orientacji.

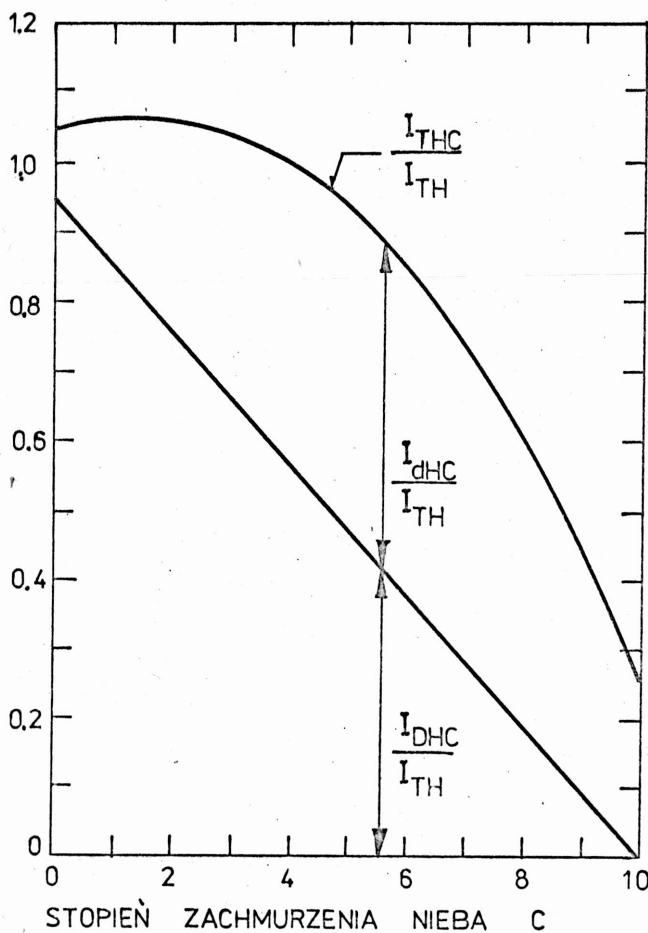
Na rys. 2.3 można także zauważyć, że maksymalne wartości natężenia promieniowania słonecznego dla kierunków S, E, W, SE, SW kształtują się na tym samym poziomie, chociaż są one znacznie przesunięte w czasie. Maksimum natężenia promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnie poziome występuje w lipcu i wartość jego jest większa niż dla pozostałych powierzchni. W związku z tym, wszystkie obiekty przykryte stropodachem, a nie wyposażone w naturalne przewietrzanie poddasza, są narażone na duże zyski ciepła od nasłonecznienia.

Istotnym elementem osłabiającym intensywność bezpośredniego promieniowania słonecznego są chmury. Na rysunku 2.4 pokazano zmianę natężenia bezpośredniego I_{DHC} i rozproszonego promieniowania słonecznego I_{dHC} /a więc całkowitego I_{THC} / w dziesięciostopniowej skali stopnia zachmurzenia nieba /0 - niebo czyste, 10 - niebo całkowicie zachmurzone/, /Kimura, Stephenson [57] /.



Rys. 2.3. Maksymalne wielkości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego, w poszczególnych miesiącach, dla 52° szerokości geograficznej północnej.

Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego przy niewielkim zachmurzeniu $/C \leq 3/$ może być nieco wyższe niż w przypadku zupełnie czystego nieba, podczas gdy natężenie promieniowania bezpośredniego zmniejsza się. Dzieje się tak wskutek silnego rozproszenia promieniowania słonecznego w górnych warstwach atmosfery.



I_{TH} - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę poziomą przy bezchmurnym niebie

I_{THC} - jak wyżej, przy niebie zachmurzonym

I_{DHC} - natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę poziomą przy niebie zachmurzonym

I_{DHC} - jak wyżej, ale dyfuzyjnego promieniowania słonecznego

Rys. 2.4. Zmiana natężenia bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego w funkcji stopnia zachmurzenia nieba.

Przy niebie zupełnie zachmurzonym $/C=10/$ strumień promieniowania słonecznego, który pada na powierzchnię Ziemi, jest całkowicie rozproszony.

Ilościowy opis wpływu zachmurzenia na wartość całkowitego promieniowania słonecznego jest o wiele bardziej złożony niż w wypadku nieba bezchmurnego. Opis ten podają między innymi Coulson [26], Jones [54], Kimura [58], Paltridge, Platt [89] oraz Sayigh [11]. Oprócz wymienionych autorów, zagadnienia związane z promieniowaniem słonecznym i jego oddziaływaniem na atmosferę,

Ziemię oraz przegrody budowlane, przedstawiają również, Battan [8] , Brinkworth [10] , Duffie, Beckmann [32] , Hrgian [49] , oraz Sowell [118] .

2.1.2. Promieniowanie nieboskłonu, gruntu i otaczających obiektów

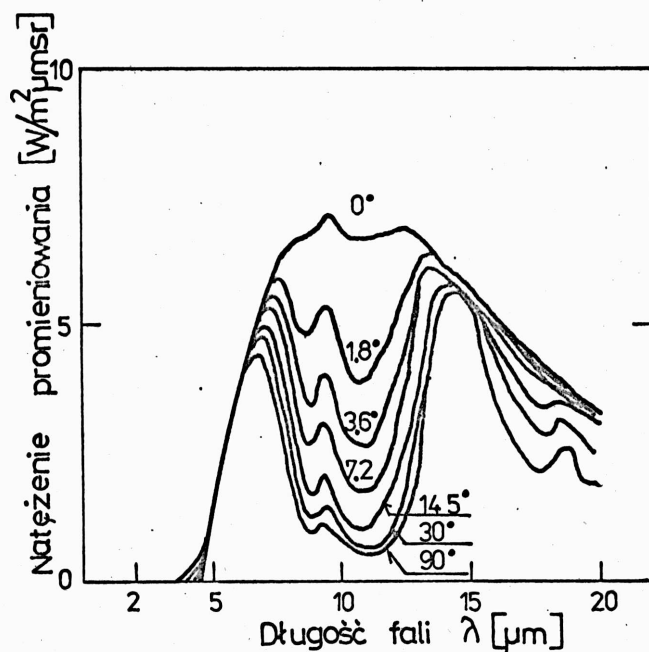
Na skutek pochłaniania promieniowania Ziemi i części promieniowania słonecznego oraz otrzymywania ciepła dzięki turbulencyjnemu mieszaniu się powietrza i kondensacji pary wodnej zawartej w powietrzu, atmosfera ogrzewa się, stając się wtórnym źródłem promieniowania w zakresie długości fal od $3,0 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$ /Kneubühl i inni [59] , [60] , Monteith [82] /. Przeważająca część promieniowania atmosfery dociera do powierzchni Ziemi, reszta natomiast uchodzi w przestrzeń międzyplanetarną. Przenoszenie promieniowania w atmosferze jest złożone, zjawisko to opisują jedynie teorie przybliżone /Kopcewicz [62] , Hrgian [49] /.

Energia promieniowania atmosfery, docierająca do powierzchni Ziemi, jest sumą energii emitowanej przez najniższe warstwy atmosfery i energii przechodzącej przez nie, a pochodzącej od warstw wyższych. Większość promieniowania długofalowego nieboskłonu, dochodzącego do powierzchni Ziemi, pochodzi od warstw powietrza leżących powyżej kilkuset metrów nad powierzchnią Ziemi.

Natężenie promieniowania 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 to jest emitowane. Dwie ostat-

nie zależności ilustruje rys. 2.5 /Kälin, Kneubühl [56] , Sala [110] /.

Atmosfera najintensywniej promieniuje z kierunku nad horyzontem /dochodzi tutaj wpływ promieniowania gruntu/, zaś najslabiej w zenicie, zwłaszcza w zakresie długości fal między $8\text{ }\mu\text{m}$ a $14\text{ }\mu\text{m}$ /rys. 2.5/. W tym zakresie widma, w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, atmosfera ziemską jest prawie zupełnie przepuszczalną dla promieniowania długofalowego, emitowanego przez powierzchnię poziomą, zaś poza tym zakresem można ją traktować praktycznie jako nieprzepuszczalną dla tego promieniowania /Cole [23] /.



Rys. 2.5. Promieniowanie jasnego nieba nocą w funkcji długości fali promieniowania dla różnych kątów wzniesienia nad horyzontem

Widmo absorpcyjne atmosfery jest więc nieciągłe, zaś obszar, dla którego jest ona prawie przezroczysta /zakres od $8\text{ }\mu\text{m}$ do $14\text{ }\mu\text{m}$ /, zwany jest "oknem atmosferycznym" /Cole [23] , Kneubühl i inni [59] , [60] , Paltridge, Platt [89] /.

Wartość natężenia promieniowania atmosfery oblicza się ze wzorów empirycznych, wyprowadzonych na podstawie statystycznych zależności między mierzonym promieniowaniem a innymi czynnikami atmosferycznymi, którymi najczęściej są temperatura powietrza T_e i ciśnienie pary wodnej e . Dla bezchmurnego nieba wprowadza się tak zwaną pozorną emisyjność atmosfery E_o definiowaną jako stosunek wartości dochodzącego promieniowania atmosfery R_o do promieniowania ciała doskonale czarnego, którego temperatura jest równa temperaturze otaczającego powietrza T_e . Brunt [12] wykazał, że pozorną emisyjność bezchmurnego nieboskłonu opisuje wyrażenie:

$$E_o = R_o / (\sigma T_e^4) = a + b\sqrt{e}, \quad (2.8.)$$

gdzie:

- R_o - natężenie promieniowania bezchmurnego nieboskłonu, $[W\ m^{-2}]$,
- T_e - temperatura powietrza, $[K]$,
- σ - stała Stefana-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W\ m^{-2}K^{-4}]$,
- e - ciśnienie pary wodnej $[mm\ Hg]$,
- a, b - współczynniki empiryczne, wyznaczona na podstawie licznych badań meteorologicznych; według Brunta [12] $a=0,52$, $b=0,076$

Z równania (2.8) wynika, że gdy $e=0$, stosunek $R_o / (\sigma T_e^4)$ wynosi około 0,5 czyli, że powietrze suche promieniuje w przybliżeniu dwa razy mniej energii niż ciało doskonale czarne o tej samej temperaturze. Podczas bezchmurnej nocy suche powietrze atmosferyczne emituje minimalną ilość promieniowania, co zostało nazwane efektem "zimnego nieba" /Burch [13],[15] /.

W ciągu ostatniego dwudziestolecia pojawiło się szereg opracowań, w których autorzy podali empiryczną zależność wartości natężenia promieniowania nieboskłonu R_0 , w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, jedynie od temperatury powietrza, czyniąc te wzory bardziej uniwersalnymi w zastosowaniach. Spośród licznych zależności, najczęściej cytowane są trzy:

wzór Swinbanka [123]

$$R_0 = 5,31 \times 10^{-13} T_e^6, \quad (2.9)$$

wzór Idso i Jacksona [50]

$$R_0 = 5 T_e^4 \left[1 - 0,261 \exp(-7,77 \times 10^{-4} (273 - T_e)^2) \right], \quad (2.10)$$

wzór Unswortha i Monteitha [126]

$$R_0 = 4,94 t_e + 222, \quad (2.11)$$

w których T_e jest temperaturą powietrza w [K], zaś t_e w [°C].

Chmury o gęstości, wystarczającej dla tworzenia cienia na powierzchni Ziemi, emitują promieniowanie jak ciała 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 promieniowaniem chmur w paśmie od 8 μm do 14 μm , to znaczy w tym paśmie, w którym cząstki gazów nie emitują prawie żadnego promieniowania. Chmury zamykają "okno atmosferyczne" wpływając na zmniejszenie radiacyjnych strat ciepła powierzchni Ziemi i przegród budowlanych, a zwłaszcza stropodachów.

Wpływ różnego rodzaju chmur na procesy radiacyjne w atmosferze jest złożony, niektóre z ważniejszych problemów tego zagadnienia omawiają: Cole [21] , [22] , Kimura [58] , Monteith, Unsworth [126] , Monteith [82] , Paltridge, Platt [89] .

Spośród kilku zależności opisujących promieniowanie atmosfery przy obecności chmur, najczęściej /Cole [22] / stosowany jest wzór Unswortha i Monteitha [126] , który opisuje dochodzące promieniowanie atmosfery jako funkcję temperatury powietrza t_e i współczynnika zachmurzenia nieba c :

$$R_A = R_O (1-c) + R_{AC} \cdot c , \quad (2.12)$$

gdzie:

- R_A - natężenie promieniowania atmosfery na powierzchnię poziomą, przy niebie częściowo zachmurzonym, $[W m^{-2}]$,
- R_O - natężenie promieniowania atmosfery, przy braku chmur, na płaszczyznę poziomą, obliczane ze wzoru (2.11) , $[W m^{-2}]$,
- R_{AC} - natężenie promieniowania atmosfery na powierzchnię poziomą przy całkowitym zachmurzeniu, $[W m^{-2}]$,
- c - współczynnik zachmurzenia nieba, $c=0$ dla nieba bezchmurnego, $c=1$ dla nieba całkowicie zachmurzonego.

Wielkość R_{AC} oblicza się ze wzoru, /Cole [22] /:

$$R_{AC} = 6,33t_e + 287 \quad (2.13)$$

Podstawiając do równania (2.11) wyrażenia (2.10) i (2.12) można otrzymać:

$$R_A = R_O + (65 + 1,39t_e) c \quad (2.14)$$

Wzory od (2.9) do (2.14) pozwalają obliczyć natężenie promieniowania atmosfery, padającego z półsfery na płaszczyznę poziomą, w całym widmie promieniowania długofalowego.

Do powierzchni nachylonej pod kątem β do poziomu, dochodzi promieniowanie nieboskłonu $R_{A\beta}$ oraz promieniowanie gruntu $R_{G\beta}$, co można wyrazić wzorem:

$$R_{\beta} = R_{A\beta} + R_{G\beta} \quad (2.15)$$

Wraz ze wzrostem kąta β maleje wartość dochodzącego promieniowania atmosfery, wzrasta zaś udział promieniowania gruntu i obiektów otaczających, by osiągnąć maksimum dla $\beta = 90^\circ$. Do powierzchni pionowej /do ściany/ dochodzi połowa promieniowania nieboskłonu $R_{A\beta}$ w stosunku do ilości jaka w tym samym czasie dociera do powierzchni poziomej /do stropodachu/. Sumaryczny efekt cieplny w postaci całkowitego promieniowania długofalowego R_{β} jest jednak większy dla powierzchni pionowej, ze względu na znaczny udział promieniowania gruntu i obiektów otaczających.

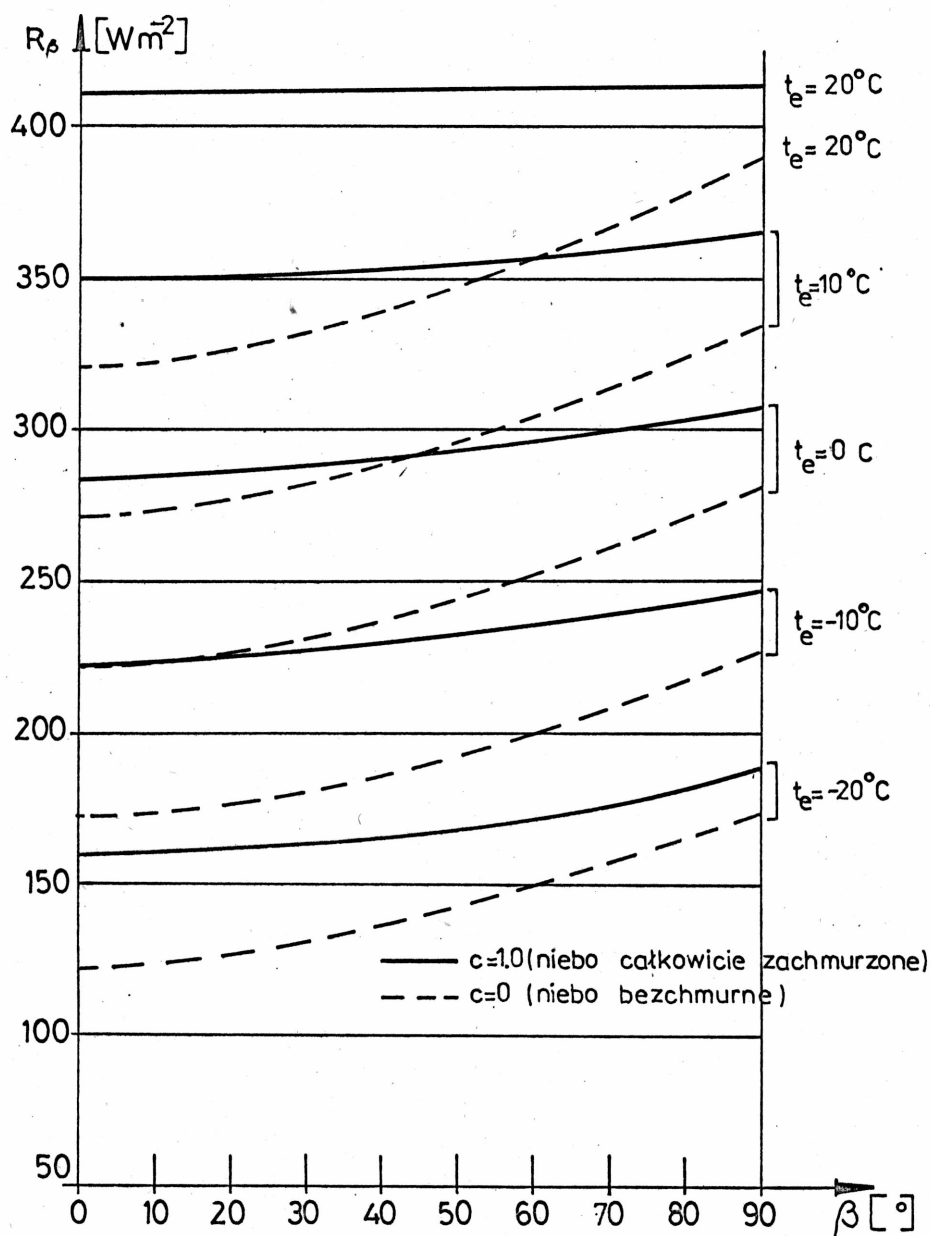
Składniki równania (2.15) oblicza się ze wzorów:

$$R_{A\beta} = R_A \cdot K_1 + K_3 \cdot b \cdot \sigma \cdot T_e^4 \quad (2.16)$$

$$R_{G\beta} = E_g \cdot \sigma \cdot T_g^4 \sin^2(\beta/2) \quad (2.17)$$

w których K_1 , K_3 są współczynnikami uwzględniającymi kąt pochylenia powierzchni, b jest współczynnikiem odzwierciedlającym wpływ zachmurzenia nieba, zaś E_g i T_g oznaczają odpowiednio emisyjność i temperaturę powierzchni gruntu. Wartości współczynników K_1 , K_3 , b oraz sposób obliczania wartości $R_{G\beta}$ podaje Cole [22].

Na rysunku 2.6 przedstawiono wartości natężenia promieniowania długofalowego otoczenia /obliczonego według (2.15) /, dochodzącego do powierzchni nachylonej pod kątem β / $\beta=0 \div 90^\circ$ /, dla różnych temperatur powietrza, dla czystego / $c=0$ / i zupełnie zachmurzonego nieba / $c=1$ /.



Rys. 2.6. Natężenie długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego, dochodzącego do nachylonej powierzchni, dla czystego i całkowicie zachmurzonego nieba. Wartości obliczono z równania (2.15).

Dla bezchmurnego nieba, natężenie całkowitego promieniowania długofalowego jest w zenicie od 20 do 30% mniejsze niż na horyzoncie, co związane jest ze zwiększonym udziałem promieniowania gruntu. Przy niebie całkowicie zachmurzonym różnice między tymi wielkościami są znacznie mniejsze.

2.2. Model jednokierunkowego, nieustalonego przepływu ciepła przez stropodach wielowarstwowy w warunkach asymetrii pola promieniowania środowiska zewnętrznego

2.2.1. Założenia modelu matematycznego

Przedmiotem analizy w niniejszej pracy jest proces nieustalonej wymiany ciepła między stropodachem a otaczającym go środowiskiem zewnętrznym i środowiskiem cieplnym w pomieszczeniu pod stropodachem. Wymiana ciepła 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 przepływu ciepła, przy założeniach stałości współczynników φ , c_p , λ oraz braku wewnętrznych źródeł ciepła, jest postaci:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

gdzie:

τ - czas, [s] ,

x - współrzędna /w układzie kartezjańskim/ normalna względem powierzchni przegrody, określająca położenie punktu, [m] ,

$T(x, \tau)$ - zależność funkcyjna temperatury od położenia punktu i czasu,

λ - przewodność cieplna właściwa, [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] ,

c_p - ciepło właściwe, [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$] ,

ρ - gęstość materiału, [kg m^{-3}] ,

Stałość współczynników λ , ρ , c_p jest konsekwencją przyjęcia założenia niezmienności w czasie tych wielkości, w zakresie temperatur spotykanych w budownictwie mieszkaniowym oraz założenia jednorodności i izotropowości materiału przegrody. Założenie jednowymiarowości pola temperatur przyjmuje się w większości problemów rozwiązywanych dla potrzeb fizyki budowli. Przestaje ono wystarczać przy ocenie własności cieplnych przegród budowlanych w tak zwanych punktach osobliwych /naroża i mostki termiczne/.

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.

W rozpatrywanym problemie przewodzenie ciepła odbywa się przez stropodach wielowarstwowy. Przyjęto następujące założenia, dotyczące stropodachu:

- modelem strukturalnym stropodachu jest nieprzeźroczysta płyta równoległościenna, złożona z warstw o stałych grubościach,
- poszczególne warstwy są wykonane z różnych, ale jednorodnych i izotropowych materiałów,

- własności fizyczne λ , ρ , c_p dla każdej warstwy są stałe,
- stropodach nie zawiera wentylowanej pustki powietrznej /rozpatruje się stropodach pełny/.

Modelem przewodzenia ciepła przez stropodach wielowarstwowy, uwzględniającym powyższe założenia, jest układ liniowych równań różniczkowych (2.19), złożony z równań postaci (2.18), określonych dla każdej warstwy stropodachu.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_{p1}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} & \text{dla } 0 \leq x \leq d_1 \\ \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_{p2}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} & \text{dla } d_1 \leq x \leq d_1 + d_2 \\ &\vdots & \\ \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_n}{\rho_n c_{pn}} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} & \text{dla } \sum_{k=1}^{n-1} d_k \leq x \leq \sum_{k=1}^n d_k \end{aligned} \quad (2.19)$$

gdzie:

$d_k, c_{pk}, \rho_k, \lambda_k$ — odpowiednio: grubość, ciepło właściwe, gęstość materiału, przewodność cieplna właściwa dla warstwy k ,

n — ilość warstw stropodachu

Na granicach styku między warstwami obowiązuje warunek brzegowy czwartego rodzaju, zakładający równość temperatur i gęstości strumieni cieplnych na brzegu wspólnym dla dwóch warstw.

Powierzchnie graniczne stropodachu /powierzchnia zewnętrzna oraz powierzchnia od strony pomieszczenia/ wymieniają ciepło z otaczającym ośrodkiem przez konwekcję i przez promieniowanie. Przyjęto następujące założenia dotyczące wymiany ciepła przez promieniowanie i przez konwekcję:

- przejmowanie ciepła przez promieniowanie obejmuje:
 - a/ promieniowanie słoneczne /w zakresie długości fal od $0,3 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$ /,
 - b/ promieniowanie nieboskłonu, gruntu i obiektów otaczających /w zakresie długości fal od $3,0 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$ /,
 - c/ promieniowanie powierzchni granicznych stropodachu /w zakresie długości fal od $3,0 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$ /,
 - d/ promieniowanie od pomieszczenia pod stropodachem /w zakresie długości fal od $3,0 \mu\text{m}$ do $50 \mu\text{m}$ /.
- emisja i pochłanianie promieniowania odbywają się na powierzchniach granicznych stropodachu,
- powierzchnie graniczne stropodachu mają jednorodne własności promienne, to znaczy stałe wartości współczynników emisyjności, absorpcyjności oraz refleksyjności /odbicia/.
- promieniowanie emitowane i odbijane przez powierzchnie graniczne stropodachu spełnia prawo Lamberta,
- energia pochłonięta przez stropodach zamienia się w ciepło w sposób całkowity, bez strat spowodowanych zmianami chemicznymi lub molekularnymi,
- średnia wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję α_k jest, w danej chwili czasowej, jednakowa na całej powierzchni granicznej stropodachu.

Za warunek brzegowy, opisujący sposób wymiany ciepła na powierzchni granicznej układu stropodach-środowisko zewnętrzne, przyjęto warunek pierwszego rodzaju, to znaczy warunek Dirichleta. Sformułowanie tego warunku oznacza podanie rozkładu temperatury na powierzchni granicznej w danej chwili czasowej, to znaczy:

$$T(0, \tau) = f(\tau) \quad , \text{ dla } \tau \geq 0 \quad (2.20)$$

Sposób wymiany ciepła na powierzchni granicznej układu stropodach-pomieszczenie określono warunkiem brzegowym trzeciego rodzaju, który oznacza, że wymiana ciepła na tej powierzchni odbywa się według prawa Newtona, to znaczy:

$$-\lambda_n \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=d} = \alpha_k(\tau) [T_i(\tau) - T(x, \tau)] + \alpha_r(\tau) [T_r(\tau) - T(x, \tau)] \bigg|_{x=d} \quad (2.21)$$

gdzie:

- λ_n - przewodność cieplna właściwa dla warstwy od strony pomieszczenia, $[Wm^{-1}K^{-1}]$,
- $\alpha_k(\tau)$ - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję w chwili τ , $[Wm^{-2}K^{-1}]$,
- $\alpha_r(\tau)$ - współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie w chwili τ , $[Wm^{-1}K^{-1}]$,
- $T_i(\tau)$ - temperatura powietrza w pomieszczeniu w chwili τ , $[K]$,
- $T_r(\tau)$ - średnia temperatura promieniowania w pomieszczeniu w chwili τ , $[K]$,
- $T(x, \tau) \big|_{x=d}$ - temperatura na powierzchni granicznej w chwili τ , $[K]$.

Sformułowanie tego warunku polega na podaniu rozkładu współczynników α_k i α_r oraz temperatur T_i i T_r w dowolnej chwili czasowej.

Dla jednoznaczności rozwiązania postawionego problemu należy określić warunek początkowy, to znaczy podać rozkład temperatury w rozpatrywanym obszarze w chwili czasowej $\tau = 0$. Przyjęto, że w chwili czasowej $\tau = 0$ 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 stropodachu oraz zmieniających się w czasie współczynników α_k i α_r , a także temperatur T_i i T_r , opisujących sposób wymiany ciepła na powierzchni stropodachu od strony pomieszczenia. Wprowadzenie nieustalonych warunków brzegowych znacznie utrudnia rozwiązywanie zagadnień przewodzenia ciepła.

Jedną z metod rozwiązywania zagadnień nieustalonego przepływu ciepła jest metoda operatorowa, wykorzystująca przekształcenie Laplace'a. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych omawiają liczne opracowania /Mielnicki, Żydanowicz [79], Osiowski [86], Pipes [96], Pogorzelski [100], Wiśniewski [130] /.

Stosując transformację Laplace'a do rozwiązywania zagadnienia jednokierunkowego, nieustalonego przepływu ciepła przez wielowarstwowy stropodach można otrzymać, w drodze przekształceń, równanie macierzowe, które wiąże transformaty Laplace'a temperatury i gęstości strumienia ciepła na jednej powierzchni granicznej stropodachu

z transformatami Laplace'a tych wielkości na drugiej powierzchni granicznej. Równanie to jest postaci:

$$\begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ Q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta(d,s) \\ Q(d,s) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

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 stropodachu,

$\Theta(d,s), Q(d,s)$ - transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni stropodachu,

$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ - macierz transmisji dla stropodachu /transmission matrix - Pipes [96] , Stephenson, Mitalas [12] /.

Macierz transmisji dla stropodachu wielowarstwowego jest iloczynem macierzy transmisji dla poszczególnych warstw, to znaczy

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

przy czym macierz transmisji dla warstwy k jest postaci

$$\begin{bmatrix} A_k(s) & B_k(s) \\ C_k(s) & D_k(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_k) & Z_k \sinh(\gamma_k) \\ \frac{\sinh(\gamma_k)}{Z_k} & \cosh(\gamma_k) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

gdzie:

$$\gamma_k = d_k \sqrt{\frac{c_{pk} \rho_k s}{\lambda_k}} \quad (2.25)$$

$$Z_k = \sqrt{\frac{1}{\lambda_k c_{pk} g_k s}} \quad (2.25)$$

Z uwagi na to, że wymianę ciepła na powierzchni granicznej układu stropodach-pomieszczenie określono za pomocą warunku brzegowego trzeciego rodzaju, równanie macierzowe (2.22) przyjmie postać:

$$\begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ Q(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

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 R_i , zwanym oporem przejmowania ciepła.

Dla potrzeb analiz, przeprowadzonych w niniejszej pracy, wymagana jest znajomość rozkładu temperatur i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych stropodachu. Nie zachodzi więc konieczność określania pola temperatury w całym obszarze zmienności współrzędnej x ($0 \leq x \leq d$).

W pracy zastosowano do obliczeń metodę pozwalającą wyznaczyć, w oparciu o równanie macierzowe (2.27), rozkład temperatur i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych stropodachu dla przypadku nieustalonych warunków brzegowych /rozdział 3/.

2.2.2. Lokalny bilans ciepła przenikającego przez stropodach

W każdej chwili czasowej τ dla zewnętrznej powierzchni stropodachu zachodzi równowaga cieplna opisana równaniem /Kneubühl i inni [60] /:

$$q_s(\tau) + q_l(\tau) + q_o(\tau) = q_k(\tau) + q_r(\tau) \quad (2.28)$$

gdzie:

- $q_s(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego absorbowanego w chwili τ , $[W m^{-2}]$,
- $q_l(\tau)$ - natężenie długofalowego promieniowania nieboskłonu absorbowanego w chwili τ , $[W m^{-2}]$,
- $q_o(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła przewodzonego przy zewnętrznej powierzchni stropodachu 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 zewnętrzną powierzchnię stropodachu w chwili τ , $[W m^{-2}]$,

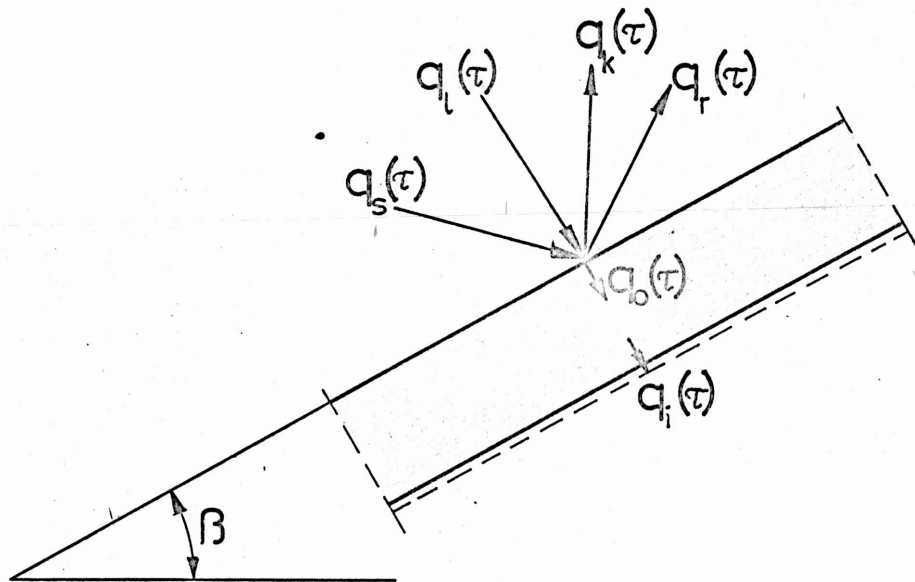
Składniki bilansu cieplnego dla zewnętrznej powierzchni stropodachu, nachylonego pod kątem β do poziomu, zilustrowano na rysunku 2.7.

Poszczególne elementy równania (2.28) oblicza się z następujących zależności:

$$q_s(\tau) = \alpha_s I_{\tau\beta}(\tau) \quad (2.29)$$

gdzie:

- α_s - współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni stropodachu dla promieniowania słonecznego,
- $I_{\tau\beta}(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego w chwili τ , obliczone ze wzoru (2.4), $[W m^{-2}]$,



Rys. 2.7. Składniki bilansu cieplnego dla zewnętrznej powierzchni stropodachu; $q_i(\tau)$ jest gęstością strumienia ciepła przewodzonego przy wewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ , $[W m^{-2}]$, pozostałe składniki zgodnie z opisem do równania (2.23).

$$q_l(\tau) = \varepsilon R_p(\tau) \quad (2.30)$$

gdzie:

ε - współczynnik emisyjności powierzchni,

$R_p(\tau)$ - natężenie długofalowego promieniowania nieboskłonu, docierającego do stropodachu w chwili τ , obliczone ze wzoru (2.15), $[W m^{-2}]$,

$$q_k(\tau) = \alpha_k(\tau) [T_{os}(\tau) - T_e(\tau)] \quad (2.31)$$

gdzie:

$T_{os}(\tau)$ - temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ , $[K]$,

$T_e(\tau)$ - temperatura otaczającego powietrza w chwili τ , [K],

$\alpha_k(\tau)$ - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję w chwili τ , [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$], obliczamy ze wzoru /Duffie, Beckmann [32] /:

$$\alpha_k(\tau) = 5,7 + 3,8v(\tau) \quad (2.32)$$

gdzie:

$v(\tau)$ - jest prędkością wiatru, [m/s],

$$q_r(\tau) = \varepsilon \sigma [T_{os}(\tau)]^4 \quad (2.33)$$

gdzie:

σ - stała Stefana-Boltzmann.

Wartość gęstości strumienia ciepła $q_0(\tau)$ oblicza się według zależności (3.8) zdeterminowanej przez zastosowaną metodę obliczeniową. W niniejszej pracy obliczenia zostały przeprowadzone w oparciu o metodę Stephensona i Mitalasa, którą przedstawiono w rozdziale 3.

Równanie (2.28) można zapisać w postaci:

$$a_{T_s}(\tau) + \varepsilon R_s(\tau) + q_0(\tau) = \alpha_k(\tau) [T_{os}(\tau) - T_e(\tau)] + \varepsilon \sigma [T_{os}(\tau)]^4 \quad (2.34)$$

Równowaga cieplna zewnętrznej powierzchni stropodachu decyduje o wielkości i zwrocie strumieni składowych w danej chwili τ , a więc determinuje chwilowe zyski bądź straty ciepła. Z faktu tego oraz z postaci równania (2.34) wynika wprost wpływ wielkości a_s, ε oraz β na chwilowe efekty ilościowe wymiany ciepła między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym. Współczynnik absorpcji a_s zewnętrznej powierzchni stropodachu decyduje

o ilości promieniowania słonecznego pochłanianego przez tę powierzchnię w danej chwili czasowej. Wartość współczynnika emisyjności

ε tej powierzchni warunkuje wielkość różnicy między promieniowaniem nieboskłonu, gruntu i obiektów otaczających a promieniowaniem emitowanym przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu /tak zwane różnicowe promieniowanie długofalowe/. Wartość natężenia promieniowania środowiska zewnętrznego, docierającego do zewnętrznej powierzchni stropodachu, nachylonego pod kątem β , jest funkcją tego kąta oraz orientacji stropodachu względem stron świata /rozdział 2.1/. Reasumując, zmiana radiacyjnych własności zewnętrznej powierzchni stropodachu α_s, ε , kąta pochylenia stropodachu β lub położenia płaszczyzny stropodachu względem stron świata prowadzi bezpośrednio do zmiany chwilowych wartości gęstości strumieni ciepłych z równania (2.34), co w konsekwencji wpływa na całkowite efekty ilościowe wymiany ciepła między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym.

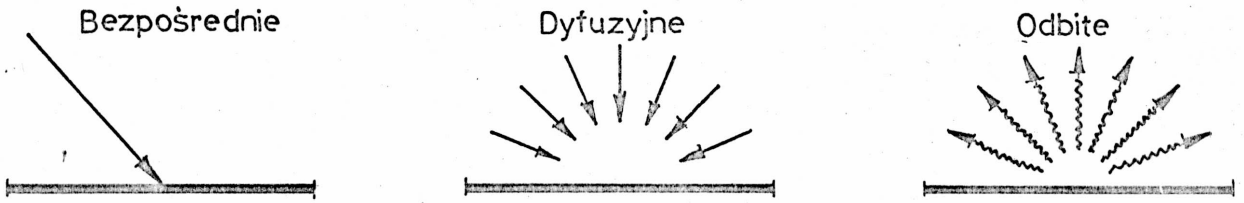
2.2.3. Selektywne własności radiacyjne zewnętrznej powierzchni stropodachu.

W radiacyjnej wymianie ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu biorą udział: bezpośrednie /kierunkowe/ i rozproszone promieniowanie słoneczne, długofalowe promieniowanie nieboskłonu /z całej półsfery/ oraz promieniowanie emitowane przez powierzchnię stropodachu. Strumienie radiacyjne na zewnętrznej powierzchni stropodachu przedstawiono na rysunku 2.8.

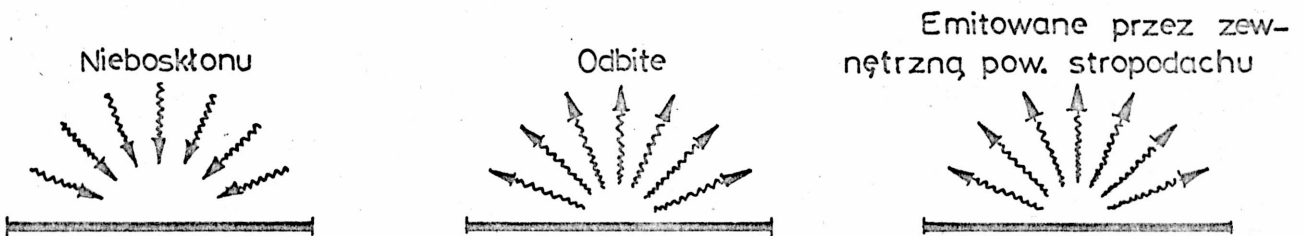
W odniesieniu do bezpośredniego promieniowania słonecznego $I_{D\beta}$ /zakres długości fal od $0,3 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$ /, stanowiącego zasad-

nicze źródło zysków ciepła od nasłonecznienia, zewnętrzną powierzchnię stropodachu charakteryzuje tak zwana kierunkowa absorpcyjność panchromatyczna a_s /Sala [110] /. Definiuje się ją jako

PROMIENIOWANIE SŁONECZNE



PROMIENIOWANIE DŁUGOFALOWE



Rys. 2.8. Główne strumienie radiacyjne, wpływające na procesy cieplne na zewnętrznej powierzchni stropodachu.

stosunek mocy promienistej zaabsorbowanej z kierunku φ do normalnej n do całkowitej mocy promienistej, padającej pod kątem φ do normalnej n dla rozważanej powierzchni:

$$a_{s\varphi} = \frac{\Phi_{a\varphi}}{\Phi} \quad (2.35)$$

gdzie:

$\Phi_{a\varphi}$ - całkowita moc promienista zaabsorbowana z kierunku φ w stosunku do normalnej n do powierzchni,

Φ_{φ} - całkowita moc promienista padająca pod kątem φ do normalnej n do powierzchni.

W stosunku do długofalowego promieniowania nieboskłonu /zakres długości fal od 3,0 μm do 50,0 μm /, padającego z całej półsfery, zewnętrzną powierzchnię stropodachu opisuje tak zwana półsferyczna absorpcyjność panchromatyczna a wyrażona wzorem:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (2.36)$$

gdzie:

- Φ_a - panchromatyczna moc promienista zaabsorbowana z całej półsfery,
- Φ - panchromatyczna moc promienista, padająca na daną powierzchnię z całej półsfery.

Wartości Φ_{ap} , Φ_p oraz Φ_a i Φ obliczane są z zależności, które podają między innymi Sala [110], Staniszewski [120], Wiśniewski [130].

Zgodnie z prawem Kirchoffa, dla ciał szarych przy tej samej temperaturze, półsferyczna absorpcyjność panchromatyczna jest równa półsferycznej emisyjności panchromatycznej, co można zapisać:

$$\alpha = \epsilon \quad (2.37)$$

gdzie:

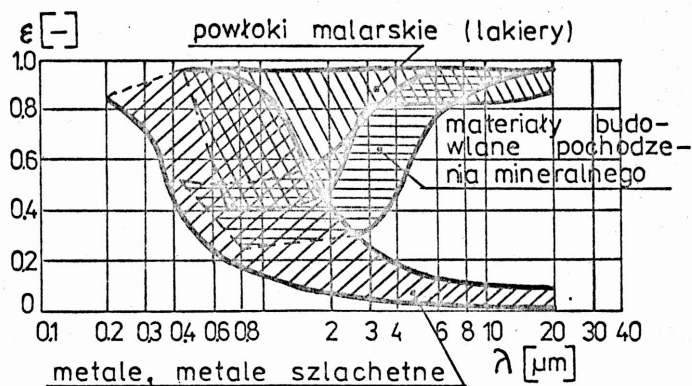
ϵ - półsferyczna emisyjność panchromatyczna

Współczynnik ϵ charakteryzuje własności emisyjne powierzchni; jego wartość, dla różnych materiałów, jest najczęściej podawana w tablicach /Sala [110], Staniszewski [120], Wiśniewski [130] /.

Z powyższych uwag wynika, że dla zewnętrznej powierzchni stropodachu najistotniejszymi własnościami radiacyjnymi są kierunkowa absorpcyjność panchromatyczna α_g /ze względu na zasad-

nicze zyski ciepła od bezpośredniego kierunkowego promieniowania słonecznego/ oraz półsferyczna emisyjność panchromatyczna /ze względu na emisję i absorpcję ($\epsilon = a$) promieniowania długofalowego/. Wielkości te w dalszej części pracy będą nazywane: współczynnikiem absorpcji a_s dla promieniowania krótkofalowego i współczynnikiem emisyjności ϵ . Współczynniki te odnoszą się do różnych zakresów widma promieniowania temperaturowego / a_s - dla długości fal od 0,3 μm do 3,0 μm , zaś ϵ - dla długości fal od 3,0 μm do 50,0 μm / i decydują o selektywnych własnościach radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu.

Wartość współczynnika absorpcji a_s dla promieniowania słonecznego jest funkcją długości fali w całym zakresie widma tego promieniowania oraz funkcją kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego. Z kolei wartość współczynnika emisyjności ϵ zmienia się wraz ze zmianą długości fali w zakresie widma promieniowania długofalowego. Wielkości a_s i ϵ są charakterystyczne dla danej grupy materiałów. Natomiast charakterystyki radiacyjne powierzchni są różne dla różnych grup materiałowych. Ilustruje to rysunek 2.9.

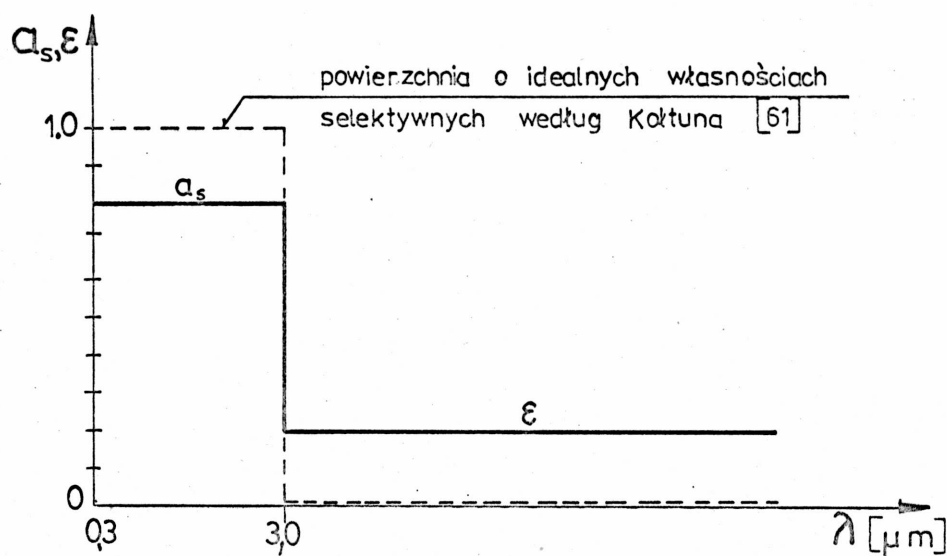


Rys. 2.9. Zmiana wartości współczynników a_s i ϵ dla różnych grup materiałów /Gertis, Erhorn [39] /.

W obliczeniach przyjmuje się najczęściej stałą wartość współczynnika a_s w całym zakresie długości fal promieniowania słonecznego oraz stałą wartość współczynnika ε w zakresie promieniowania długofalowego /Duffie, Beckmann [32], Kołtun [61] /.

Wynika to z trudności w uwzględnianiu zmian wartości tych współczynników w funkcji długości fali w odpowiadających im zakresach widma promieniowania termicznego. Dowolną powierzchnię, dla której przyjęto stałe wartości współczynników a_s i ε , nazywa się również "półszarą" /Duffie, Beckmann [32] /, ponieważ można ją rozpatrywać jako szarą w zakresie widma promieniowania słonecznego i jako szarą w zakresie widma promieniowania długofalowego.

Na rysunku 2.10 przedstawiono przykładową charakterystykę radiacyjną powierzchni.



Rys. 2.10. Selektywne własności radiacyjne dla idealnej i dowolnej powierzchni ciała.

Miarą selektywnych własności radiacyjnych danej powierzchni jest współczynnik selektywności opisany równaniem /Duffie, Beckmann [32], Kołtun [61] /:

$$n = a_s / \varepsilon \quad (2.38)$$

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

3. METODA OBLICZENIOWA

Wprowadzenie nieustalonych warunków brzegowych do modelu nieustalonego przepływu ciepła przez przegrodę budowlaną znacznie utrudnia rozwiązanie zagadnienia. Stosunkowo łatwo i we względnie prostej postaci otrzymuje się rozwiązania przy harmonicznym zmianach warunków brzegowych; trudniej przy ich skokowych zmianach, a gdy warunki brzegowe zmieniają się według dowolnej funkcji, znane są jedynie nieliczne rozwiązania.

Jedną z metod rozwiązywania problemu nieustalonego przewodzenia ciepła z nieustalonymi warunkami brzegowymi jest metoda oparta na twierdzeniu Duhamela /Pogorzelski [101], Wiśniewski [130] /. Metoda ta ma tę zaletę, że pozwala otrzymać rozwiązanie zagadnienia z nieustalonymi warunkami brzegowymi na podstawie rozwiązania odpowiedniego zagadnienia z ustalonymi warunkami brzegowymi. Metoda oparta na twierdzeniu Duhamela może być zastosowana do zagadnień z dowolnym początkowym rozkładem temperatury i do przypadków, gdy temperatura powierzchni przegrody lub otaczającego powietrza zmienia się w czasie, a nawet w różnych miejscach powierzchni przegrody. Twierdzenie Duhamela, sformułowane w 1933 r., podaje się współcześnie przeważnie w postaci: rozwiązanie równania przewodzenia ciepła w obszarze, którego temperatura brzegu, temperatura otaczającego ośrodka lub gęstość strumienia cieplnego na powierzchni jest daną funkcją czasu $\Phi(\tau)$, stanowi funkcja

$$t(x, y, z, \tau) = \int_0^{\tau} \Phi(\nu) \frac{\partial}{\partial \tau} F(x, y, z, \tau - \nu) d\nu \quad (3.1)$$

gdzie $F(x, y, z, \tau)$ jest rozwiązaniem dla ustalonych warunków brzegowych, a warunek początkowy dla obu zadań jest jednakowy o postaci $t(x, y, z, 0) = F(x, y, z, 0) = 0$. Mimo pozornej prostoty, znajdowanie rozwiązań przy nieustalonych warunkach brzegowych w oparciu o twierdzenie Duhamela, przez analityczne obliczanie całki postaci (3.1), nie jest wcale łatwe i efektywne. Jedną z funkcji podcałkowych, będącą rozwiązaniem dla ustalonych warunków brzegowych, jest dana przeważnie w postaci szeregu nieskończonego, co wymaga całkowania wyraz po wyrazie. Niejednokrotnie otrzymywane całki są nowymi funkcjami specjalnymi. Jednocześnie funkcja $\Phi(\tau)$, reprezentująca np. temperaturę powietrza zewnętrznego jest dana najczęściej w postaci histogramu, a jako wynik końcowy interesuje nas też wartość liczbowa. Zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła z nieustalonymi warunkami brzegowymi komplikuje się jeszcze bardziej, gdy rozpatrywane są przegrody wielowarstwowe.

W niniejszej pracy zastosowano do obliczeń metodę impulsowej funkcji przeniesienia, zaproponowaną przez Stephensona i Mitalasa w 1971 roku [121]. Metoda ta została opracowana do obliczania nieustalonego przewodzenia ciepła przez przegrody budowlane wielowarstwowe, przy założeniu nieustalonych warunków brzegowych. Pozwala ona na dokonywanie obliczeń z uwzględnieniem rzeczywistej zmienności środowiska zewnętrznego /zmienność według dowolnej funkcji czasu/. Metoda stwarza także możliwość uwzględnienia zmienności współczynników przejmowania ciepła w funkcji temperatury powierzchni, temperatury otaczającego powietrza lub warunków wietrznych, 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 $\mathcal{Z}$ dyskretnej funkcji $f(n\Delta)$ nazywa się następujące wyrażenie

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(n\Delta) z^{-n} \quad (3.2)$$

przy czym z jest zespolonym operatorem przekształcenia.

W literaturze /między innymi Jury [55], Osiowski [86] /zamieszczono 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 dyskretnej jest to, że współczynniki wielomianu, którym się transformata wyraża /wzór (3.2) /, są wartościami danej funkcji dyskretnej 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 przeniesienia /pulse transfer function/, zwana również transmitancją impulsową. Impulsowa funkcja przeniesienia jest definiowana jako stosunek transformaty odpowiedzi układu do transformaty $\mathcal{Z}$ wymuszenia układu. Układ stanowi

tu przegroda budowlana /stropodach/, natomiast wymuszenie lub odpowiedź, w zależności od przyjętych warunków brzegowych, stanowi temperatura powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej, gęstość strumienia ciepła przy powierzchni zewnętrznej lub wewnętrznej przegrody. Jeżeli przez $O(z)$ oznaczmy transformatę $\mathcal{Z}$ odpowiedzi układu a przez $I(z)$ transformatę $\mathcal{Z}$ wymuszenia, to z definicji impulsowej funkcji przeniesienia wynika, że

$$O(z) = K(z) \cdot I(z) \quad (3.3)$$

gdzie $K(z)$ jest impulsową funkcją przeniesienia.

Transmitancję impulsową można zapisać w postaci ilorazu wielomianów

$$K(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_j z^{-j}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_p z^{-p}} \quad (3.4)$$

Po uwzględnieniu (3.3) i (3.4) zachodzi

$$O(z) \cdot D(z) = I(z) \cdot N(z) \quad (3.5)$$

Dokonując transformacji odwrotnej równania (3.5), otrzymujemy odpowiedź układu w chwili dyskretnej $\tau = m\Delta$ postaci

$$O(m\Delta) = \frac{1}{b_0} \left\{ a_0 I(m\Delta) + a_1 I[(m-1)\Delta] + \dots + a_j I[(m-j)\Delta] - \right. \\ \left. - b_1 O[(m-1)\Delta] - b_2 O[(m-2)\Delta] - \dots - b_p O[(m-p)\Delta] \right\} \quad (3.6)$$

Znajomość impulsowej funkcji przeniesienia układu oraz transformaty $\mathcal{Z}$ wymuszenia pozwala więc na wyznaczenie odpowiedzi układu.

Transmitancja impulsowa zatem syntetycznie określa własności dynamiczne układu. Przegrodę budowlaną traktuje się jako układ dynamiczny o dwóch wejściach i dwóch wyjściach. Stąd jej własności dynamiczne opisuje macierz impulsowych funkcji przeniesienia, a nie jedna funkcja /dla układu z jednym wejściem i jednym wyjściem/.

Metoda Stephensona i Mitalasa polega na znalezieniu macierzy impulsowych funkcji przeniesienia dla przegrody budowlanej wielowarstwowej w oparciu o znaną dla przegrody macierz transmisji /rozdział 2.2.1/. Macierz impulsowych funkcji przeniesienia oraz warunki graniczne pozwalają wyznaczyć poszukiwane rozkłady temperatur lub gęstości strumieni ciepła na powierzchniach granicznych przegrody.

Z zależności (3.4) wynika, że aby jednoznacznie określić transmitancję impulsową układu wystarczy wyznaczyć współczynniki wielomianów licznika $a_0, a_1, \dots, a_j$ oraz mianownika $b_0, b_1, \dots, b_p$. Wartości tych współczynników oblicza się w oparciu o znaną dla przegrody macierz transmisji, która z kolei jest funkcją własności fizycznych materiałów poszczególnych warstw. Z uwagi na przyjęte w rozdziale 2.2.1 warunki brzegowe, wyjściowe równanie macierzowe jest postaci

$$\begin{bmatrix} Q(0,s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D(s)}{B(s)} & -\frac{1}{B(s)} \\ -\frac{1}{B(s)} & -\frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ \Theta_i(s) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

gdzie:

$\Theta(0,s)$, $Q(0,s)$ - transformaty Laplace'a, odpowiednio, temperatury i gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu,

$\Theta_i(s)$ - transformata Laplace'a temperatury powietrza w pomieszczeniu

$Q_i(s)$ - transformata Laplace'a gęstości strumienia ciepła od strony pomieszczenia.

Występująca w równaniu (3.7) macierz kwadratowa jest wyjściową macierzą transmisji do wyznaczania współczynników wielomianów impulsowych funkcji przeniesienia 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 przeniesienia dla przegrody budowlanej wyznacza się tylko raz. Natomiast odpowiedź przegrody oblicza się już z prostych zależności uwarunkowanych jedynie postacią wymuszenia.

Gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach granicznych stropodachu, według metody Stephensona i Mitalasa, oblicza się ze wzorów:

$$q_o(\tau) = \sum_{k=0}^j a_k T_{os}(\tau-k) - \sum_{k=0}^j c_k T_i(\tau-k) - \sum_{l=1}^p b_l q_o(\tau-l) \quad (3.8)$$

$$q_i(\tau) = \sum_{k=0}^j c_k T_{os}(\tau-k) - \sum_{k=0}^j d_k T_i(\tau-k) - \sum_{l=1}^p b_l q_i(\tau-l) \quad (3.9)$$

gdzie:

$q_o(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ ,

$q_i(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła przy wewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili τ ,

$T_{os}(\tau-k)$ - temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu w chwili $\tau - k$, $k=0, 1, \dots, j$,

$T(\tau-k)$ - temperatura powietrza w pomieszczeniu pod stropodachem w chwili $\tau-k$,
 $k=0,1,\dots,j$,

a_k, c_k, d_k, b_l - współczynniki odpowiednich impulsowych funkcji przeniesienia $/k=0,1,\dots,j$;
 $b=1,2,\dots,p/$.

Poniżej przedstawiono sposób obliczania wartości współczynników impulsowej funkcji przeniesienia, będącej odpowiednikiem operatorowej funkcji przeniesienia $\frac{A(s)}{B(s)}$ /jeden z elementów macierzy transmisji z równania (3.7)/.

W pierwszym etapie obliczeń wyznacza się wartości współczynników mianownika $b_0, b_1, \dots, b_p$.

W obliczeniach zakłada się, że wymuszenie układu /temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody i temperatura powietrza w pomieszczeniu/ jest zadawane w postaci ciągu wartości funkcji w dyskretnych chwilach czasowych, odległych od siebie o stały czas

Δ . Pomędzy dyskretnymi wartościami funkcji wejściowej stosuje się aproksymację liniową. Taka aproksymacja funkcji ciągłej jest tym lepsza, im mniejszy zastosowano przedział czasu Δ . Autorzy metody polecają przyjęcie $\Delta = 1$ godzina, co zapewnia wystarczającą dokładność obliczeń.

Transformata Laplace'a odpowiedzi układu, przy danym wymuszeniu oraz danej operatorowej funkcji przeniesienia $\frac{A(s)}{B(s)}$ jest postaci $\frac{A(s)}{s^2 B(s)}$. Taka funkcja może wyrażona w postaci sumy

$$\frac{A(s)}{s^2 B(s)} = \frac{c_0}{s^2} + \frac{c_1}{s} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d_n}{s + \beta_n}, \quad (3.10)$$

gdzie $s = -\beta_n$ są pierwiastkami równania $B(s) = 0$, a występujące w równaniu współczynniki $c_0, c_1, d_1, d_2, \dots$ oblicza się następująco

$$c_0 = \left[\frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=0} \quad (3.11)$$

$$c_1 = \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{A(s)}{B(s)} \right) \right]_{s=0} \quad (3.12)$$

$$d_n = \left[\frac{A(s)}{s^2 \frac{d}{ds} B(s)} \right]_{s=-\beta_n} \quad (3.13)$$

Dokonując transformacji $\mathcal{Z}$ równania (3.10) otrzymuje się

$$O(z) = \frac{c_0}{z(1-z^{-1})^2} + \frac{c_1}{1-z^{-1}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d_n}{1-e^{-\beta_n \Delta} z^{-1}} \quad (3.14)$$

gdzie:

- $O(z)$ - transformata $\mathcal{Z}$ odpowiedzi układu,
- Δ - stały przedział czasu przyjęty do dyskretyzacji wymuszenia układu.

Gdy wszystkie wyrazy prawej strony równania (3.14) zsumuje się, to mianownik sumy jest postaci

$$z(1-z^{-1})^2 \prod_{n=1}^{\infty} (1-e^{-\beta_n \Delta} z^{-1})$$

Na podstawie równania (3.3) oraz w związku z tym, że $z(1-z^{-1})^2$ jest mianownikiem transformaty $\mathcal{Z}$ wejścia liniowego, mianownik impulsowej funkcji przeniesienia wyraża się następująco

$$D(z) = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-\beta_n \Delta} z^{-1}) \quad (3.15)$$

Po wykonaniu mnożenia po prawej stronie równania (3.15) otrzymuje się wielomian zmiennej z . Współczynniki tego wielomianu są szukanymi współczynnikami mianownika impulsowej funkcji przeniesienia. Ponieważ wszystkie β_n są dodatnie, więc współczynniki wielomianu maleją ze wzrostem n . Stąd wyznacza się skończoną ilość współczynników i wyznacza się ich tyle, na ile pozwala przyjęta dokładność obliczeń.

Wszystkie operatorowe funkcje przeniesienia z wyjściowej macierzy transmisji /równanie (3.7)/ mają ten sam mianownik. Impulsowe funkcje przeniesienia, będące ich odpowiednikami, będą więc miały identyczne współczynniki mianownika. Współczynniki licznika natomiast należy wyznaczyć dla każdej funkcji oddzielnie. Sposób postępowania przedstawiono poniżej.

Dokonując w wyrażeniu (3.4) podstawienia $z = e^{i\omega \Delta}$, otrzymuje się w płaszczyźnie zespolonej odpowiadającą (3.4) dyskretną charakterystykę amplitudowo-fazową /przedstawiona w płaszczyźnie zespolonej impulsowa transmitancja widmowa, która opisuje charakter odpowiedzi układu na wymuszenia harmoniczne o pulsacji ω ,

Friedly [33] /. Nieznane współczynniki licznika impulsowej funkcji przeniesienia wyznacza się tak, aby otrzymana dyskretna charakterystyka amplitudowo-fazowa możliwie mało różniła się od ciągłej charakterystyki amplitudowo-fazowej /przedstawiona w płaszczyźnie

zespolonej transmitancja widmowa, stanowiąca operatorową funkcję przeniesienia dla $s=i\omega$ /. Obie charakterystyki powinny się pokrywać dla wybranych pulsacji ω wymuszenia. Największą zbieżność charakterystyk uzyskuje się przy przyjęciu $\omega = \pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2, 4, \pi/2$ rad/h, Dla wybranych pulsacji spełniony jest warunek

$$\left[\frac{N(z)}{D(z)} \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} = \left[\frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=i\omega} \quad (3.16)$$

stąd

$$\left[N(z) \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} = \left[D(z) \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} \cdot \left[\frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=i\omega} \quad (3.17)$$

Lewą stronę równania (3.17) można zapisać

$$\left[N(z) \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} = a_0 + a_1 \cos \omega\Delta + a_2 \cos 2\omega\Delta + \dots - i \left[a_1 \sin \omega\Delta + a_2 \sin 2\omega\Delta + \dots \right] \quad (3.18)$$

Z kolei

$$\left[D(z) \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} = U(\omega) - i V(\omega) \quad (3.19)$$

gdzie:

$$U(\omega) = 1 + b_1 \cos \omega\Delta + b_2 \cos 2\omega\Delta + \dots \quad (3.20)$$

$$V(\omega) = b_1 \sin \omega\Delta + b_2 \sin 2\omega\Delta + \dots \quad (3.21)$$

natomiast

$$\left[\frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=i\omega} = F(\omega) + i G(\omega) \quad (3.22)$$

$$\left[N(z) \right]_{z=e^{i\omega\Delta}} = X(\omega) - i \cdot Y(\omega) \quad (3.23)$$

Na podstawie (3.17), (3.19), (3.22) i (3.23) otrzymuje się

$$X(\omega) = U(\omega) \cdot F(\omega) + V(\omega) \cdot G(\omega) \quad (3.24)$$

$$Y(\omega) = V(\omega) \cdot F(\omega) - U(\omega) \cdot G(\omega) \quad (3.25)$$

Porównanie części rzeczywistych i urojonych z równań (3.18) i (3.23) dla wybranych pulsacji ω prowadzi do równania macierzowego

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 \cos \omega_1 \Delta & \cos 2 \omega_1 \Delta & \dots & \cos j \omega_1 \Delta \\ 0 \sin \omega_1 \Delta & \sin 2 \omega_1 \Delta & & \sin j \omega_1 \Delta \\ 1 \cos \omega_2 \Delta & \cos 2 \omega_2 \Delta & & \cos j \omega_2 \Delta \\ 0 \sin \omega_2 \Delta & \sin 2 \omega_2 \Delta & & \sin j \omega_2 \Delta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \vdots \\ a_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(\omega_1) \\ Y(\omega_1) \\ X(\omega_2) \\ Y(\omega_2) \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Wartości współczynników licznika $a_0, a_1, \dots, a_j$ impulsowej funkcji przeniesienia wyznacza się z równania (3.26) poprzez pomnożenie macierzy kolumnowej z prawej strony równania przez odwróconą macierz kwadratową z lewej strony równania.

Wyznaczone w ten sposób impulsowe funkcje przeniesienia przegrody umożliwiają wyznaczenie odpowiedzi przegrody na dowolne wymuszenia.

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

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_o(s) & B_o(s) \\ C_o(s) & D_o(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Punktem wyjścia przy wyznaczaniu temperatury i gęstości strumienia w płaszczyźnie przekroju jest następujące równanie macierzowe

$$\begin{bmatrix} \Theta^*(s) \\ Q^*(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_i(s)}{B(s)} & \frac{B_o(s)}{B(s)} \\ \frac{D_i(s)}{B(s)} & \frac{A_o(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta(0,s) \\ \Theta_i(s) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

gdzie:

$\Theta^*(s)$, $Q^*(s)$ - 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 powierzchni zewnętrznej przegrody i temperatury powietrza w pomieszczeniu.

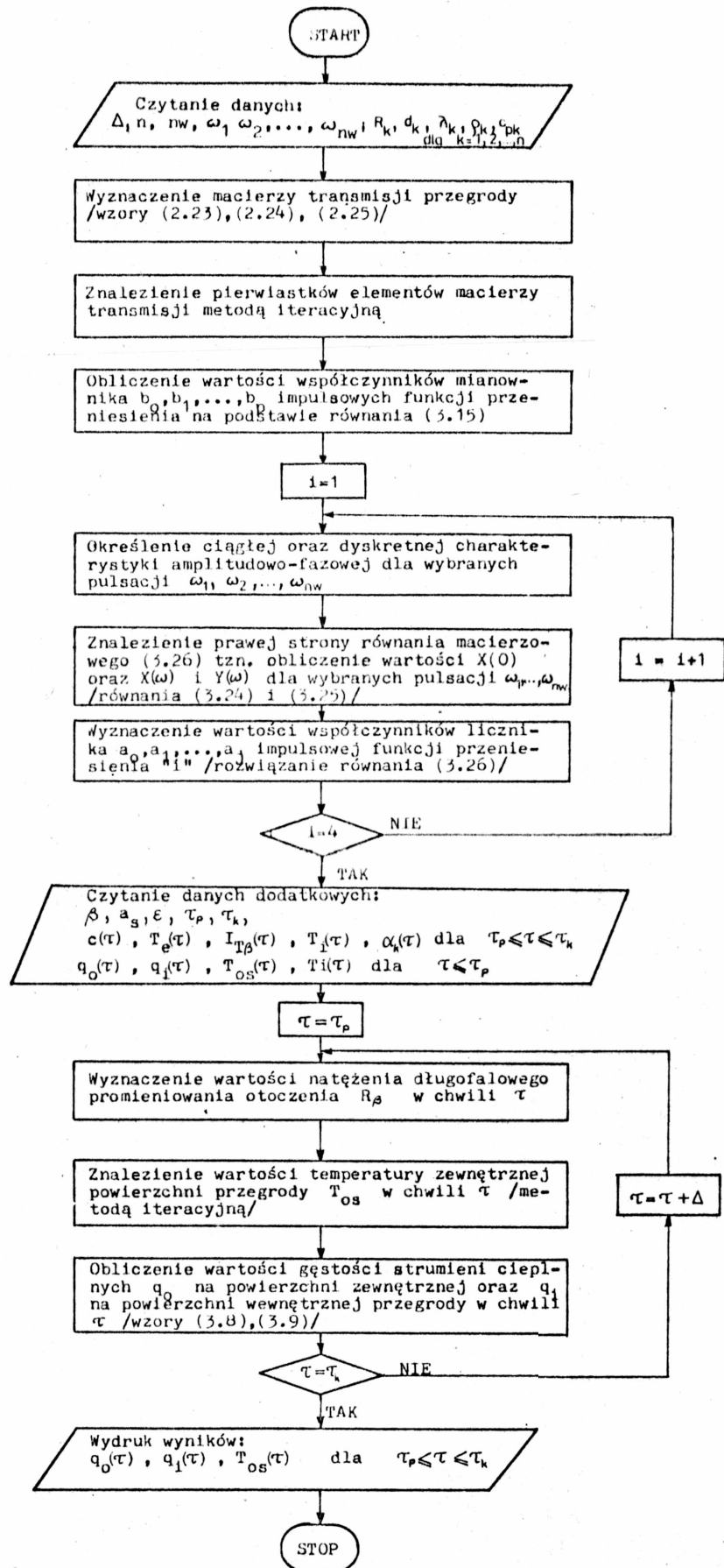
4. CHARAKTERYSTYKA PROGRAMÓW OBLICZENIOWYCH

Obliczenia w niniejszej pracy wykonano przy pomocy dwóch programów numerycznych. Pierwszy z programów, opracowany w języku FORTRAN IV, realizowano na maszynie cyfrowej RIAD-32 o dużej pojemności pamięci, natomiast drugi - opracowany w języku FORTRAN realizowano na maszynie ODRA-1325 pod systemem GEORGE-3. Ogólny schemat blokowy do obu programów przedstawiono na rysunku 4.1.

Trzon obliczeń wykonywany był na maszynie cyfrowej RIAD-32. Maszyna ta realizowała zaprogramowany algorytm Stephensona i Mitallasa, który w oparciu o własności fizyczne poszczególnych warstw przegrody wyznacza współczynniki licznika i mianownika impulsowych funkcji przeniesienia dla tej przegrody. Czas obliczeń był uzależniony od ilości warstw przegrody. W obliczeniach wykonanych dla potrzeb niniejszej pracy czas ten nie przekroczył dwóch minut /dla pięciu warstw/.

Dane wejściowe do programu na maszynę cyfrową RIAD-32 stanowią:

- przyjęty stały przedział czasowy Δ ,
- ilość warstw przegrody n ,
- własności fizyczne poszczególnych warstw /grubość d_k , przewodność cieplna właściwa λ_k , gęstość materiału ρ_k , ciepło właściwe c_{pk} , opór cieplny pustki powietrznej w przypadku jej występowania R_k /,
- ilość wybranych pulsacji wymuszenia n_w ,
- wybrane pulsacje $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n_w}$.



Rys. 4.1. Ogólny schemat blokowy programów, które wykorzystano w części obliczeniowej niniejszej pracy.

Wielkości wyjściowe z programu realizowanego na maszynie cyfrowej RIAD-32 stanowią:

- współczynniki mianownika $b_0, b_1, \dots, b_p$ impulsowych funkcji przeniesienia dla przegrody,
- współczynniki liczników $a_0, a_1, \dots, a_j$ impulsowych funkcji przeniesienia dla przegrody.

Wielkości wyjściowe z powyższego programu stanowią dane wejściowe dla programu realizowanego na maszynie cyfrowej ODRA-1325. Program ten, w oparciu o wyznaczone współczynniki oraz dane klimatyczne, dotyczące środowiska zewnętrznego i środowiska termicznego w pomieszczeniu, wyznacza przebiegi czasowe interesujących gęstości strumieni cieplnych oraz temperatur. Dodatkowo program wylicza na bieżąco chwilowe wartości natężenia długofalowego promieniowania otoczenia $R_\beta(\tau)$ /rozdział 2.1.1./. Ponadto, dzięki zastosowaniu funkcji dyskretnych, określa się na bieżąco /metodą iteracyjną/ chwilowe wartości temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody $T_{os}(\tau)$.

Dane wejściowe do programu na maszynę cyfrową ODRA-1325 stanowią:

- współczynniki impulsowych funkcji przeniesienia dla przegrody,
- kąt pochylenia przegrody /stropodachu/ β ,
- współczynnik absorpcji dla promieniowania słonecznego a_s ,
- współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody ϵ ,
- przedział czasowy, dla którego przeprowadzane są obliczenia

$$\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$$

- stopień zachmurzenia nieba $c(\tau)$, $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$,
- temperatura powietrza zewnętrznego $T_e(\tau)$, $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$,
- natężenie całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$,

$$\tau_p \leq \tau \leq \tau_k.$$

- temperatura powietrza w pomieszczeniu $T_i(\tau)$, $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$,
- współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję $\alpha_k(\tau)$
 $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$,
- wartości gęstości strumieni cieplnych na powierzchni zewnętrznej $q_o(\tau)$ i wewnętrznej $q_i(\tau)$ przegrody oraz wartości temperatury powierzchni zewnętrznej przegrody $T_{os}(\tau)$ i temperatury powietrza w pomieszczeniu $T_i(\tau)$, przy czym $\tau \leq \tau_p$
 /z uwagi na postać wzorów (3.8) i (3.9)/.

Wielkości wyjściowe z programu realizowanego na maszynie cyfrowej ODRA-1325 stanowią:

- gęstość strumienia ciepła na powierzchni zewnętrznej $q_o(\tau)$ i wewnętrznej $q_i(\tau)$ przegrody dla $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$,
- temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody $T_{os}(\tau)$ dla $\tau_p \leq \tau \leq \tau_k$.

5. OPIS BADAŃ

Badania składały się z części eksperymentalnej i obliczeniowej. Celem eksperymentu było zarejestrowanie zmienności elementów środowiska zewnętrznego oraz uzyskanie ilościowej informacji o efektach nieustalonej wymiany ciepła między stropodachem a tym środowiskiem. Pomierzone wielkości meteorologiczne, odzwierciedlające rzeczywistą zmienność środowiska w funkcji czasu, posłużyły w części obliczeniowej jako dane wejściowe do sprawdzenia poprawności przyjętego modelu matematycznego dla nieustalonego, jednokierunkowego przepływu ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną, poddaną oddziaływaniu środowiska zewnętrznego. Ponadto przeprowadzono obliczenia modelowe /bez wykonywania pomiarów/ dla typowych stropodachów, dla których przyjęto warunki meteorologiczne zarejestrowano w części eksperymentalnej.

Przed przystąpieniem do części eksperymentalnej przeanalizowano dane meteorologiczne dla Wrocławia z okresu dwudziestolecia 1946 - 1965, opracowano przez Kosibę [63]. Szczególną uwagę zwrócono na średnie dwudziestoletnie dobowej temperatury powietrza oraz ich absolutne ekstrema, a także na usłonecznienie względne, prędkość wiatru i zachmurzenie w przedziałach godzinnych dla pór roku, w których przewidywano pomiary. W świetle przeprowadzonej analizy, badania wykonano w takich dniach interesującej pory roku, które były dla niej reprezentatywne, to znaczy rejestrowana zmienność elementów środowiska zewnętrznego w przybliżeniu odpowiadała przeciętnej dwudziestoletniej zmienności czynników meteorologicznych dla tej pory roku.

Pomiary przeprowadzono we Wrocławiu na prawie poziomym stropodachu czterokondygnacyjnego budynku, w pobliżu którego nie znajdowały się inne wyższe obiekty, mogące ewentualnie brać udział w wymianie ciepła przez promieniowanie ze stropodachem. Nieogrzewane pomieszczenie gospodarcze bez okien, o dużej kubaturze, znajdujące się pod badaną przegrodą, charakteryzowało się dużą stabilnością temperatury powietrza wewnętrznego.

Badania objęły pomiary elementów wymiany ciepła między stropodachem, a środowiskiem zewnętrznym. Przeprowadzono je dla czterech pór roku /jesień, zima - 1980, wiosna, lato - 1981 r/ w seriach trzydniowych. W trakcie badań mierzono dobowe przebiegi wielkości charakteryzujących środowisko zewnętrzne, a więc: temperatury powietrza $t_e(\tau)$, natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ i natężenia promieniowania atmosfery $R_\beta(\tau)$ /a tym samym pośrednio temperatury radiacyjnej nieba $t_r(\tau)$ /oraz prędkości wiatru $v(\tau)$. Ponadto mierzono temperaturę $t_{is}(\tau)$ i gęstość strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na wewnętrznej oraz temperaturę $t_{os}(\tau)$ i gęstość strumienia ciepła $q_o(\tau)$ na zewnętrznej powierzchni stropodachu, a także temperaturę powietrza $t_i(\tau)$ w pomieszczeniu pod stropodachem i natężenie promieniowania różnicowego $R_n(\tau)$ między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym.

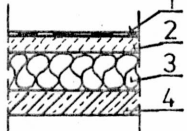
Większość mierzonych wielkości rejestrowano przy użyciu programowanego systemu komputerowego Compact Logger Solatron Schlumberger, w odstępach godzinnych.

W badaniach zajęto się również określeniem wpływu kąta pochylenia oraz zorientowania płaszczyzny stropodachu na jego bilans cieplny. W każdej serii pomiarowej mierzono zmiany natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_T(\tau)$ oraz zmiany natężenia

promieniowania atmosfery i gruntu $R_g(\tau)$, dochodzącego do nachylo-
nej pod określonym kątem i dowolnie zorientowanej płaszczyzny stro-
podachu. Pochylenie stropodachu symulowano pochyłaniem solarymetru
oraz radiometru różnicowego z przesłoną o znanej temperaturze, pod
kątem 0° , 30° , 60° i, dla porównania, pod kątem 90° . Natomiast
zorientowanie płaszczyzny stropodachu symulowano obracaniem solary-
metru i radiometru różnicowego w kierunkach poszczególnych stron
świata.

Pomiary przeprowadzono na typowym stropodachu pełnym, którego
układ poszczególnych warstw oraz ich grubość określono za pomocą
kilkku odkrywek poprzez wywiercenie otworów. Dla każdej warstwy
cechy materiałowe, to znaczy przewodność cieplną właściwą λ ,
ciepło właściwe c_p oraz gęstość materiału ρ uznano za stałe
i przyjęto z tablic /Pogorzelski [101], Wiśniewski [130]/. Dane
dotyczące stropodachu pomiarowego zestawiono w tabelicy 5.1.

Tablica 5.1. Zestawienie danych dla stropodachu pomiarowego

UKŁAD WARSTW		Grubość warstwy	Przewodność ciepła	Gęstość materiału	Ciepło właściwe	Opór cieplny właściwy
		d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kgK)]	R [m ² K/W]
	1-2xpapa na lepiku	0,005	0,17	1000,0	1460,0	0,029
	2-gładź cementowa	0,02	1,16	2100,0	840,0	0,017
	3-styropian	0,05	0,04	30,0	1460,0	1,250
	4-płyta żelbetowa	0,03	1,63	2500,0	880,0	0,018

$G=124 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \quad 1/\cdot K=0,761 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}, \quad \Sigma R = 1,314$

Dla zewnętrznej powierzchni papy wyznaczono wartość współczynnika absorpcji a_s dla promieniowania słonecznego, według metody opisanej przez Reagana i Acklama [103], $a_s = 0,92$ oraz wartość współczynnika emisyjności ε , $\varepsilon = 0,90$.

W trakcie pomiarów szacowano wielkość zachmurzenia nieba. Pomiary przeprowadzono dla suchej powierzchni stropodachu. W zimie badania wykonano na stropodachu bez pokrywy śnieżnej i bez warstwy lodu.

Opracowanie wyników pomiarów, polegające na wyznaczeniu interesujących wielkości na podstawie wielkości pomierzonych wykonano na maszynie cyfrowej ODRA 1204 /program w języku ALGOL/.

Wielkości meteorologiczne, zmierzone w części eksperymentalnej oraz informacje zawarte w tablicy 5.1. stanowiły, w części obliczeniowej badań, dane wejściowe do sprawdzenia poprawności przyjętego modelu matematycznego nieustalonego, jednokierunkowego przepływu ciepła, z nieustalonymi warunkami brzegowymi przez wielowarstwową przegrodę budowlaną. Obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej RIAD-32 /program w języku FORTRAN IV/ oraz ODRA 1305 /program w języku FORTRAN, system operacyjny GEORGE-3/, stosując metodę obliczeniową Stephensona i Mitalasa, opisaną w rozdziale 3.

Obliczenia wykonano dla każdej serii pomiarowej. Po uzyskaniu zadowalającej zgodności między obliczonymi a pomierzonymi składnikami bilansu cieplnego /komentarz w rozdziale 8.4/, przeprowadzono obliczenia dla wybranych stropodachów, bez wykonywania pomiarów doświadczalnych. Zrealizowano je dla warunków meteorologicznych, jakie występowały w badaniach na stropodachu pomiarowym w styczniu i

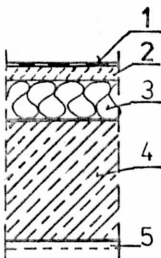
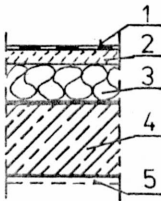
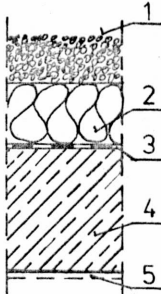
w maju 1981 roku. Dobór typów stropodachów do obliczeń poprzedziła analiza przykładów rozwiązań konstrukcyjnych /Malicki [72], Płoński, Pogorzelski [98], Schild i inni [112] / z jednoczesnym uwzględnieniem zakresu stosowalności wykorzystywanego modelu matematycznego jednokierunkowego, nieustalonego przepływu ciepła.

Przeanalizowano trzy stropodachy pełne, z których dwa charakteryzowały się takim samym układem warstw o różnej grubości, a więc różniły się one jedynie ciężarem i wartością współczynnika przenikania ciepła K . Jako trzeci przyjęto do obliczeń tak zwany stropodach odwrócony /Owczarek [87], Płoński, Pogorzelski [98], Schild i inni [112] /. W pomieszczeniu pod stropodachem założono stałą wartość temperatury powietrza równą $t_i = 20^\circ\text{C}$ dla stycznia i $t_i = 25^\circ\text{C}$ dla maja oraz przyjęto średnią wartość oporu przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni stropodachu /z wartości przy przepływie ciepła z góry w dół i z dołu do góry/ równą $0,13 \text{ [m}^2\text{K /W]}$ /Pogorzelski [101] /.

Podobnie jak w przypadku stropodachu pomiarowego, dla każdej warstwy stropodachów analizowanych teoretycznie, cechy materiałowe λ, c_p, ρ / uznano za stałe i przyjęto z tablic /Pogorzelski [101], Wiśniewski [130] /. Dane te przedstawiono w tabelicy 5.2.

Korzystając z danych meteorologicznych, uzyskanych z pomiarów przeprowadzonych w styczniu i w maju 1981 roku, dotyczących przestrzennego i czasowego rozkładu natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ oraz natężenia promieniowania nieboskłonu i najbliższego otoczenia $R_\beta(\tau)$, wykonano obliczenia dla wszystkich trzech stropodachów dla kąta pochylenia $\beta = 0^\circ$ oraz $\beta = 30^\circ$ i dla porównania dla stropodachów nr 1 i nr 2 dla kąta $\beta = 90^\circ$. W ostat-

Tablica 5.2. Zestawienie danych dla stropodachów analizowanych teoretycznie /bez wykonywania pomiarów/.

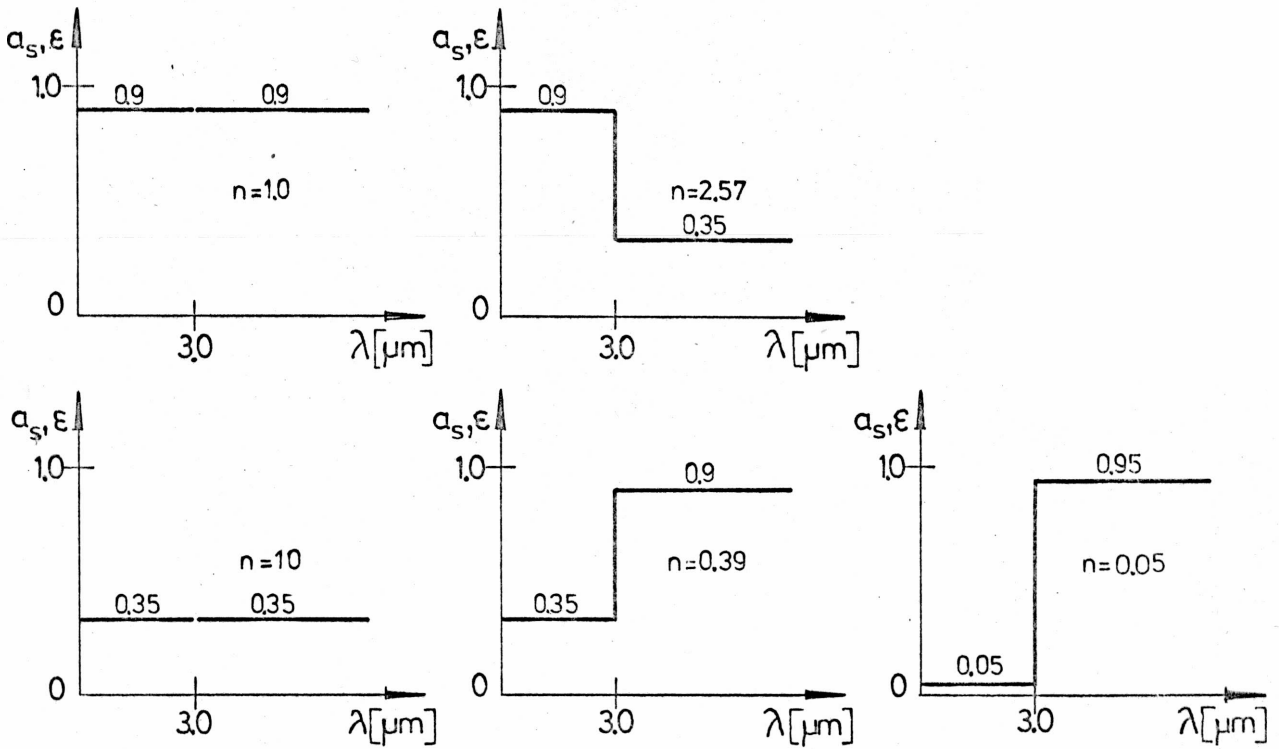
Nr stro- po- dachu	UKŁAD WARSTW	Grubość warstwy	Przewod- ność cieplna właści- wa	Gęstość materia- łu	Ciepło właści- we	Opór cieplny właści- wy	
		d [m]	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]	R [m ² K/W]	
1.		1-2x papa na lepiku	0,005	0,17	1000,0	1460,0	0,029
	2-gładź wyrównaw.	0,02	1,16	2100,0	340,0	0,017	
	3-styro- pian	0,05	0,04	30,0	1460,0	1,250	
	4-płyta żelbetowa	0,16	1,63	2500,0	880,0	0,098	
	5-powie- trze przy pow.wew.	-	-	-	-	0,13	
	$G = 449 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \quad K_1 = 0,656 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$					$\Sigma R = 1,524$	
2.		1-2x papa na lepiku	0,005	0,17	1000,0	1460,0	0,029
	2-gładź wyrównaw.	0,02	1,16	2100,0	840,0	0,017	
	3-styro- pian	0,05	0,04	30,0	1460,0	1,250	
	4-płyta żelbet.	0,10	1,63	2500,0	880,0	0,061	
	5-powie- trze przy pow.wew.	-	-	-	-	0,130	
	$G = 298 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \quad K_1 = 0,672 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$					$\Sigma R = 1,487$	
3.		1-żwir	0,06	0,70	1800,0	840,0	0,086
	2-styro- pian	0,08	0,04	30,0	1460,0	2,000	
	3-2x papa na lepiku	0,005	0,17	2000,0	1460,0	0,029	
	4-płyta żelbet.	0,16	1,63	2500,0	880,0	0,098	
	5-powie- trze przy pow.wew.	-	-	-	-	0,13	
	$G = 515 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \quad K_1 = 0,427 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$					$\Sigma R = 2,343$	

nim przypadku jako zewnętrzną warstwę przegrody pionowej należy rozumieć fikcyjną warstwę, której cechy fizyczne λ, ρ, c_p oraz a_s i ε są takie same jak dla papy. Zmieniając kąt pochylenia stropodachu ukierunkowano jego płaszczyznę na południe ze względu na największe zyski od nasłonecznienia w zimie /Duffie, Beckmann [32] /.

W każdym cyklu obliczeniowym, zarówno dla stycznia jak i dla maja 1981 roku, zmieniano radiacyjne własności zewnętrznej powierzchni stropodachu osobno dla wartości współczynnika absorpcji krótkofalowego promieniowania słonecznego /absorpcyjność a_s / oraz osobno dla współczynników absorpcji długofalowego promieniowania nieboskłonu i emisji promieniowania stropodachu /emisyjność ε /. Dobór wartości współczynników a_s i ε nastąpił w oparciu o analizę obecnych możliwości realizacyjnych /Duffie, Beckman [32], Kołtun [61] / oraz na podstawie proponowanej przez Reagana i Acklama [103] klasyfikacji wartości współczynnika a_s dla nieprzezroczystych materiałów budowlanych w zależności od ich barwy. Ostatecznie przyjęto do obliczeń wartości pokazane na rys. 5.1. Założono, że w zakresie długości fal od $0,3 \mu m$ do $3,0 \mu m$ i od $3,0 \mu m$ do $50 \mu m$ współczynniki, odpowiednio a_s i ε , mają stałe wartości. Ponadto przyjęto stałą wartość współczynnika a_s niezależnie od kąta podania bezpośredniego promieniowania słonecznego.

Dla stropodachu nr 3 obliczenia wykonano jedynie dla $a_s=0,35$ i $\varepsilon=0,9$ /Burch [15], Cammerer [16] /.

Część obliczeniowa badań modelowych została zrealizowana w całości za pomocą programów na maszynie cyfrowej RIAD-32 i ODRA 1305 z wykorzystaniem metody obliczeniowej Stephensona i Mitalasa [121].



Rys. 5.1. Zmienność radiacyjnych własności zewnętrznej powierzchni stropodachu a_s i ϵ w funkcji długości fali promieniowania krótko- i długofalowego. Dane przyjęto do obliczeń modelowych /bez wykonywania pomiarów/.

6. PRZYRZĄDY POMIAROWE

Pomiary natężenia promieniowania różnicowego między zewnętrzną powierzchnią stropodachu a środowiskiem, w zakresie krótko- i długofalowym, przeprowadzono przy pomocy radiometru różnicowego typu Funka [34], [35] produkcji australijskiej firmy Solar Radiation Instruments /model S.I.7/. Zasadniczą częścią tego przyrządu jest nawinięty na płytkę bakelitową termostos miedziowo-konstantanowy pokryty czarną farbą o współczynniku absorpcji bliskim jedności. Przed niekorzystnymi czynnikami zewnętrznymi czułe powierzchnie radiometru chronią czasze politylenowe, wypełnione azotem pod niewielkim ciśnieniem. Czasze polietylenowe są przepuszczalne dla promieniowania krótko- i długofalowego w zakresie długości fal od 0,2 do 50 μm . Termostos, w opisanej osłonie, umieszczony był na drążku zamocowanym na statywie.

W badaniach używano dwóch radiometrów różnicowych. Pierwszym /o współczynniku kalibracji $0,015 \text{ mV}/(\text{W m}^{-2})$ / mierzono natężenie promieniowania różnicowego $R_n(\tau)$ między stropodachem a otoczeniem. Powierzchnię czułą umieszczono 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 $0,0161 \text{ mV}/(\text{W m}^{-2})$ /, umieszczonego na statywie, przymocowano przysłonę wraz z dodatkową termoparą o znanej temperaturze. Mierzono nim natężenie całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego $R_c(\tau)$ /to znaczy sumę natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_T(\tau)$ oraz promieniowania nieboskłonu i gruntu $R_g(\tau)$ /, a tym samym pośrednio temperaturę radiacyjną nieba $t_r(\tau)$. Mierzono nim również przestrzenny rozkład tego

promieniowania dla stropodachu pochyłonego i różnie zorientowanego względem stron świata.

Do pośredniego pomiaru współczynnika emisyjności wybranych materiałów budowlanych wykorzystano radiometr /termometr bezkontaktowy/ 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 .

Temperaturę powietrza mierzono termometrem rtęciowym o zakresie pomiarowym od -30°C do $+50^{\circ}\text{C}$ przy dokładności $\pm 0,1\%$ odczytu.

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

Do kontaktowego pomiaru temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody użyto indywidualnie cechowanych termopar miedziowo-konstantanowych. Błąd pomiarowy zestawu oszacowano na $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ przy temperaturze odniesienia termopar do temperatury obudowy miernika. Używano również cyfrowego termometru kontaktowego produkcji brytyjskiej firmy Digitron 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 $+1000^{\circ}\text{C}$, zaś jego dokładność w temperaturze $20-25^{\circ}\text{C}$ wynosi $0,5\%$ odczytu.

Pomiary natężenia całkowitego promieniowania krótkofalowego /słonecznego/ wykonano za pomocą solarymetru typu Kippa o współczynniku kalibracji równym $70,81 \text{ (W m}^{-2}\text{)/(mV)}$. Czujnikiem przy-

rzędu jest termostos, pokryty czarną farbą o współczynniku absorpcji bliskim jedności, osłonięty kopułką ze szkła o przepuszczalności spektralnej w zakresie od $0,3 \mu\text{m}$ do $3,0 \mu\text{m}$.

Do pomiaru gęstości strumienia ciepła po stronie wewnętrznej i zewnętrznej stropodachu używano indywidualnie kalibrowanych mierników typu płytkowego z czujnikami w postaci termostosów. Mierniki przymocowane były do przegrody cienką warstwą mleczka gipsowego. Współczynnik kalibracji miernika mocowanego od strony zewnętrznej wynosił $35,48 \text{ (W m}^{-2}\text{)/(mV)}$, zaś od strony wewnętrznej $34,44 \text{ (W m}^{-2}\text{)/(mV)}$.

Do rejestracji większości mierzonych wielkości fizycznych wykorzystano programowany system komputerowy Compact Logger Solatron Schlumberger, o 32 kanałach wejściowych, z natychmiastowym wydrukiem przeliczonych wyników na taśmie. System ten umożliwia odczyt oraz zapis wielkości mierzonych i czynności te powtarza z zadaną częstością /w tym przypadku co godzinę/. Podłączone do niego były wszystkie wymienione przyrządy poza anemometrem czasowym AC-1 oraz termometrem kontaktowym typu Digitron.

7. WYNIKI

Eksperymentalną część badań /opis w rozdziale 5/ przeprowadzono w różnych sezonach, wybierając przeciętne warunki meteorologiczne, reprezentatywne dla klimatu występującego w ostatnich latach we Wrocławiu. Analiza zmierzonych wielkości meteorologicznych wykazała podobny charakter ich zmienności w każdej serii pomiarowej, w poszczególnych porach roku wielkości te różniły się jedynie wartościami. W związku z tym w niniejszej pracy ograniczono się do przedstawienia wyników pomiarowych reprezentatywnych dla sezonu ogrzewczego budynków /styczeń/ i dla okresu poza tym sezonem /maj/.

Na rysunku 7.1 pokazano wyniki pomiarów przeprowadzonych w styczniu 1981 roku. Rysunek przedstawia przebieg natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$, całkowitego promieniowania atmosfery $R_c(\tau)$ oraz długofalowego promieniowania nieboskłonu $R_\beta(\tau)$, oddziaływujących na prawie poziomy stropodach pomiarowy, a także wartości temperatury powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$. Naniesiono również wartości temperatur na powierzchni zewnętrznej $t_{os}(\tau)$ i wewnętrznej $t_{is}(\tau)$ /od strony pomieszczenia/ stropodachu oraz przebiegu gęstości strumieni cieplnych na jego powierzchni zewnętrznej $q_o(\tau)$ i wewnętrznej $q_i(\tau)$. Ekstremalne wartości wielkości wyżej wymienionych oraz prędkości

wiatru $v()$ przedstawiono w tablicy 7.1. Wartości $I_{T\beta}(\tau)$, $R_{\beta}(\tau)$ oraz $R_c(\tau)$ odnoszą się do płaszczyzny poziomej.

Dla styczniowej serii pomiarowej strumień ciepła przy wewnętrznej powierzchni stropodachu skierowany był od pomieszczenia do stropodachu, następowały więc straty ciepła z pomieszczenia, co przejawiało się w postaci niższej temperatury powierzchni wewnętrznej stropodachu $t_{is}(\tau)$ w odniesieniu do temperatury powietrza w pomieszczeniu $t_i(\tau)$. Zwraca uwagę również fakt, że w nocy występowały okresy, w których temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ osiągała niższe wartości w stosunku do wartości temperatury powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$; zjawisko to trwało od kilku do kilkunastu godzin. Największe różnice między wartościami $t_{os}(\tau)$ i $t_e(\tau)$ występowały podczas bezchmurnej nocy z 22 na 23 stycznia.

Na rysunku 7.2 przedstawiono, w układzie analogicznym do wyżej zaprezentowanego, wyniki pomiarów przeprowadzonych w maju 1981 roku. W tablicy 7.2 wyszczególniono natomiast ekstremalne wartości interesujących wielkości. Wartości $I_{T\beta}(\tau)$, $R_{\beta}(\tau)$ oraz $R_c(\tau)$ odnoszą się do płaszczyzny poziomej. Strumień ciepła przy wewnętrznej powierzchni stropodachu w majowej serii pomiarowej skierowany był naprzemiennie od i do pomieszczenia; pomieszczenie na przemian traciło i zyskiwało ciepło przez stropodach. W maju, podobnie jak w styczniu, podczas bezchmurnych nocy występowały przedziały czasowe, w których temperatura zewnętrznej powierzchni

Tablica 7.1. Ekstremalne wartości wielkości pomiarowych na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku

	t_e	t_i	t_{os}	t_{is}	q_o	q_i	$I_{T\beta}$	R_β	R_c	v
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	ms^{-1}
Wartość maksymalna	+0.8	+13.5	+3.7	+12.3	+46.1	-5.2	220.0	306.0	451.0	2.0
Wartość minimalna	-12.0	+12.0	-11.6	+10.0	-48.9	-20.1	0.0	191.0	213.0	0.4

Tablica 7.2. Ekstremalne wartości wielkości pomiarowych na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku

	t_e	t_i	t_{os}	t_{is}	q_o	q_i	$I_{T\beta}$	R_β	R_c	v
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	ms^{-1}
Wartość maksymalna	+24.6	+24.5	+45.5	+26.8	+200.5	+26.5	780.0	380.0	1060.0	2.2
Wartość minimalna	+7.0	+18.7	+6.3	+17.5	-112.5	-15.1	0.0	200.0	280.0	0.3

stropodachu była niższa od temperatury powietrza zewnętrznego /proces ten trwał kilka godzin/.

Zarówno w styczniu jak i w maju gęstość strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni stropodachu $q_i(\tau)$ wykazywała mniejsze wahania /mniejszą amplitudę/ niż gęstość strumienia ciepła na powierzchni zewnętrznej $q_o(\tau)$, zaś maksimum $q_i(\tau)$ było opóźnione o pewien czas w stosunku do maksymalnej wartości $q_o(\tau)$. Odnosi się to również do temperatur $t_{is}(\tau)$ i $t_{os}(\tau)$. Ponadto w obu seriach pomiarowych dostrzeżono pewne prawidłowości w kolejności występowania maksymalnych wartości $q_o(\tau)$, $t_{os}(\tau)$, $I_{T\beta}(\tau)$ oraz $t_e(\tau)$. W ciągu doby jego pierwsze pojawiło się maksimum gęstości strumienia ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu $q_o(\tau)$, które wyprzedzało, o około 4 godziny w maju i o około 2 godziny w styczniu, wystąpienie maksymalnej wartości całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ i maksymalnej wartości temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$. Po upływie 1 do 3 godzin od momentu pojawienia się maksimum $I_{T\beta}(\tau)$ osiągała maksymalną wartość temperatura powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$.

W godzinach popołudniowych obserwowano sytuacje, w których strumień ciepła przy zewnętrznej powierzchni stropodachu skierowany był od tej powierzchni do środowiska /straty ciepła/, podczas gdy na stropodach oddziaływało jeszcze promieniowanie słoneczne.

Na rysunkach 7.3 i 7.4 przedstawiono całkowity bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu $R_n(\tau)$ na podstawie pomiarów przeprowadzonych, odpowiednio, w styczniu i w maju 1981 roku; bilans ten jest składnikiem lokalnego bilansu ciepła przepływającego przez stropodach /wyrażenie (2.28)/. Ponadto na rysunkach tych pokazano również bilans promieniowania krótkofalo-

wego $q_s(\tau)$ /natężenie pochłoniętego promieniowania słonecznego/ oraz długofalowego $q_L(\tau)$ /różnica między natężeniem promieniowania emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu $q_r(\tau)$ a natężeniem pochłoniętego długofalowego promieniowania nieboskłonu $q_{L1}(\tau)$ /. Wielkości $q_s(\tau)$ i $q_L(\tau)$ są składnikami całkowitego bilansu promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu $R_n(\tau)$. Zakreskowane części obu wykresów obrazują wielkości natężenia różnicowego promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$ /łączne straty przez promieniowanie długofalowe/. Na obu rysunkach przedstawiono również zmiany wartości natężenia całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego $R_c(\tau)$ stanowiącego sumę natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ oraz natężenia całkowitego promieniowania nieboskłonu i gruntu $R_\beta(\tau)$.

Na rysunku 7.5 pokazano zmianę wartości temperatury powietrza $t_e(\tau)$, średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$ dla powierzchni poziomej oraz dla porównania temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku. Podczas pochmurnej nocy z 21 na 22 oraz z 23 na 24.01.81 r. /rys. 7.5/ różnice między temperaturami $t_e(\tau)$ i $t_r(\tau)$ były niewielkie i wynosiły od 2 do 5°C. Przy niebie całkowicie bezchmurnym /noc z 22 na 23.1.81r/ temperatura $t_r(\tau)$ była niższa od temperatury $t_e(\tau)$ nawet o 18°C co powodowało obniżenie temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ w stosunku do temperatury powietrza $t_e(\tau)$. Zwraca uwagę również fakt, że przy ujemnych temperaturach powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$ /rys. 7.5, 23.01.81, godziny od 9⁰⁰ do 15⁰⁰/ średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$ osiągała wartości dodatnie, nawet +27°C. Może to powodować na

przykład topnienie śniegu leżącego na stropodachu przy ujemnych temperaturach powietrza zewnętrznego.

Na rysunku 7.6 przedstawiono zmianę wartości temperatury powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$, średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$ dla powierzchni poziomej oraz temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku. Różnica między temperaturami $t_e(\tau)$ i $t_r(\tau)$, podczas bezchmurnych nocy, wynosiła nawet 15°C co, podobnie jak w styczniu, powodowało obniżenie się temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ w stosunku do temperatury powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$. Ponadto temperatura $t_r(\tau)$, przy bezchmurnym niebie w nocy przyjmowała wartości ujemne -7°C , 8.05.81, godz. 4^{00} /. W dzień natomiast osiągała wartość ok. 100°C w wyniku intensywnego oddziaływania promieniowania słonecznego.

W niniejszej pracy analizowano również wpływ kąta pochylenia i zorientowania płaszczyzny stropodachu względem stron świata na jego bilans cieplny. Zgodnie z opisem podanym w rozdziale 5 przeprowadzono pomiary natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ oraz całkowitego promieniowania atmosfery $R_c(\tau)$ w funkcji kąta pochylenia i zorientowania względem stron świata płaszczyzny stropodachu. Łączne oddziaływanie radiacyjne całkowitego promieniowania atmosfery $R_c(\tau)$, będącego sumą natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ oraz natężenia długofalowego promieniowania nieboskłoni i gruntu $R_\beta(\tau)$, można zastąpić średnią temperaturą promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$ /rozdział 8.1, wyrażenie (8.1)/. W związku z tym, w niniejszej pracy ograniczono się do przedstawienia jedynie

zmienności tej temperatury w czasie. Na rysunkach od 7.7 do 7.13 przedstawiono wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$ dla różnie pochyłonych, względem poziomu, i różnie zorientowanych stropodachów na podstawie pomiarów ze stycznia 1981 roku. Przy danej orientacji, największe różnice między wartościami temperatur $t_r(\tau)$ dla poszczególnych kątów pochylenia przegrody budowlanej a temperaturą powietrza $t_e(\tau)$ występowały podczas bezchmurnej nocy z 22 na 23.01.81 r. /rysunki od 7.7 do 7.10/. Dla płaszczyzny poziomej temperatura $t_r(\tau)$ była niższa od temperatury powietrza o 18°C , zaś dla płaszczyzny pionowej o 5°C . dla kątów pochylenia 30° i 60° różnica ta przyjmowała wartości pośrednie. Przy niebie prawie zupełnie zachmurzonym /noc z 21 na 22.01.81 r., oraz z 23 na 24.01.81 r./ różnica między temperaturami $t_r(\tau)$, dla płaszczyzny poziomej, i $t_e(\tau)$ wynosiła od 2 do 5°C .

Temperatura $t_r(\tau)$ osiągnęła minimalną wartość -25°C /rys. 7.7/ dla płaszczyzny poziomej, co odpowiadało natężeniu całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego $R_c(\tau) = 214 \text{ Wm}^{-2}$, zaś maksymalną wartość $t_r(\tau)$ zanotowano dla płaszczyzny pochyłonej pod kątem 60° , zorientowanej na południe; wynosiła ona $+56,5^{\circ}\text{C}$ /rys. 7.8/, co odpowiadało $R_c(\tau) = 668 \text{ Wm}^{-2}$.

Na rysunkach od 7.14 do 7.20 przedstawiono wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego $t_r(\tau)$, dla różnie pochyłonych i różnie zorientowanych względem stron świata płaszczyzn, na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku. Podczas bezchmurnej nocy, podobnie jak w styczniu, największa różnica między temperaturami $t_r(\tau)$ i $t_e(\tau)$ występowała dla płaszczyzny poziomej i wynosiła 15°C , zaś najmniejsza dla płaszczyzny pionowej - średnio 5°C . Powodowało to obniżenie

się temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $t_{os}(\tau)$ o kilka stopni w stosunku do temperatury powietrza $t_e(\tau)$.

W maju, podczas bezchmurnej nocy, temperatura $t_r(\tau)$ osiągnęła minimalną wartość -7°C , dla płaszczyzny poziomej, co odpowiadało natężeniu całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego $R_c = 281 \text{ Wm}^{-2}$. Maksymalną wartość $t_r(\tau)$ osiągnęła dla płaszczyzny pochylonej pod kątem 30° , zorientowanej na południe i wynosiła $+110^{\circ}\text{C}$ /rys. 7.18/, co odpowiadało $R_c(\tau) = 1220 \text{ Wm}^{-2}$.

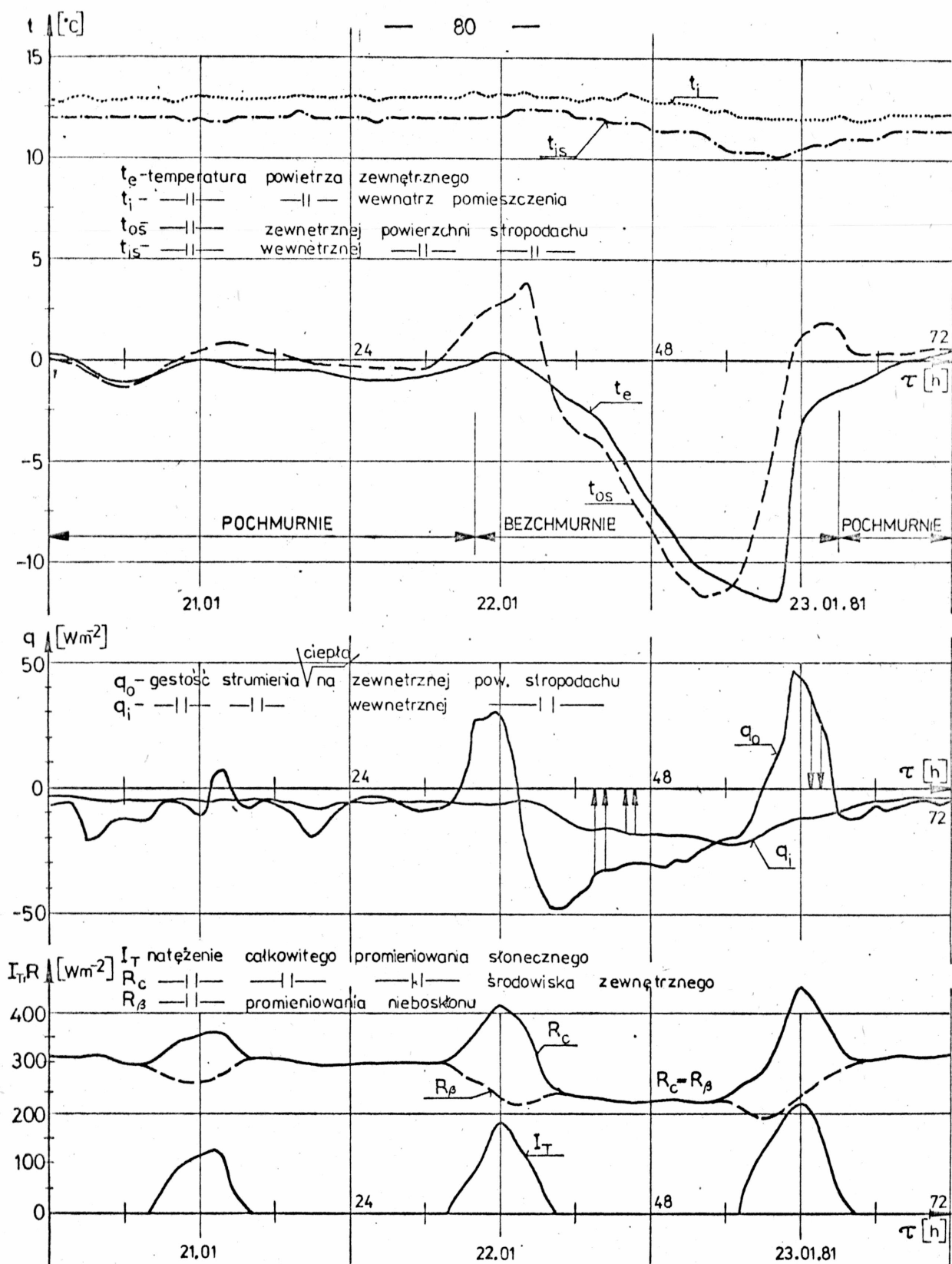
W czasie pogodnego dnia przebieg wartości temperatury $t_r(\tau)$ odpowiada zmianom natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$. Tak więc temperatura $t_r(\tau)$, około godziny 10^{00} osiągnęła wartość maksymalną dla przegród budowlanych ukierunkowanych na wschód /E, rys. 7.14/, około godziny 12^{00} dla przegród budowlanych ukierunkowanych na południe /S, rys. 7.15/ i około godziny 16^{00} dla przegród ukierunkowanych na zachód /W, rys. 7.16/.

W niniejszej pracy przeprowadzono również obliczenia modelowe /bez wykonywania pomiarów/ dla trzech typowych stropodachów pełnych, dla których przyjęto warunki meteorologiczne zarejestrowane w części eksperymentalnej. Opis obliczeń oraz dane dotyczące stropodachów przedstawiono w rozdziale 5. Celem analizy było uzyskanie ilościowej informacji o wpływie kąta pochylenia i zorientowania płaszczyzny stropodachu względem stron świata oraz o wpływie selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na jego bilans cieplny.

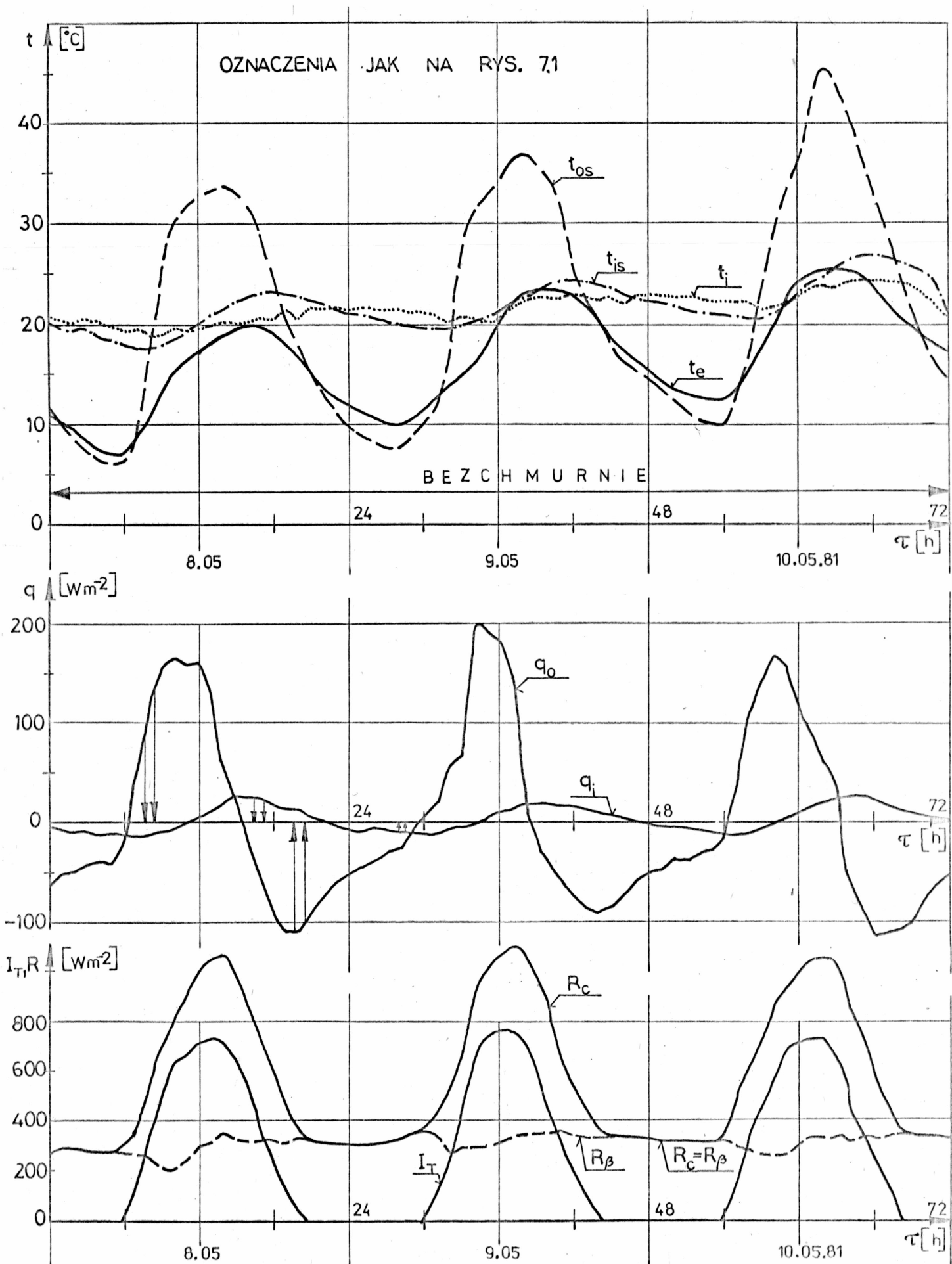
Wielkość zysków bądź też strat ciepła z pomieszczenia przez stropodach zdeteterminowana jest przez wartość gęstość strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na wewnętrznej powierzchni stropodachu. Na rysunkach 7.21,

7.22 i 7.23 przedstawiono dla stropodachu nr 1, wartości gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ oraz $q_o(\tau)$, obliczone dla danych meteorologicznych uzyskanych na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku, dla kąta pochylenia, odpowiednio 0° , 30° i 90° dla różnych wartości współczynnika selektywności n /wyrażenie (2.38)/ jego powierzchni zewnętrznej. Na rysunku 7.21 i 7.22, dla kąta pochylenia 0° i 30° , przedstawiono również wyniki obliczeń dla stropodachu nr 3. Na rysunkach 7.24, 7.25 i 7.26 dla danego współczynnika selektywności n zewnętrznej powierzchni stropodachu nr 1, pokazano wartość $q_i(\tau)$ dla różnych jego kątów pochylenia. Na rysunkach 7.27; 7.28; 7.29; 7.30 i 7.31 przedstawiono podobne wyniki dla stropodachu nr 2, z tym, że ograniczono się jedynie do pokazania zmienności w czasie jedynie wartości gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na wewnętrznej powierzchni stropodachu.

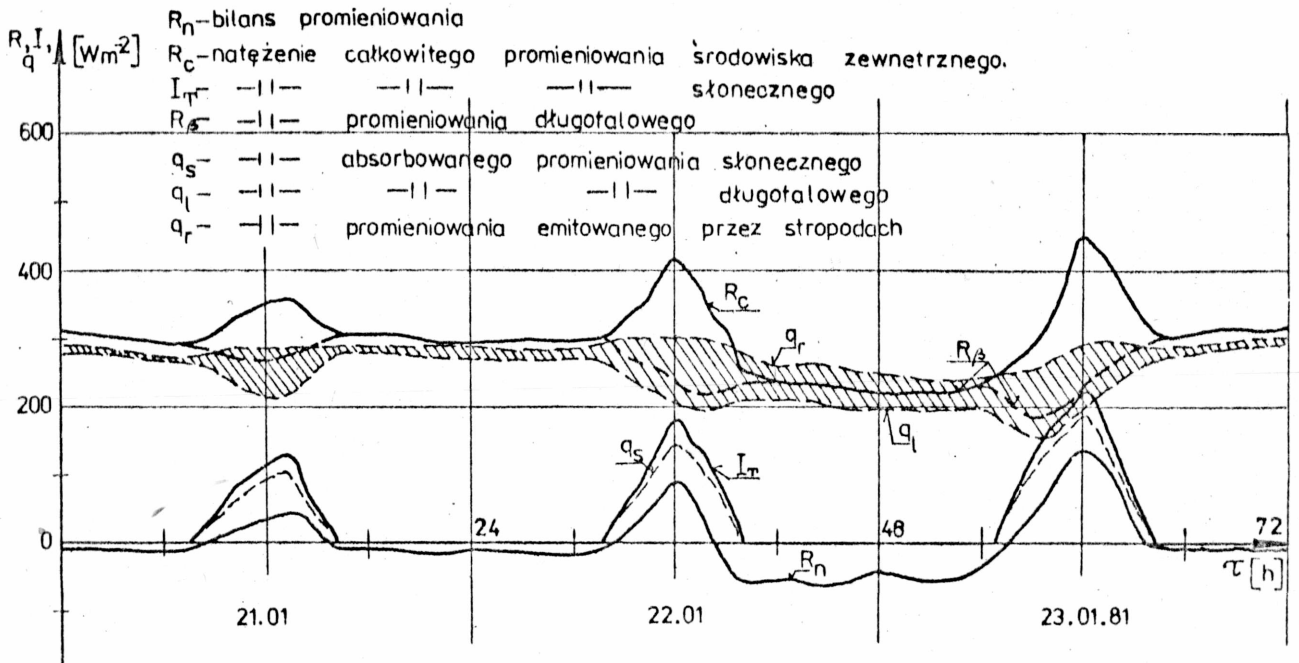
Zmienność w czasie gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$, dla danych meteorologicznych uzyskanych na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku, dla stropodachu nr 1 i nr 3 pokazano na rysunku 7.32, zaś dla stropodachu nr 2 na rysunku 7.33.



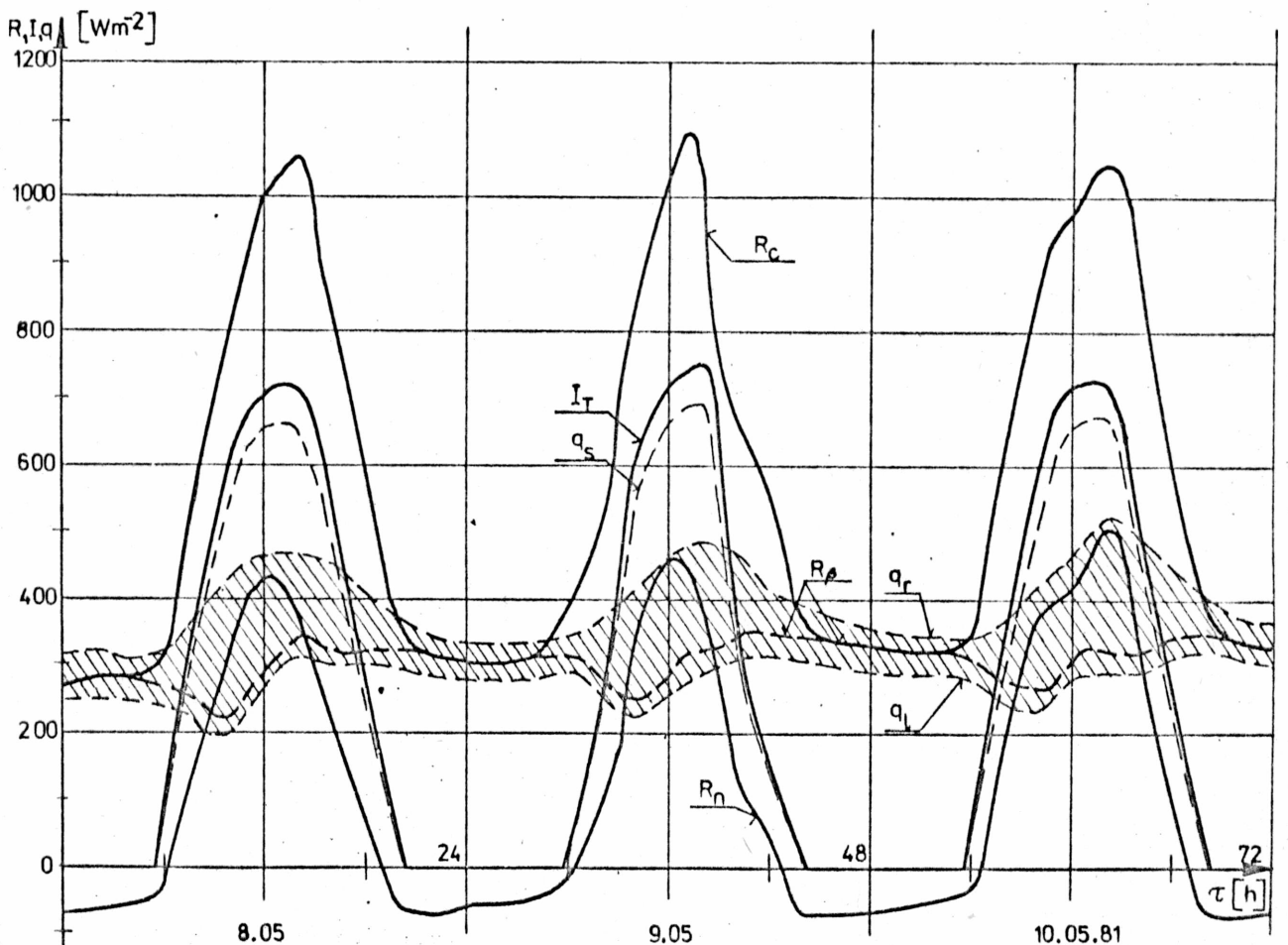
Rys. 7.1. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



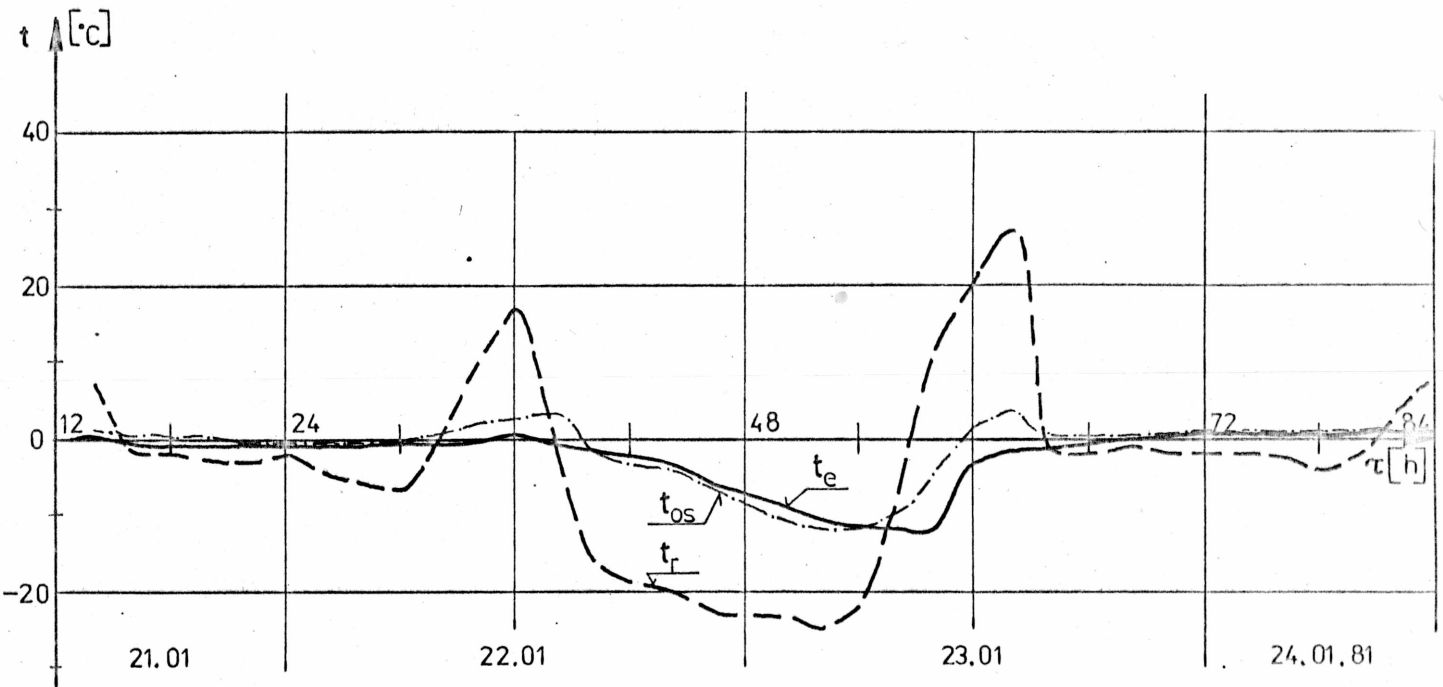
Rys. 7.2. Wyniki pomiarów przeprowadzonych w maju 1981 roku.



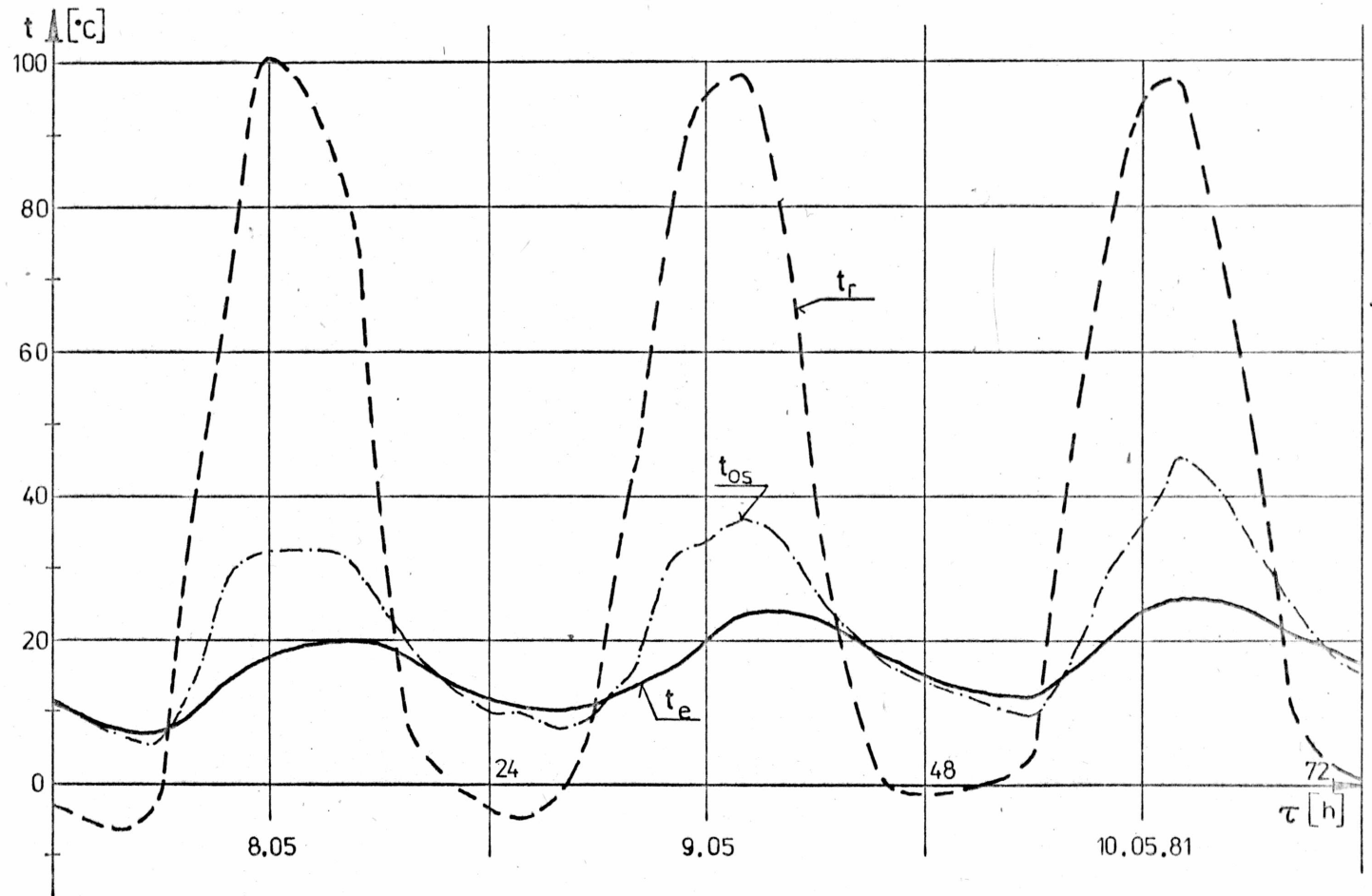
Rys. 7.3. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu pomiarowego na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku. Obszar zakreskowany obrazuje straty promieniowania długofalowego.



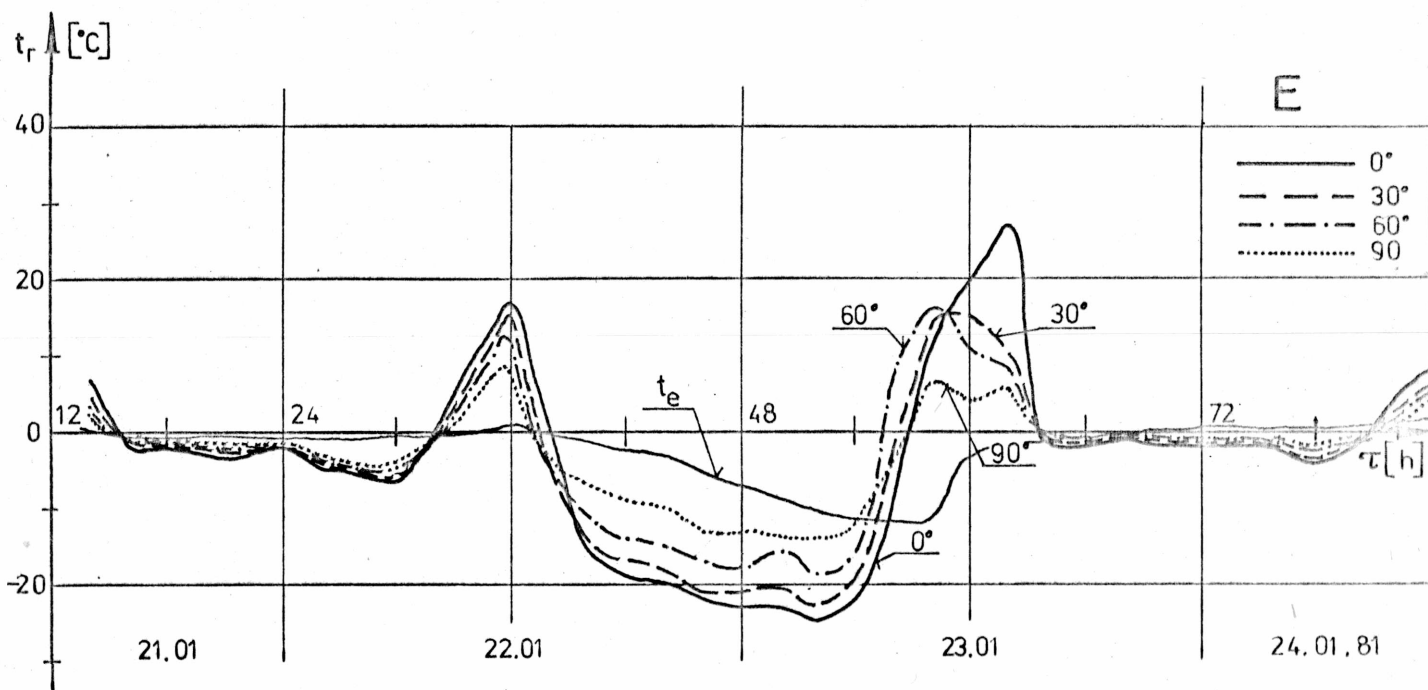
Rys. 7.4. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu pomiarowego na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku. Obszar zakreskowany obrazuje straty promieniowania długofalowego. Oznaczenia jak na rys. 7.3.



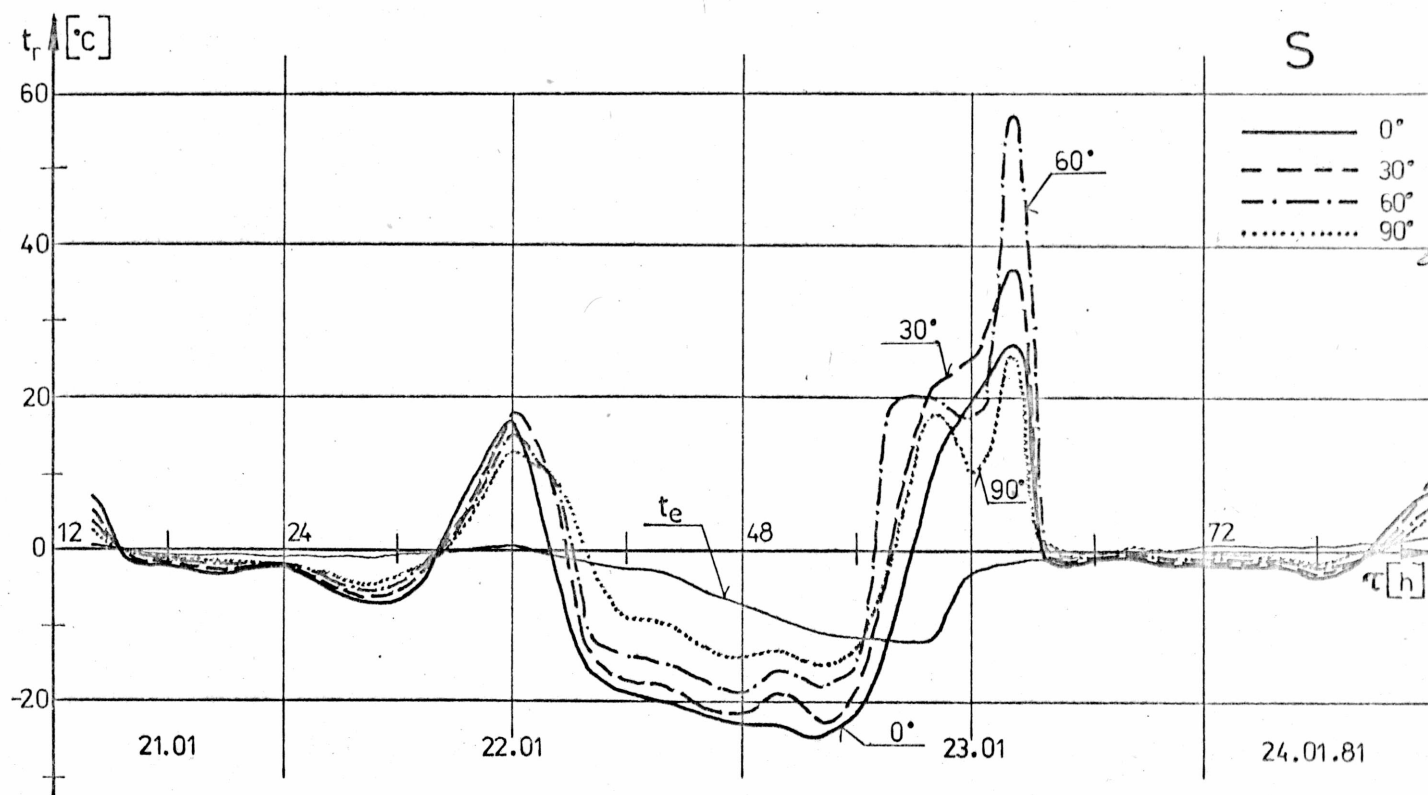
Rys. 7.5. Zmienność w czasie temperatury powietrza t_e , temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} oraz średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



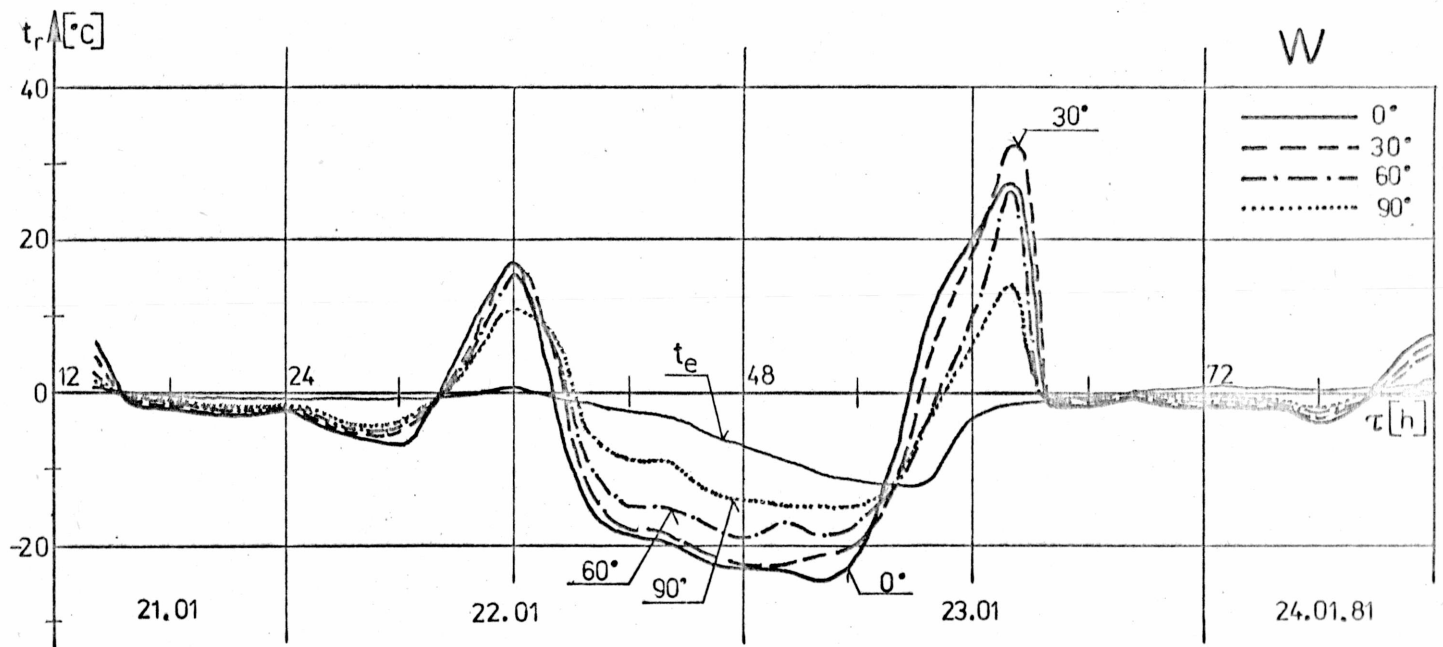
Rys. 7.6. Zmienność w czasie temperatury powietrza t_e , temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} oraz średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



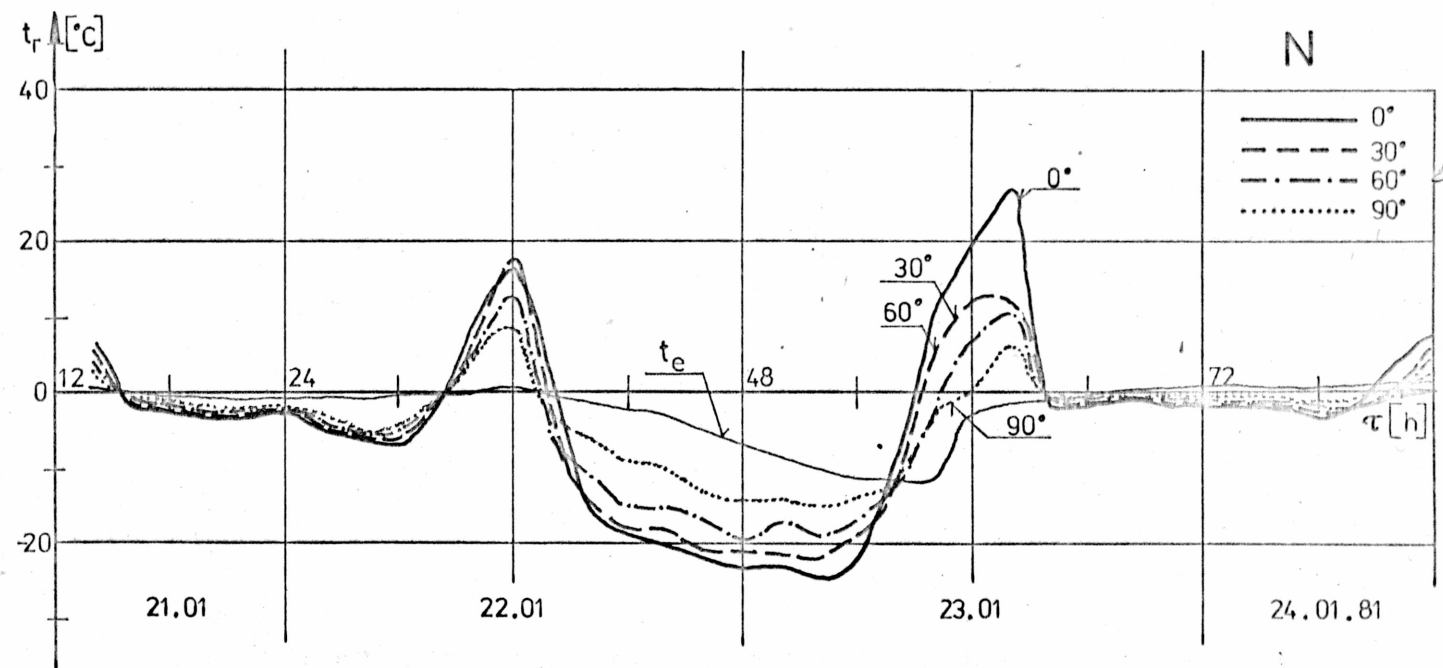
Rys. 7.7. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na wschód /E/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



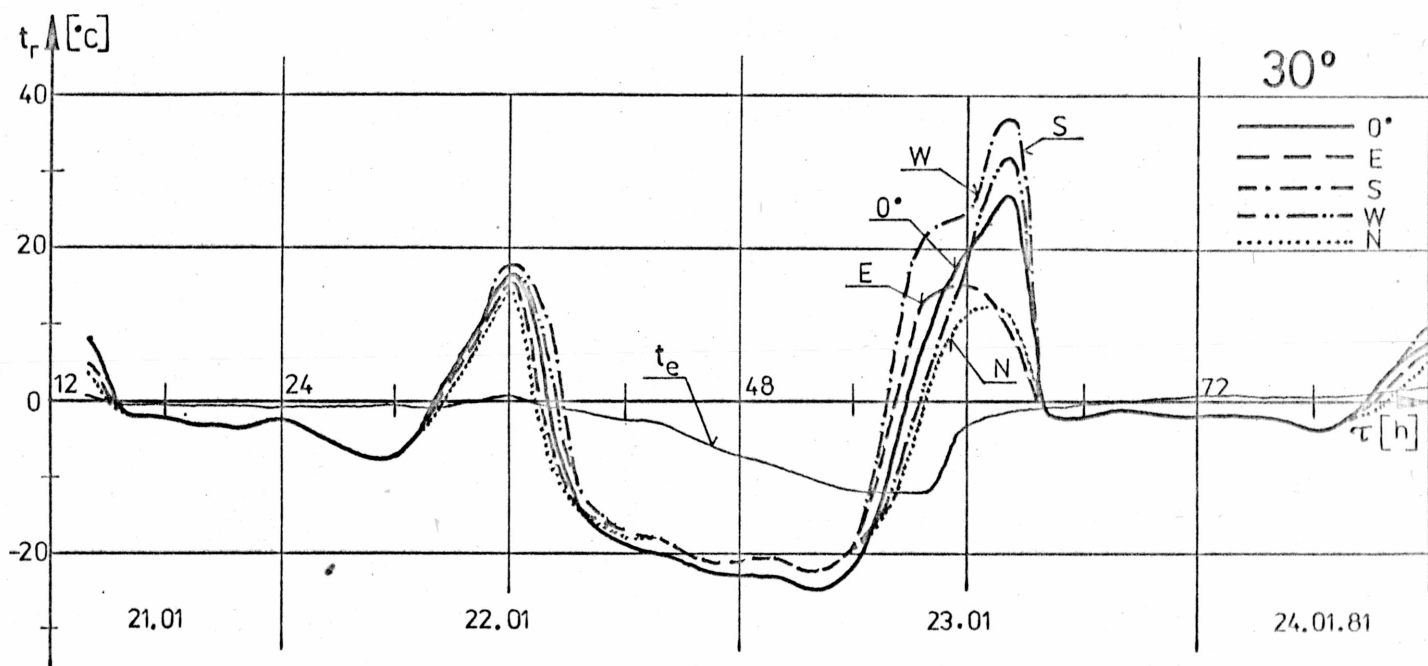
Rys. 7.8. Zmienność w czasie temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na południe /S/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



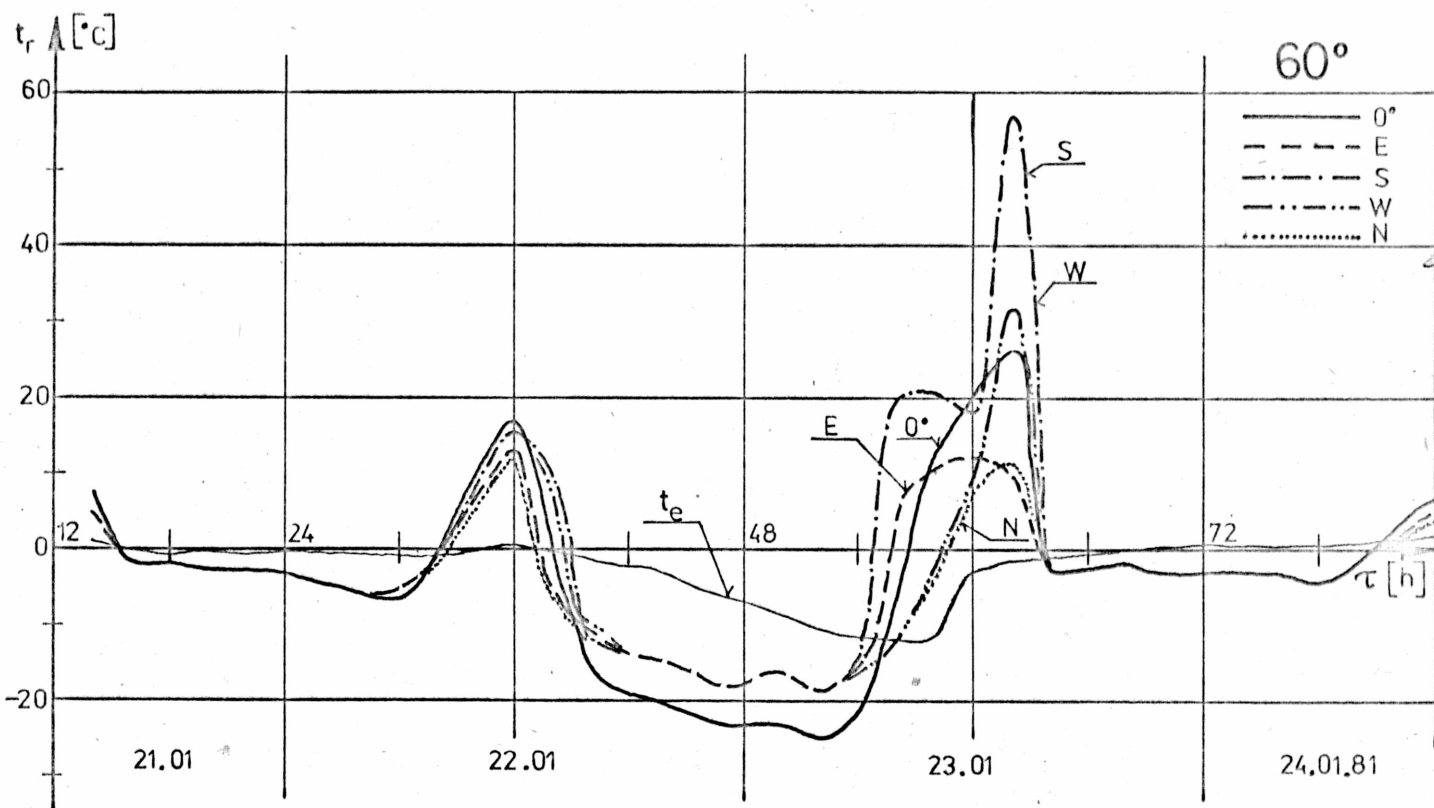
Rys. 7.9. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na zachód /W/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



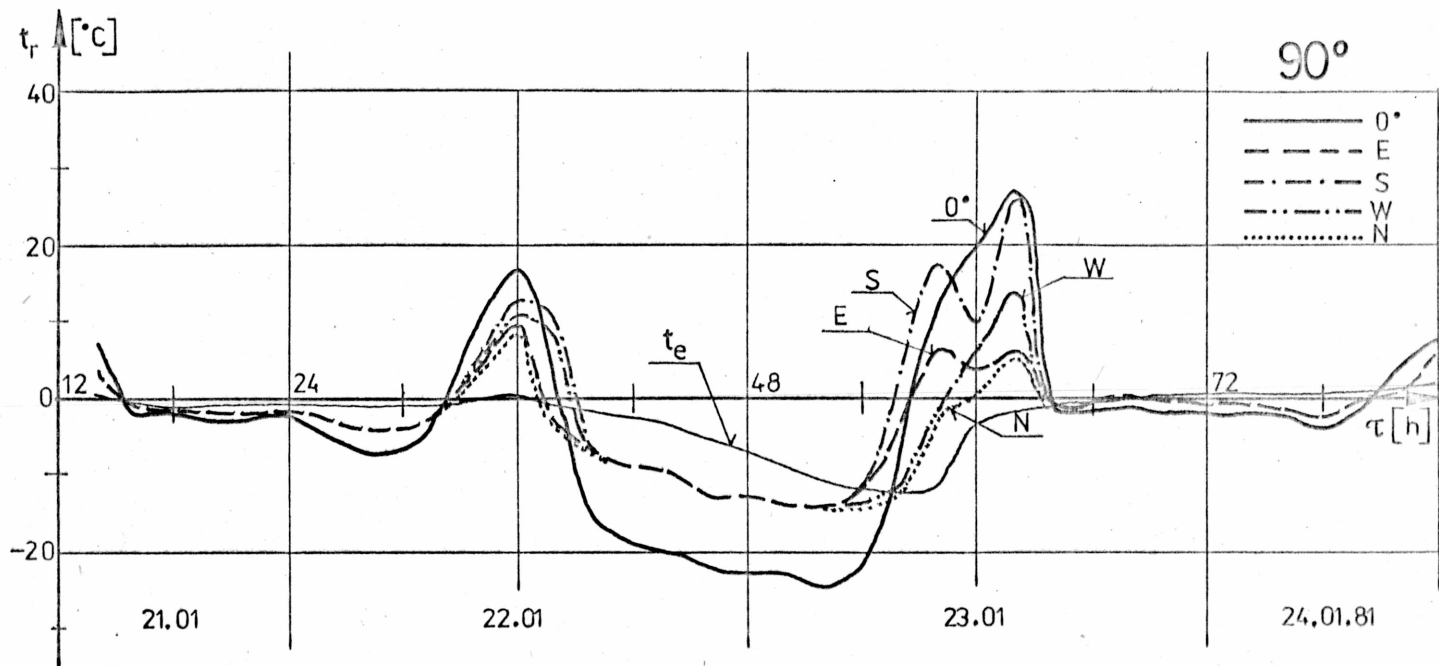
Rys. 7.10. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na północ /N/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



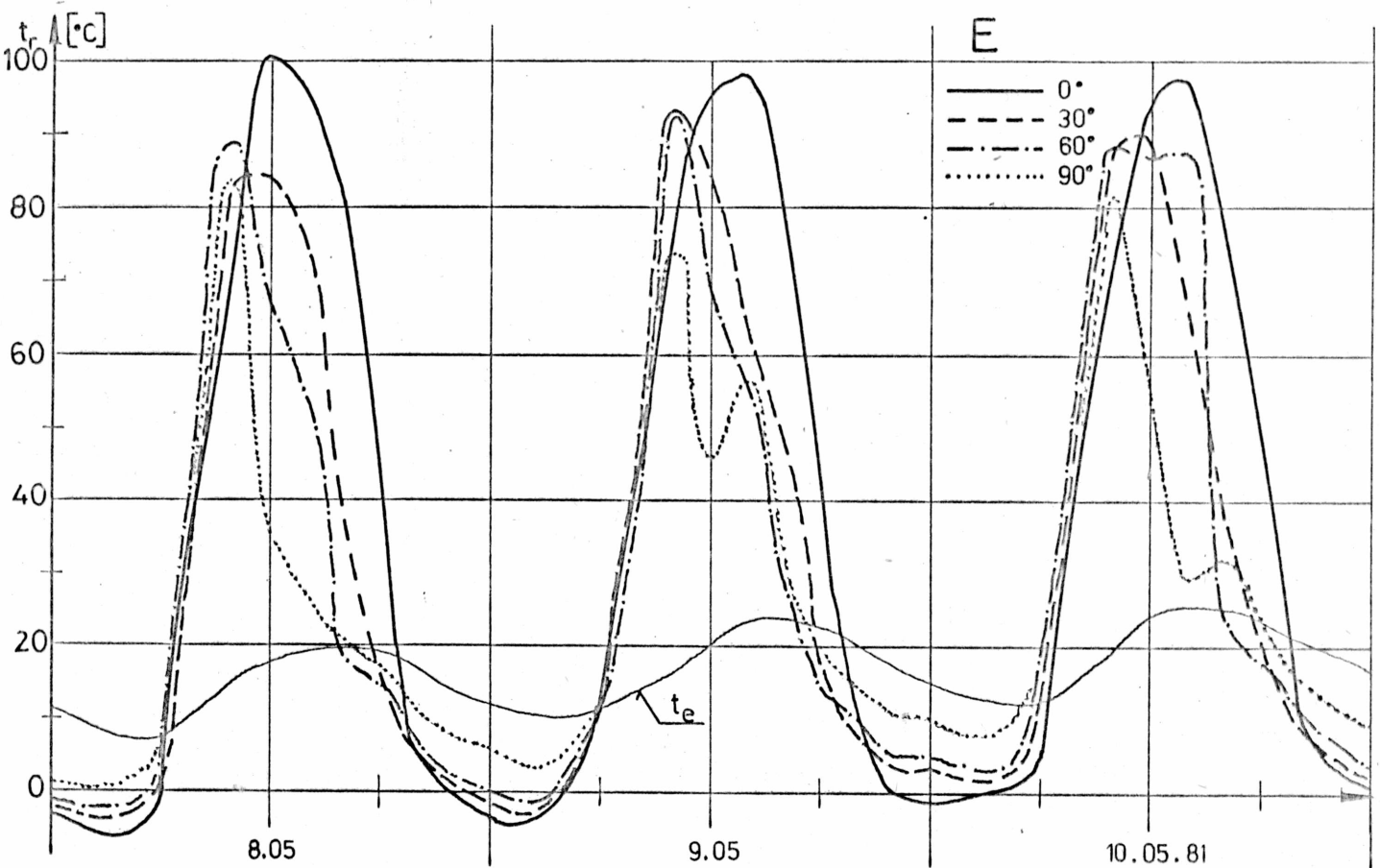
Rys. 7.11. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 30° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



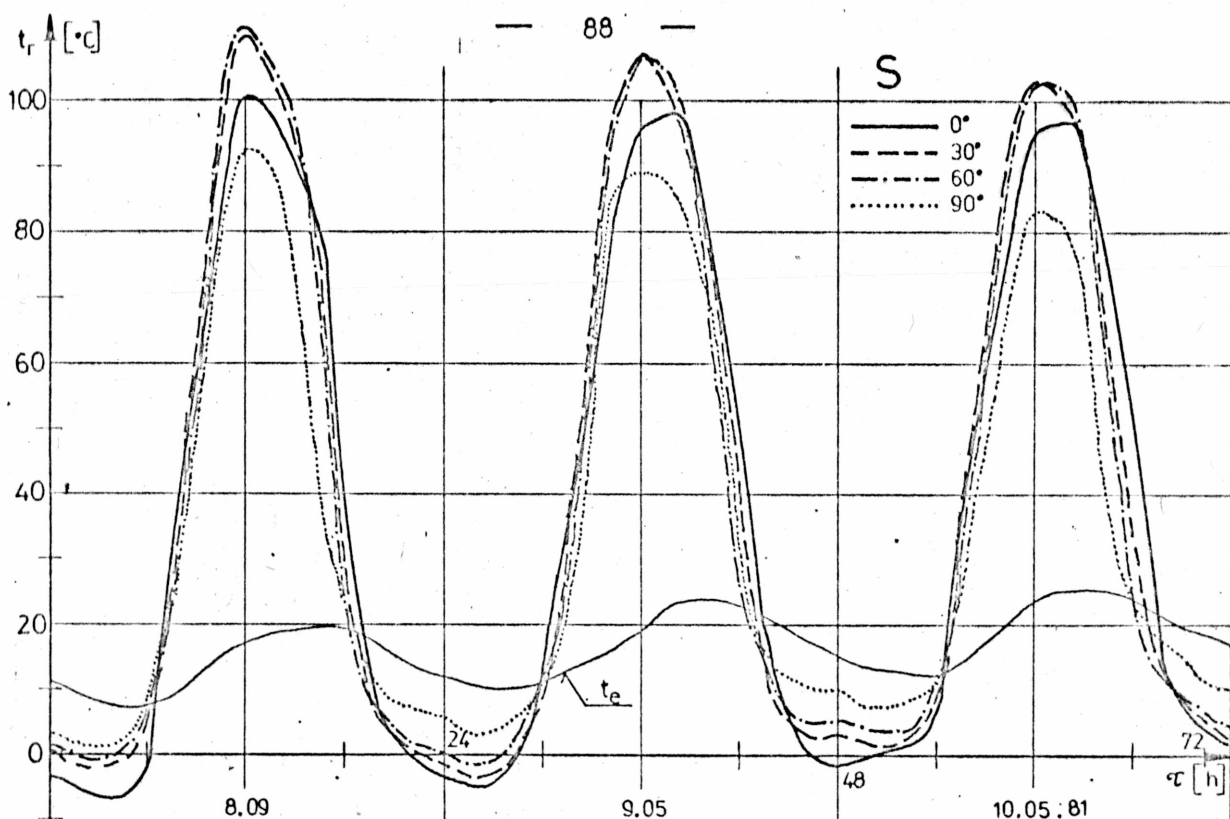
Rys. 7.12. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 60° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



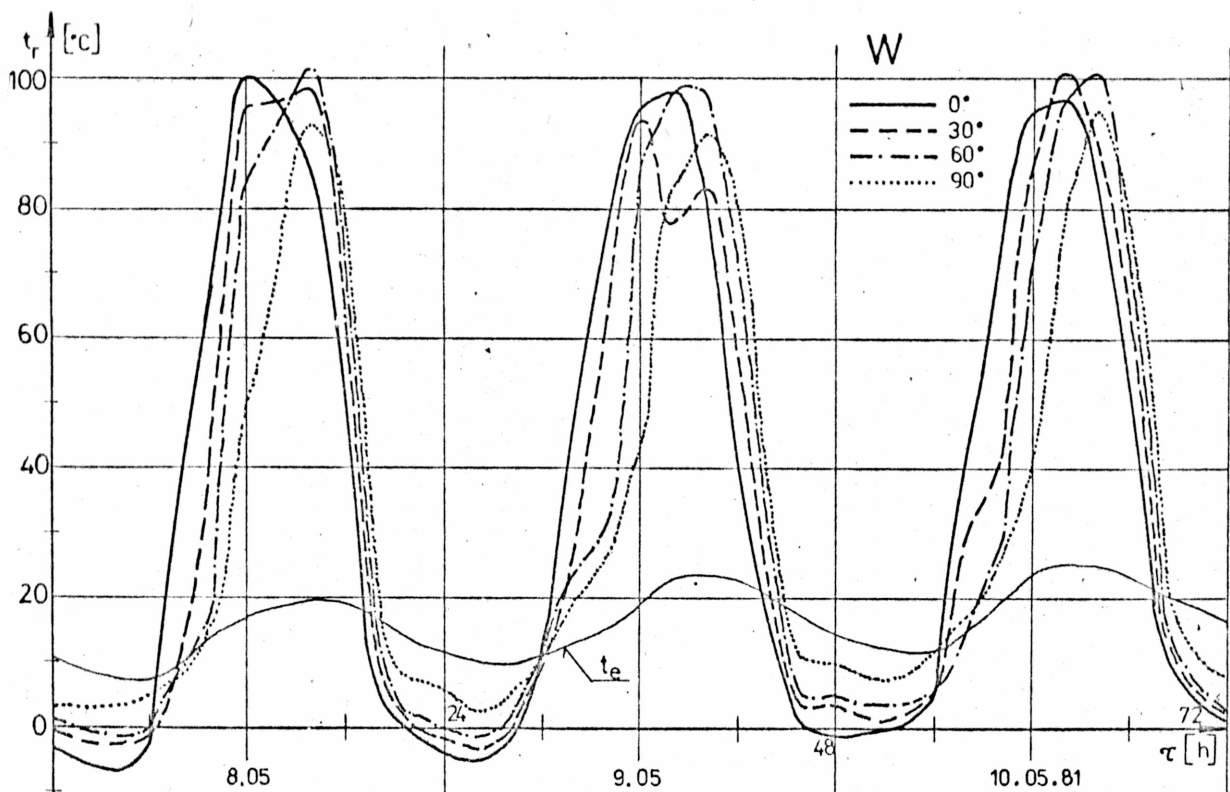
Rys. 7.13. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 90° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



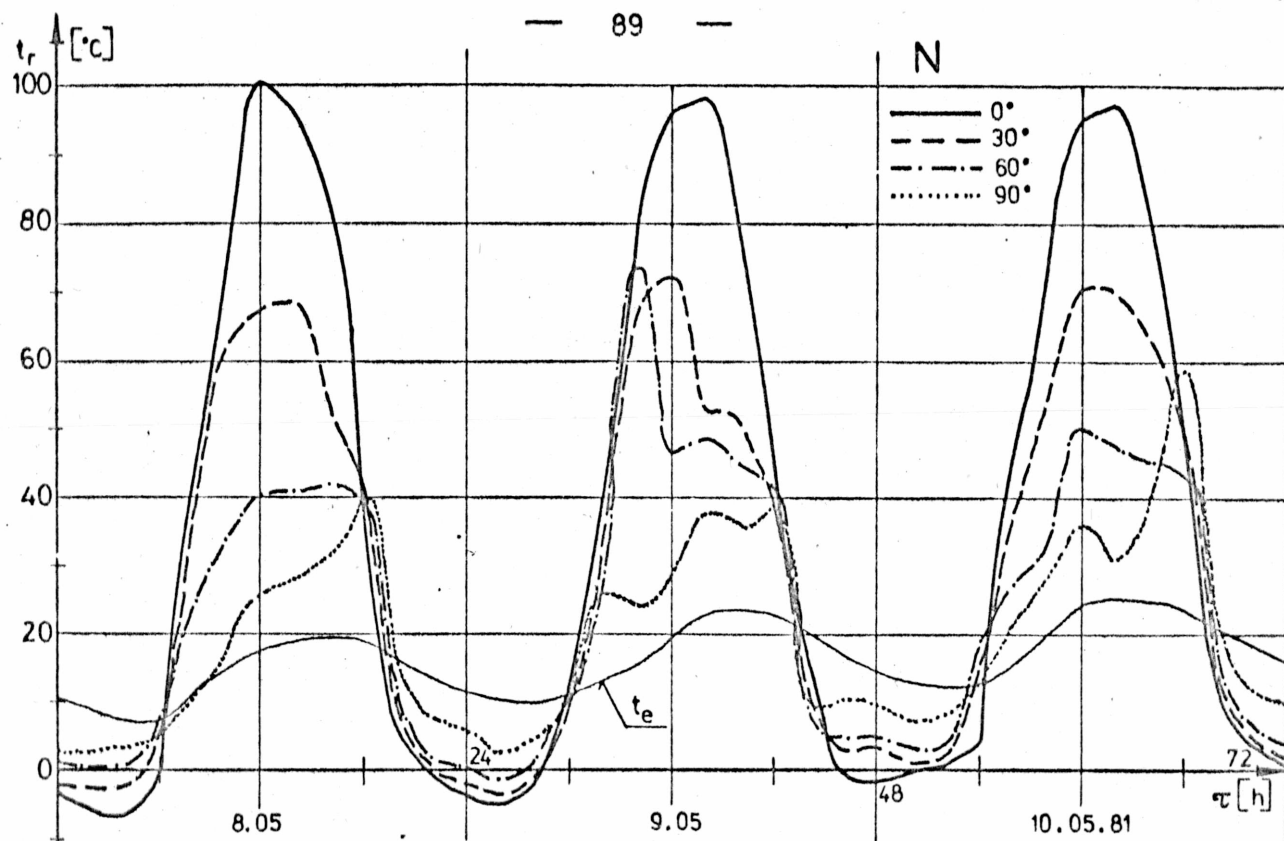
Rys. 7.14. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na wschód /E/ i nachylonej pod kątem $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



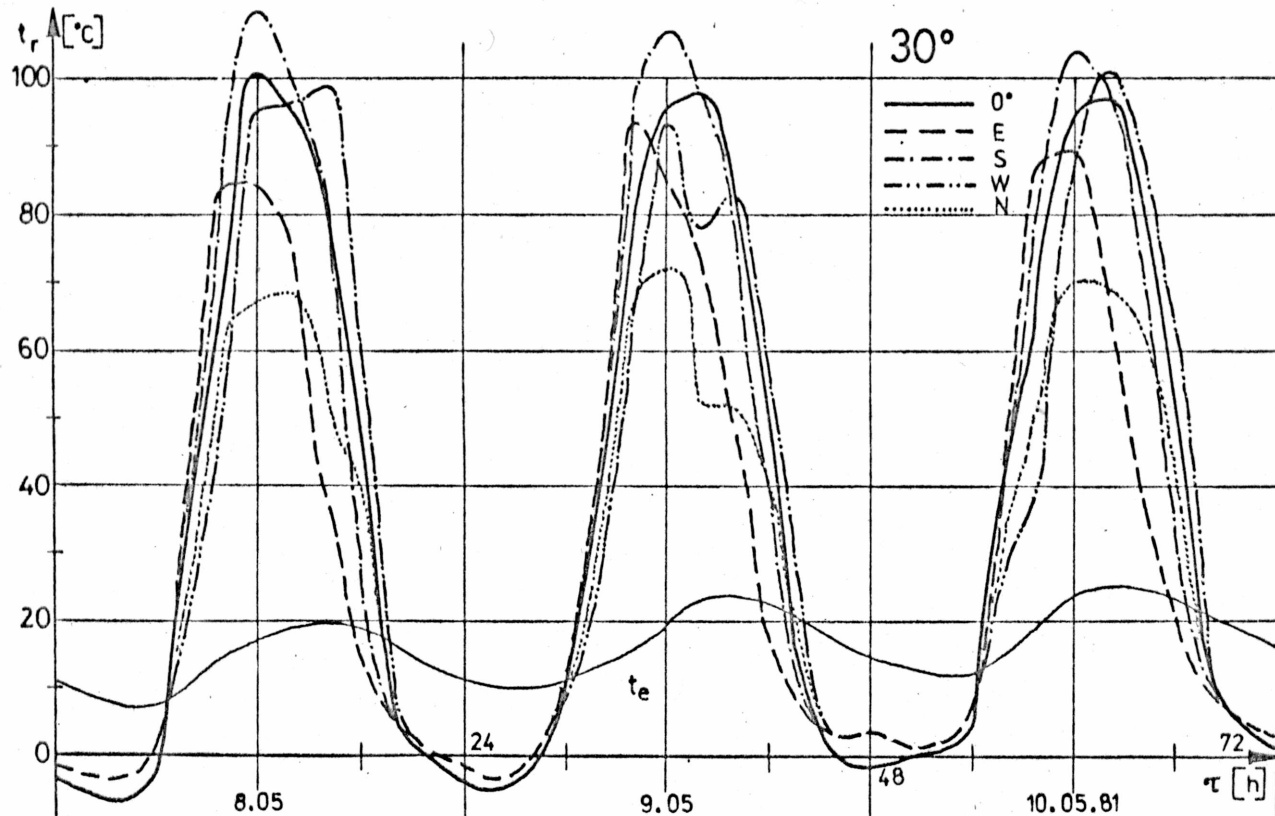
Rys. 7.15. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na południe /S/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



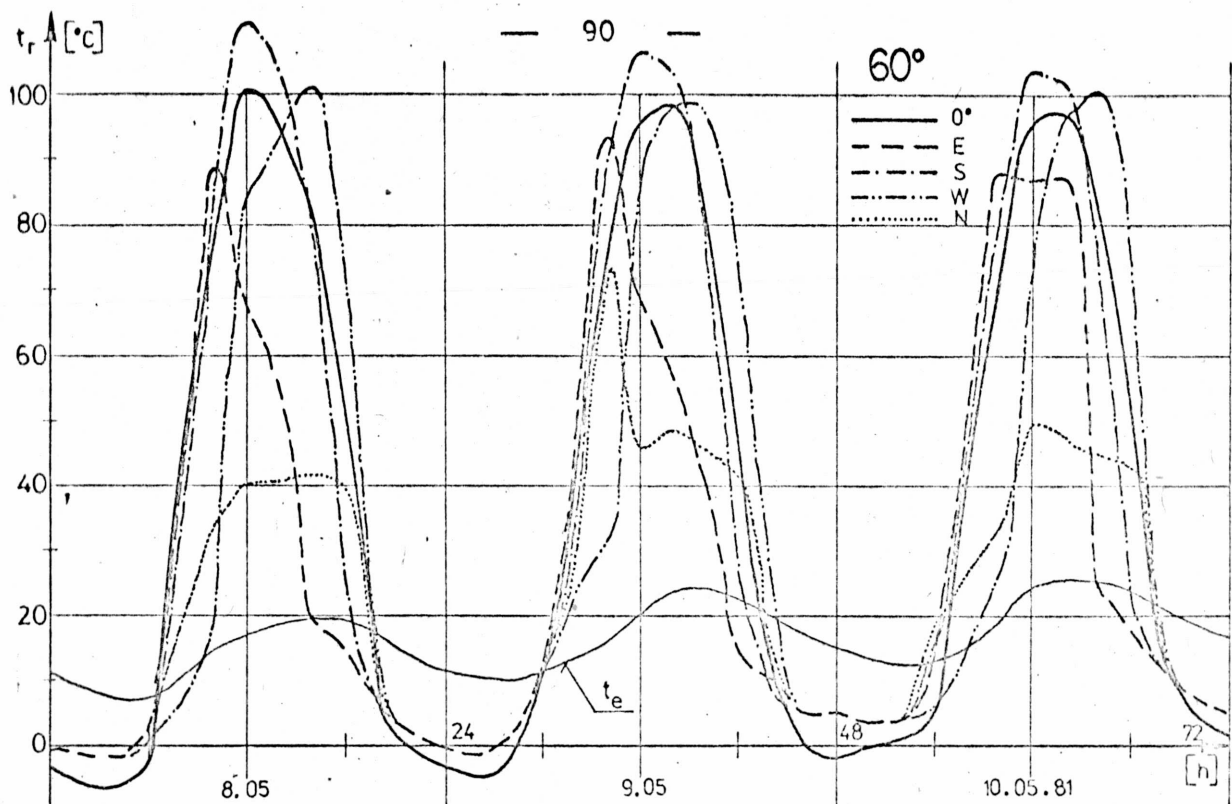
Rys. 7.16. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na zachód /W/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



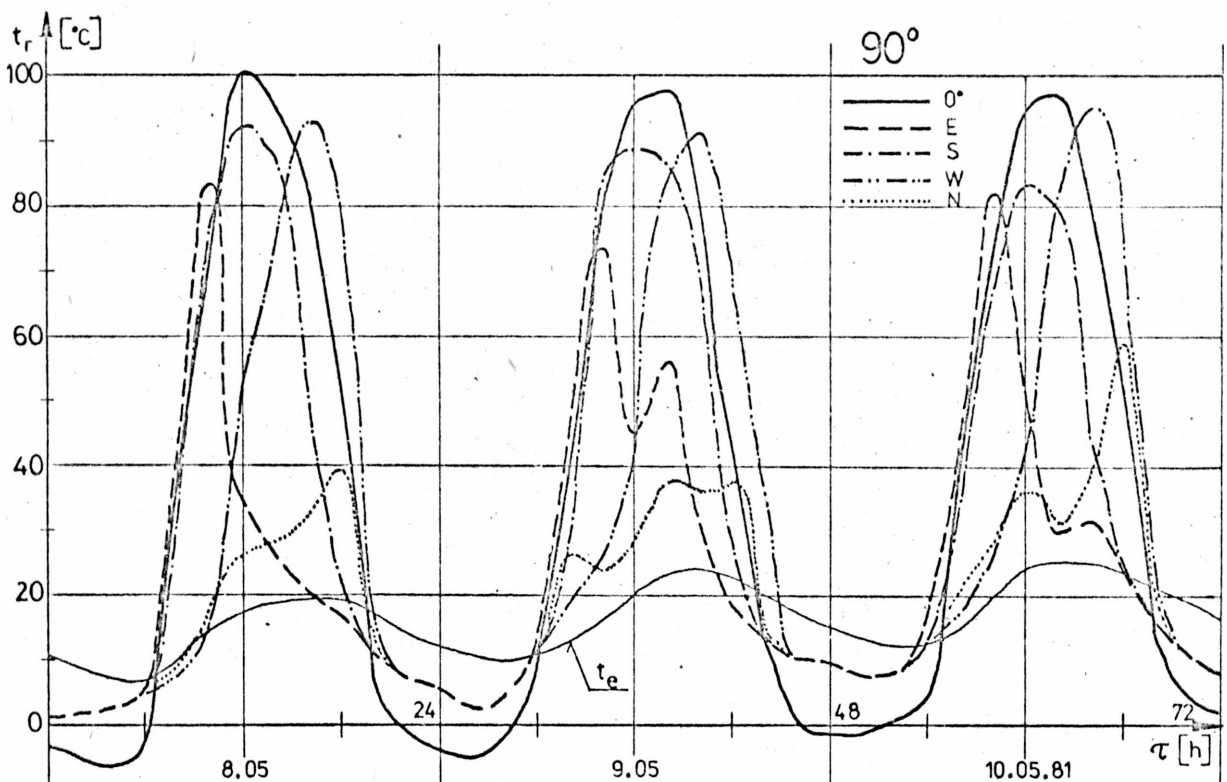
Rys. 7.17. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej zorientowanej na północ /N/ i nachylonej pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



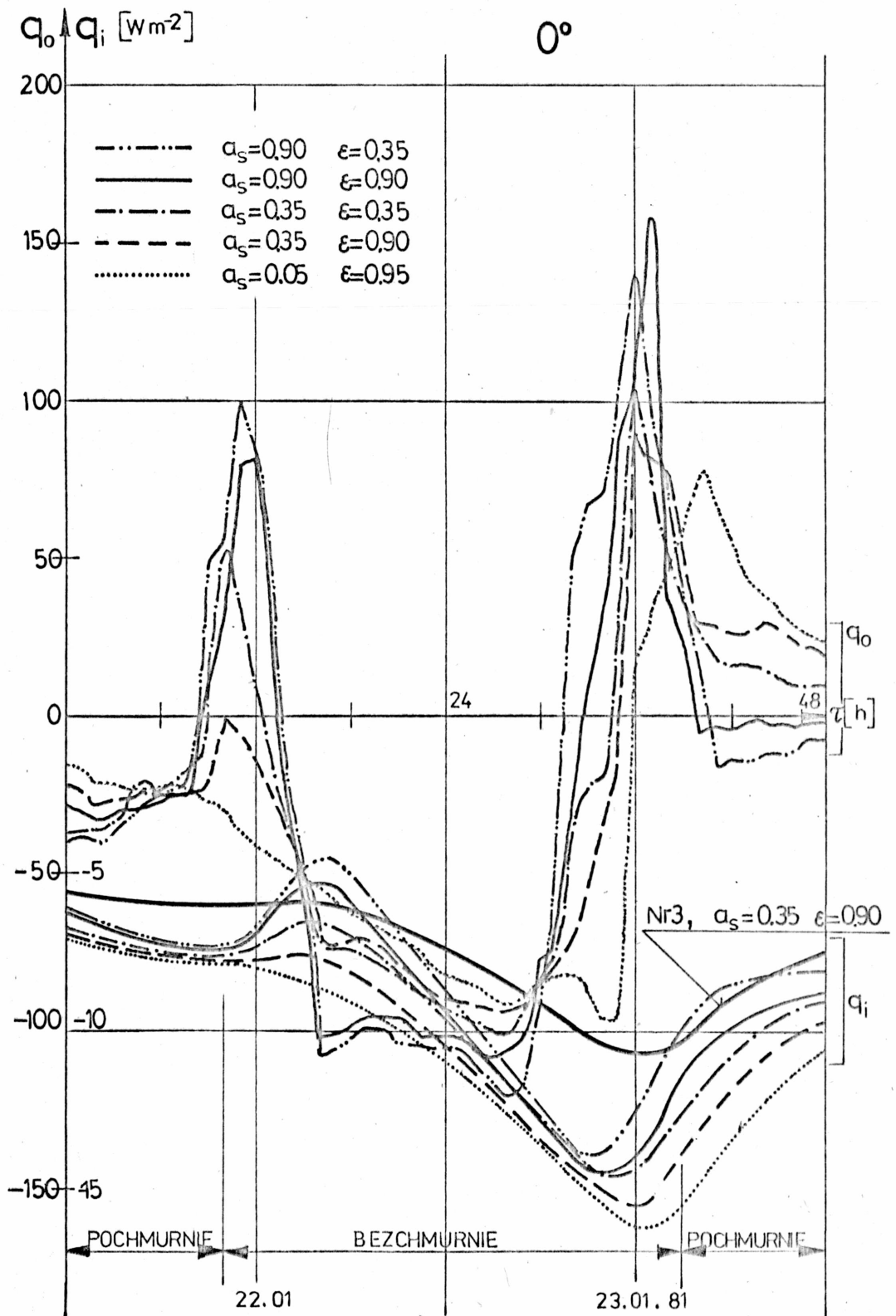
Rys. 7.18. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 30° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



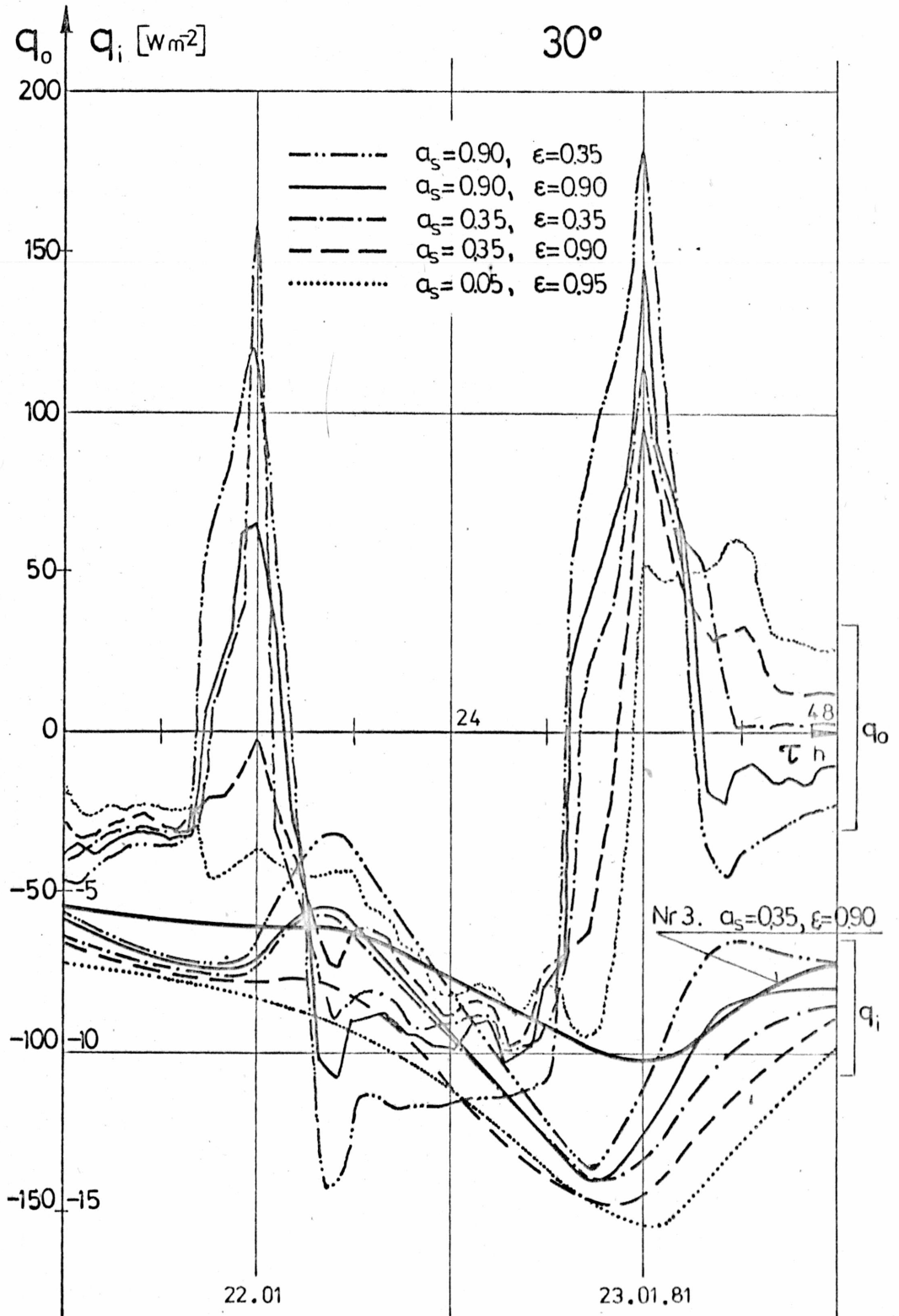
Rys. 7.19. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 60° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



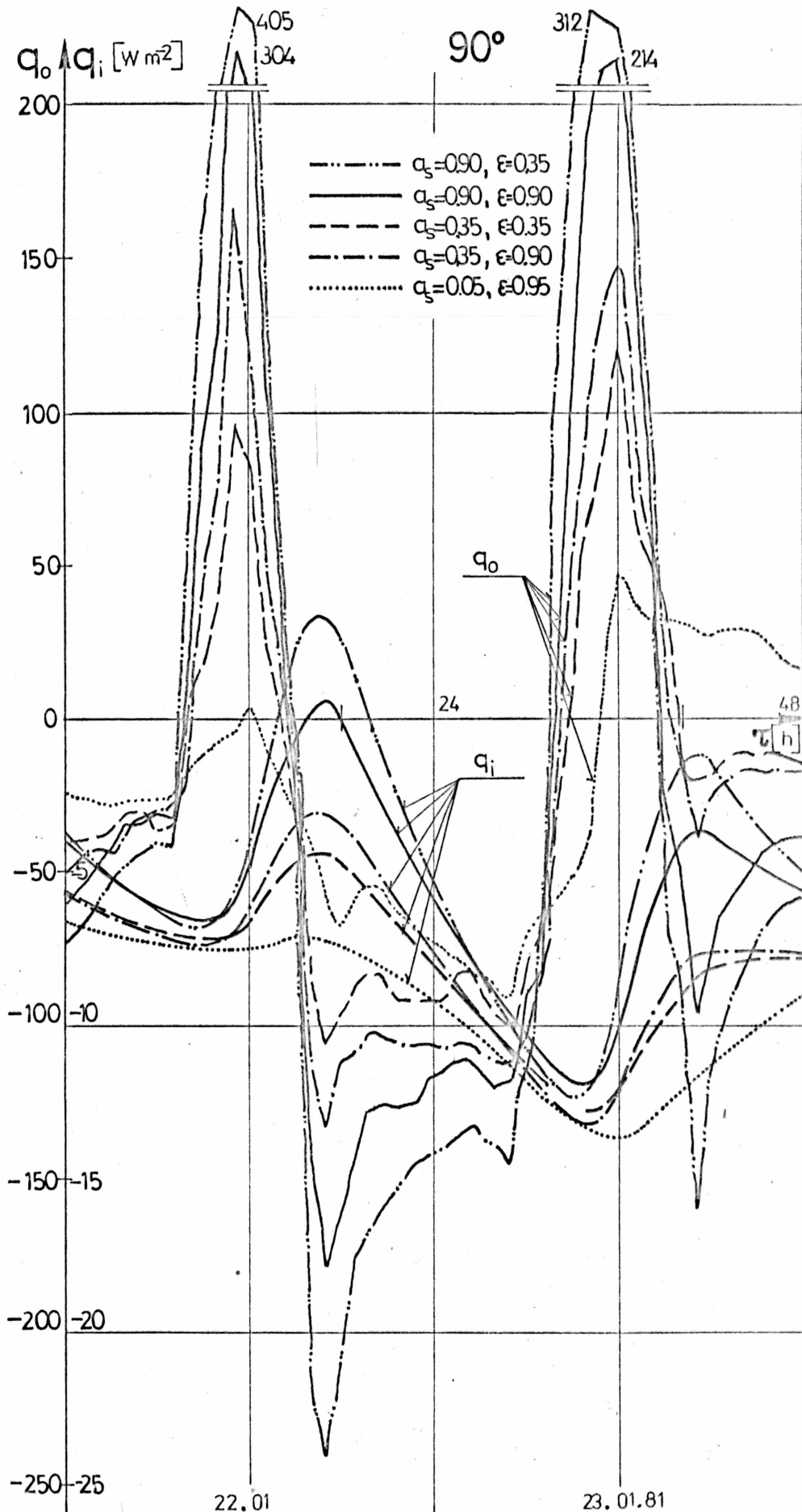
Rys. 7.20. Zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla przegrody budowlanej nachylonej pod kątem 90° i różnie zorientowanej względem stron świata na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



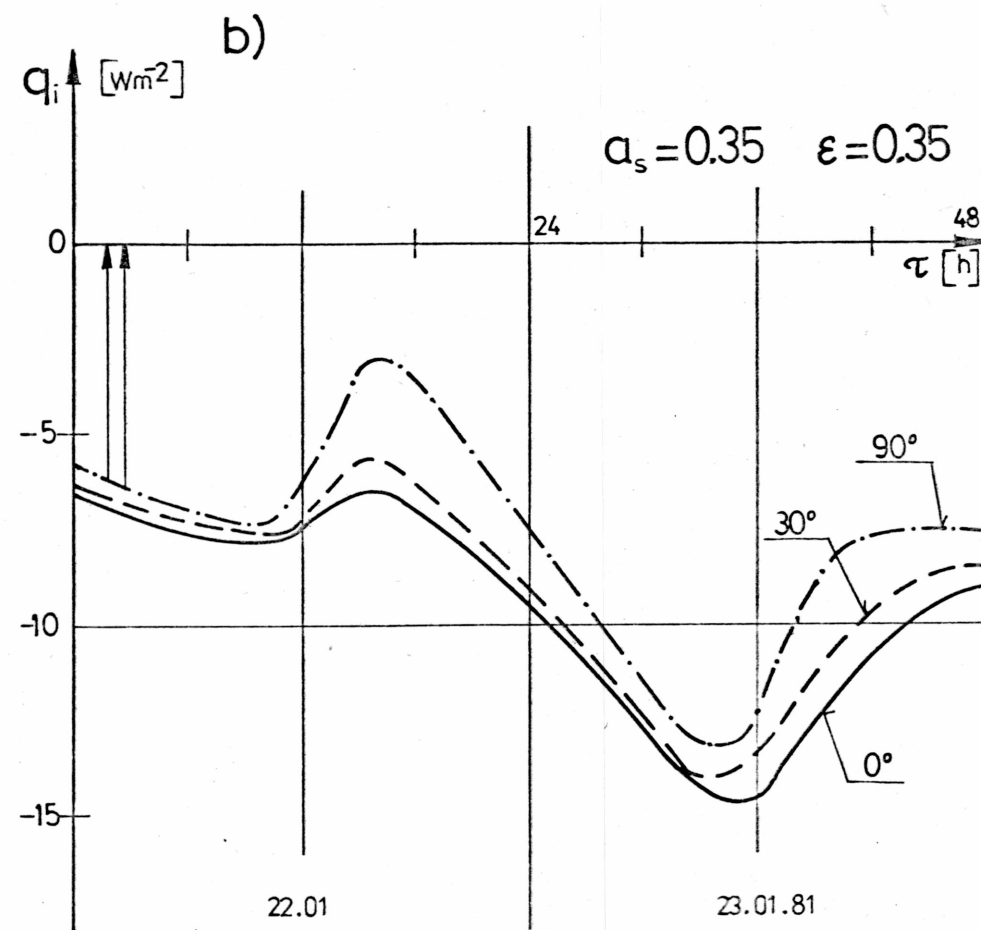
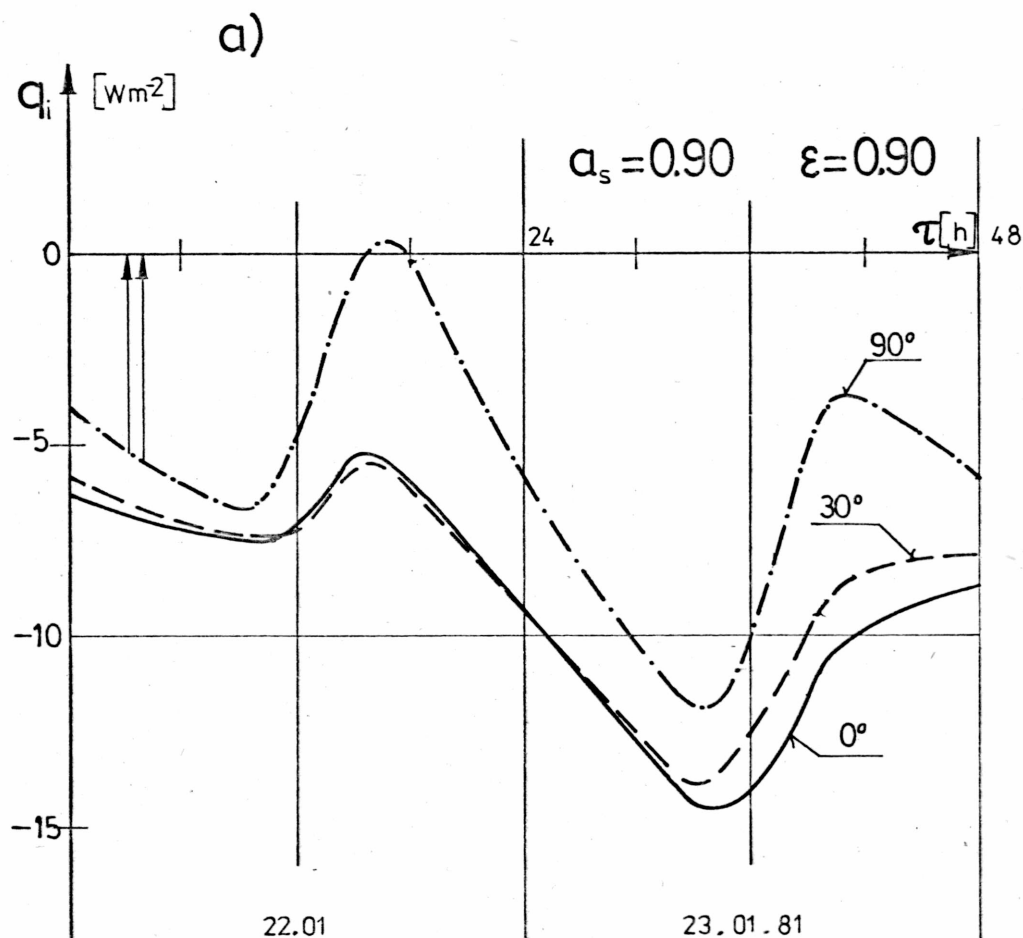
Rys. 7.21. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych na wewnętrznej q_i i zewnętrznej q_0 powierzchni stropodachów nr 1 i nr 3 dla różnych współczynników selektywności n . Kąty pochylenia stropodachów 0° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



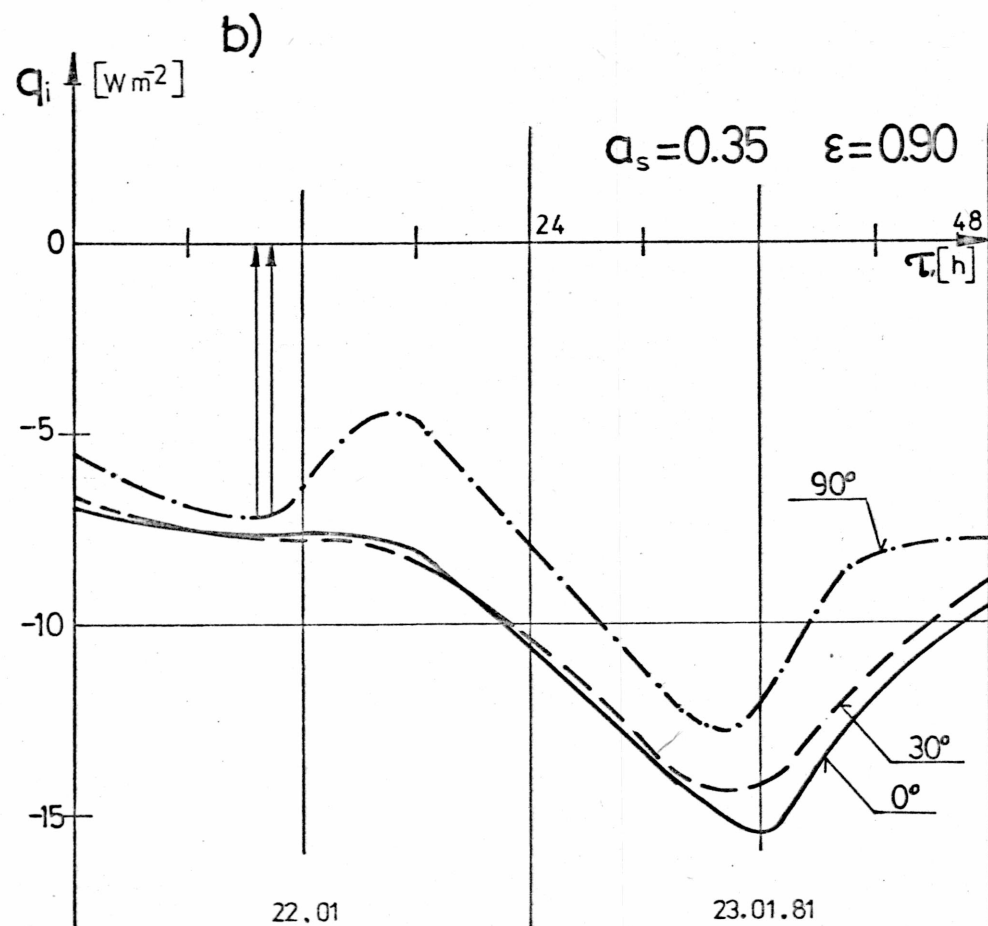
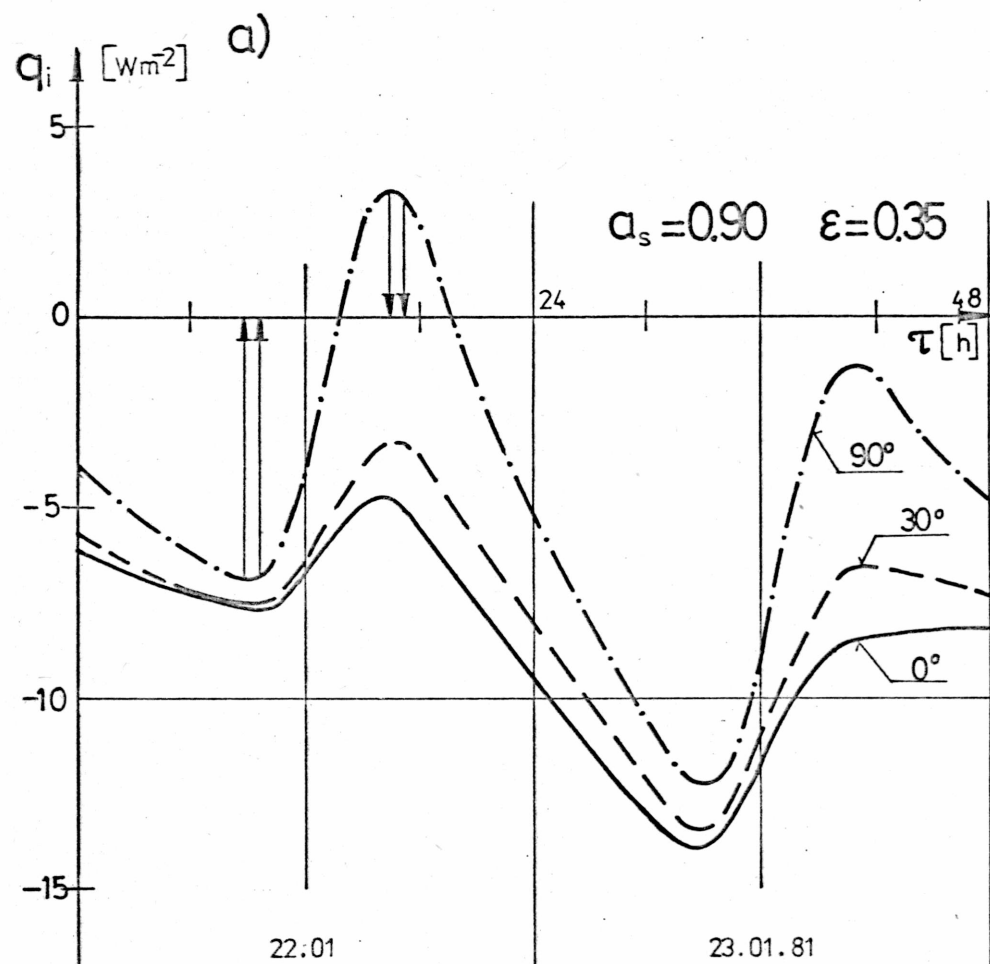
Rys. 7.22. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych na wewnętrznej q_i i zewnętrznej q_o powierzchni stropodachów nr 1 i nr 3, dla różnych współczynników selektywności n . Kąty pochylenia stropodachów 30° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



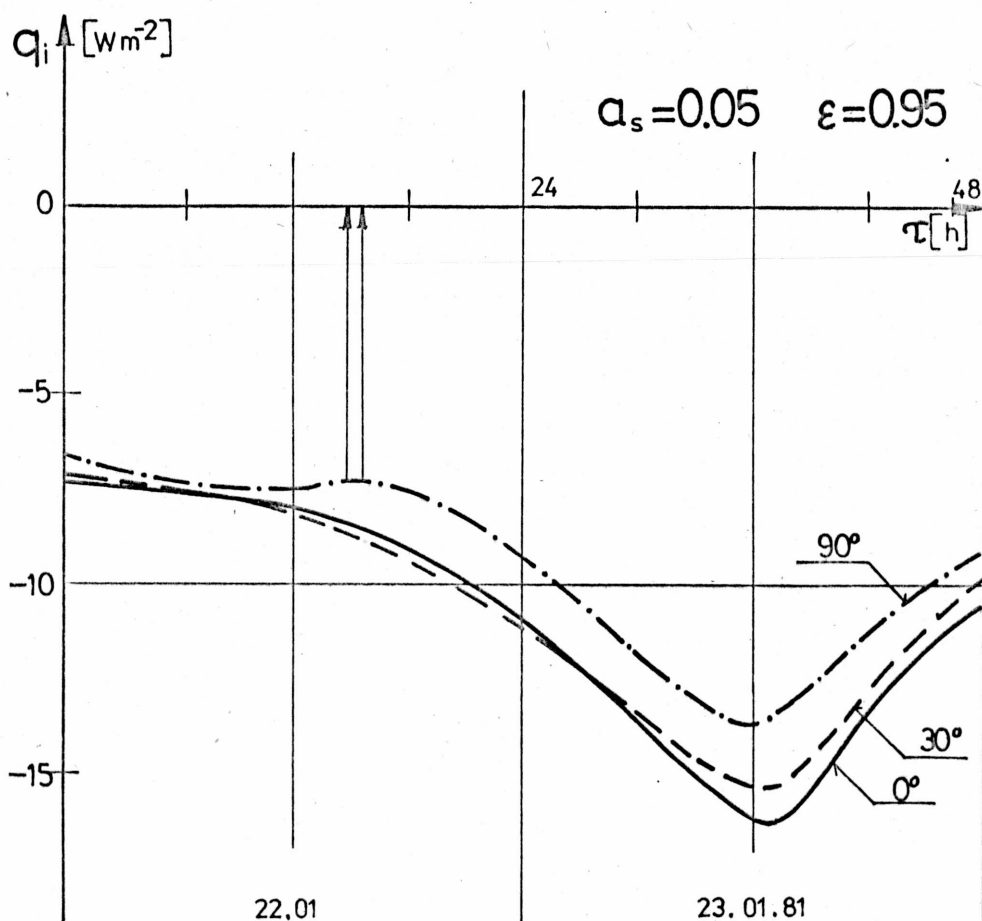
Rys. 7.23. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych na wewnętrznej q_i i zewnętrznej q_0 powierzchni przegrody budowlanej nr 1 dla różnych współczynników selektywności n . Kąt pochylenia przegrody 90° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



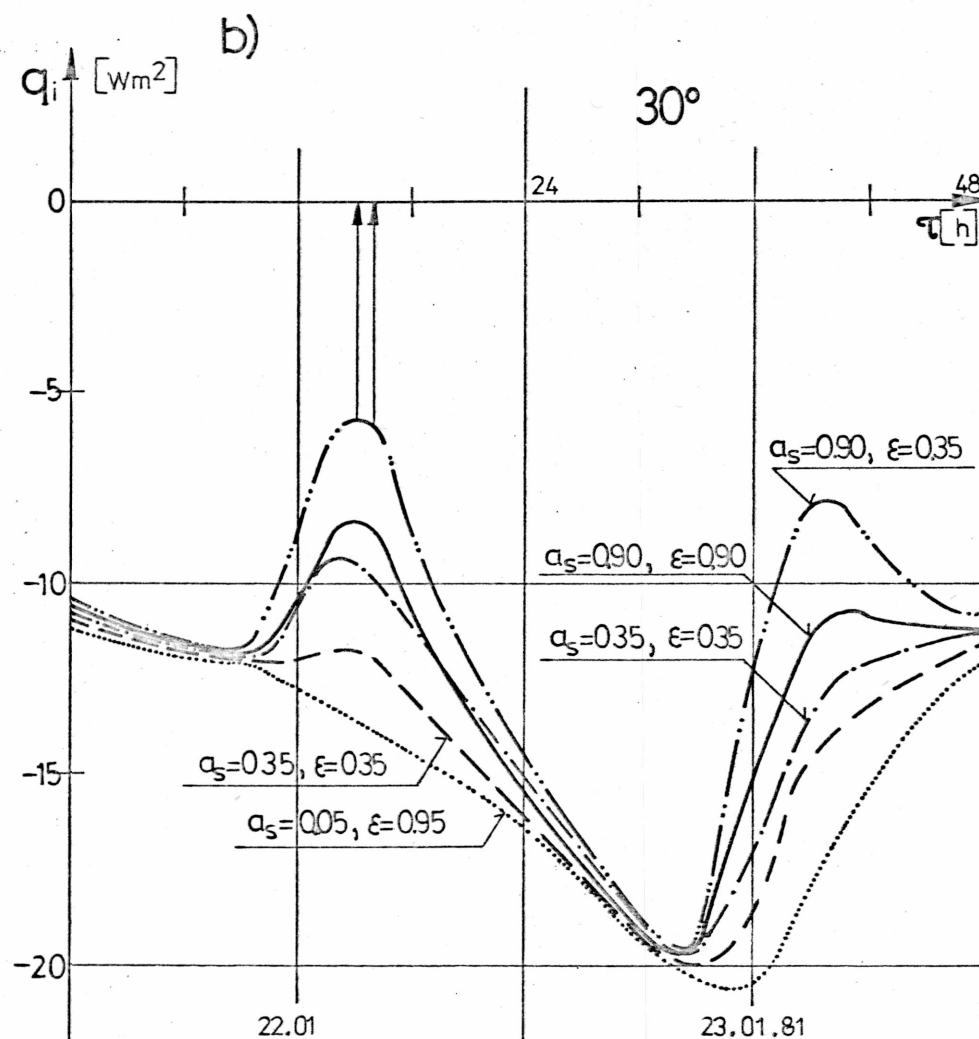
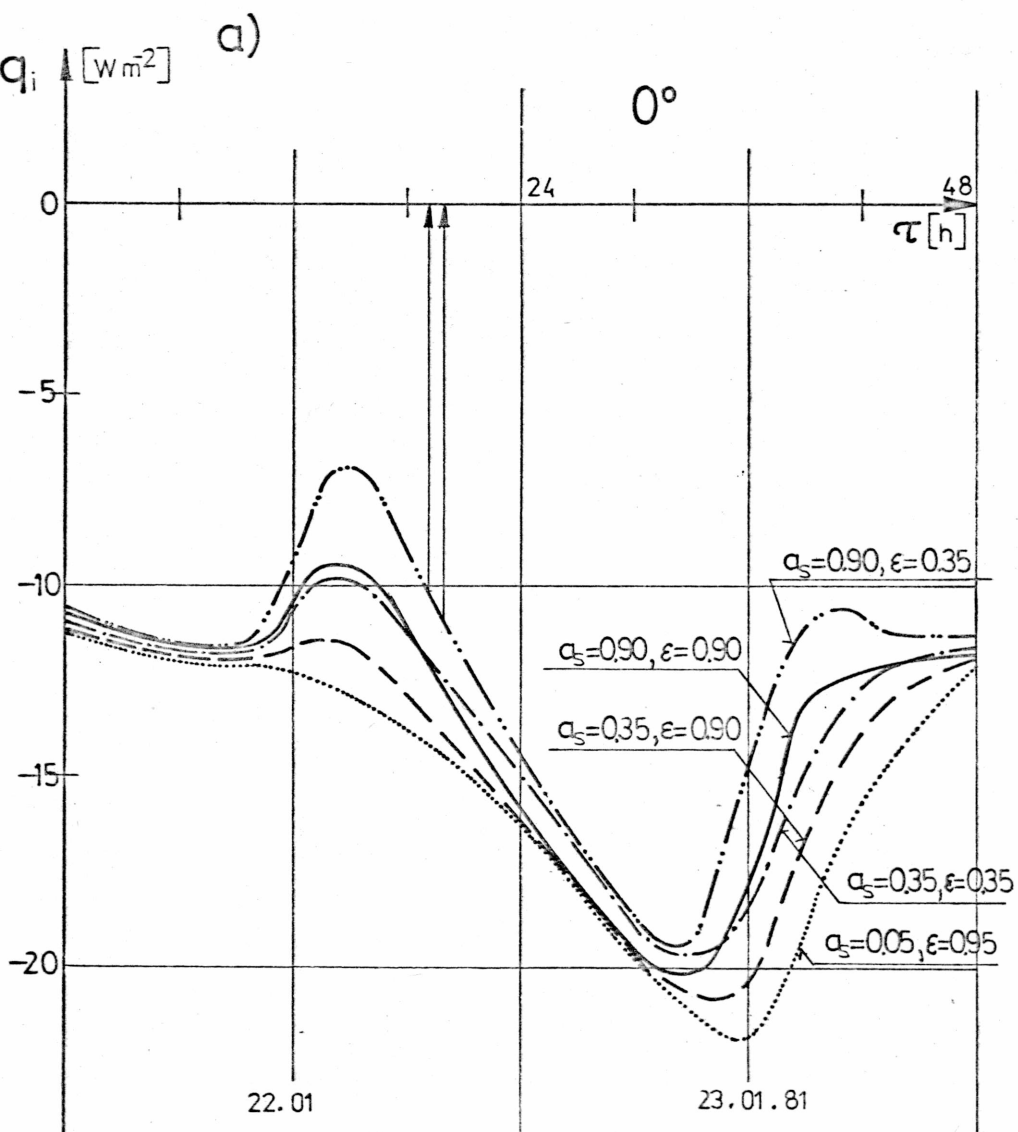
Rys. 7.24. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 1 dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzną powierzchnię przegrody charakteryzują współczynniki: /a/ $a_s=0,9$, $\epsilon=0.9$, /n=1.0/, /b/ $a_s=0.35$, $\epsilon=0.35$, /n=1.0/. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



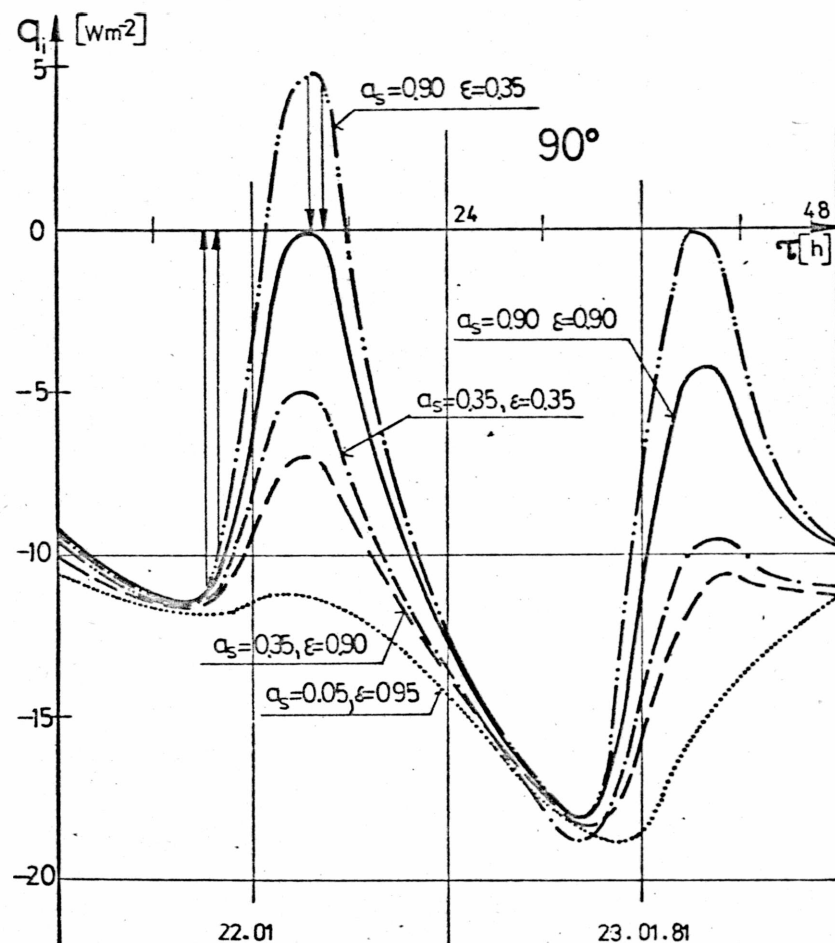
Rys. 7.25. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 1 dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzną powierzchnię przegrody charakteryzują współczynniki: /a/ $a_s = 0.90$, $\epsilon = 0.35$, /n=2.57/, /b/ $a_s = 0.35$, $\epsilon = 0.90$, /n=0.39/. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



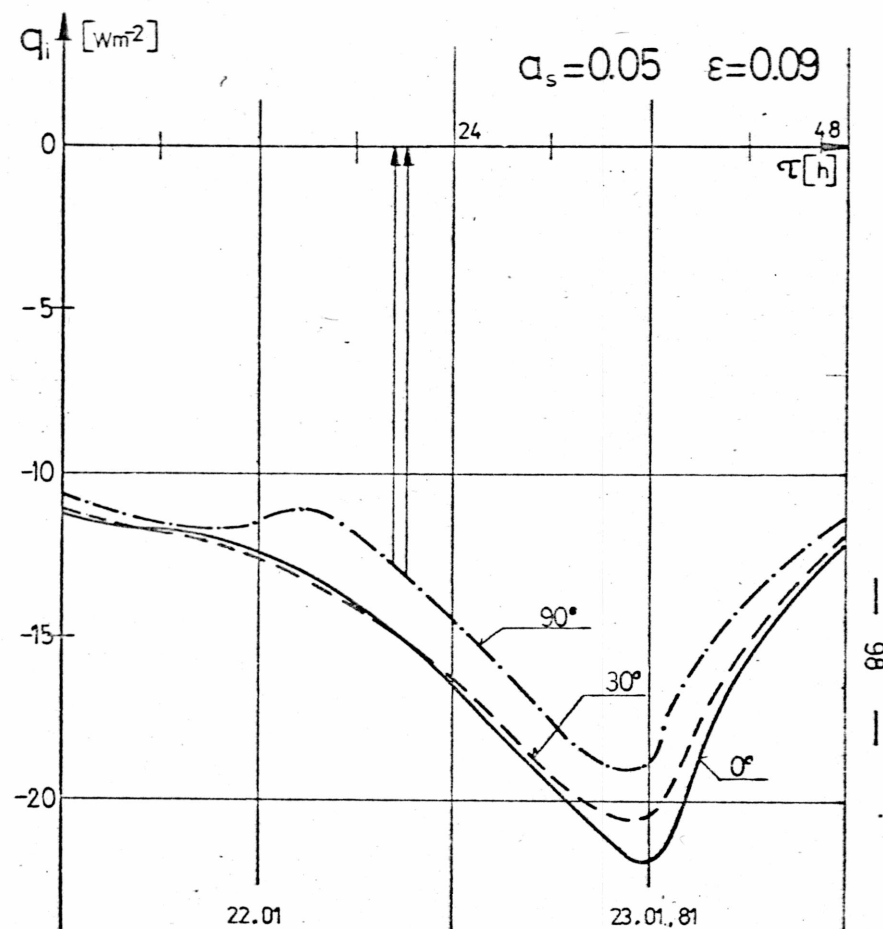
Rys. 7.26. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 1 dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzną powierzchnię przegrody charakteryzują współczynniki: $a_s = 0.05$, $\varepsilon = 0.95$, $/n = 0.05/$. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



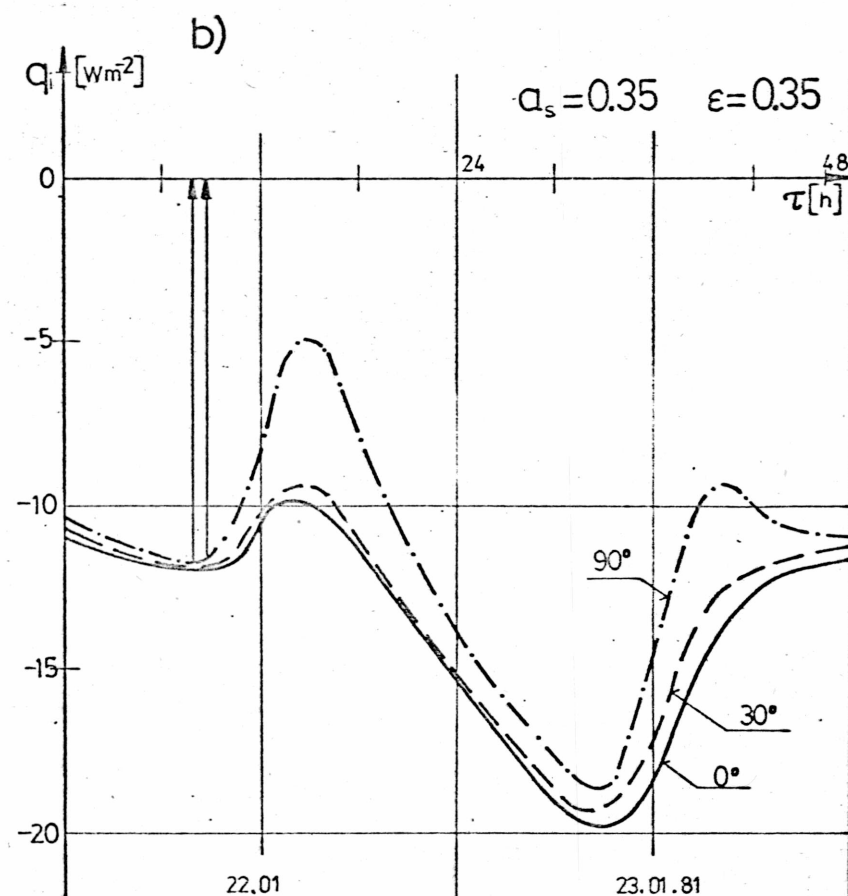
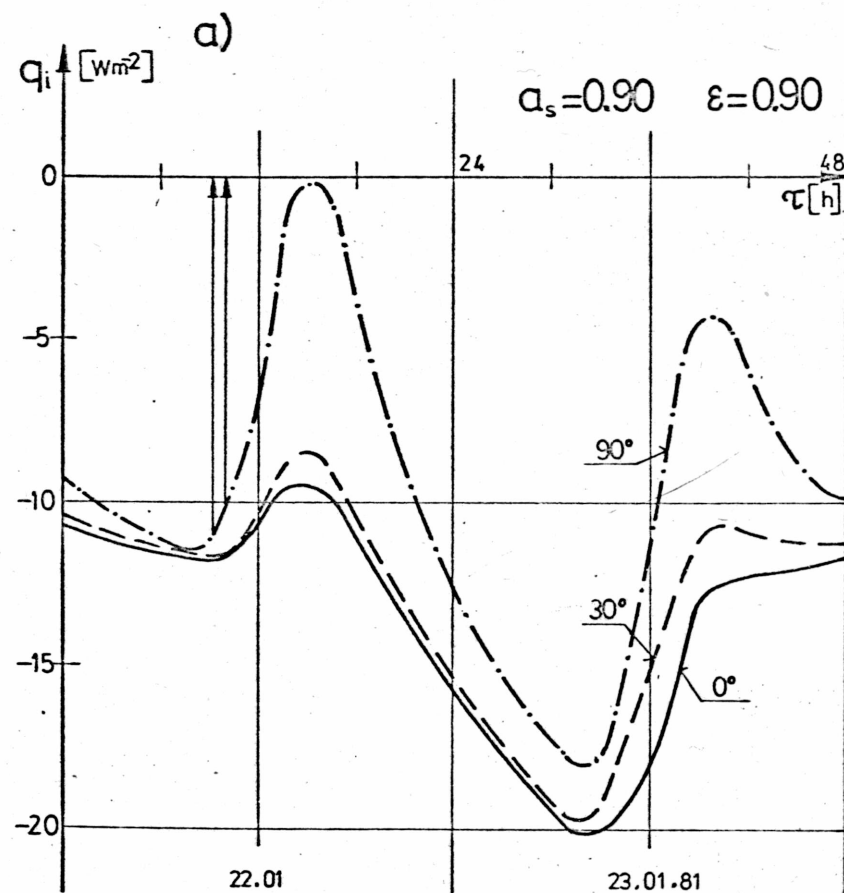
Rys. 7.27. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni stropodachu nr 2 dla różnych współczynników selektywności n . Kąt pochylenia stropodachu: /a/ 0° , /b/ 30° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



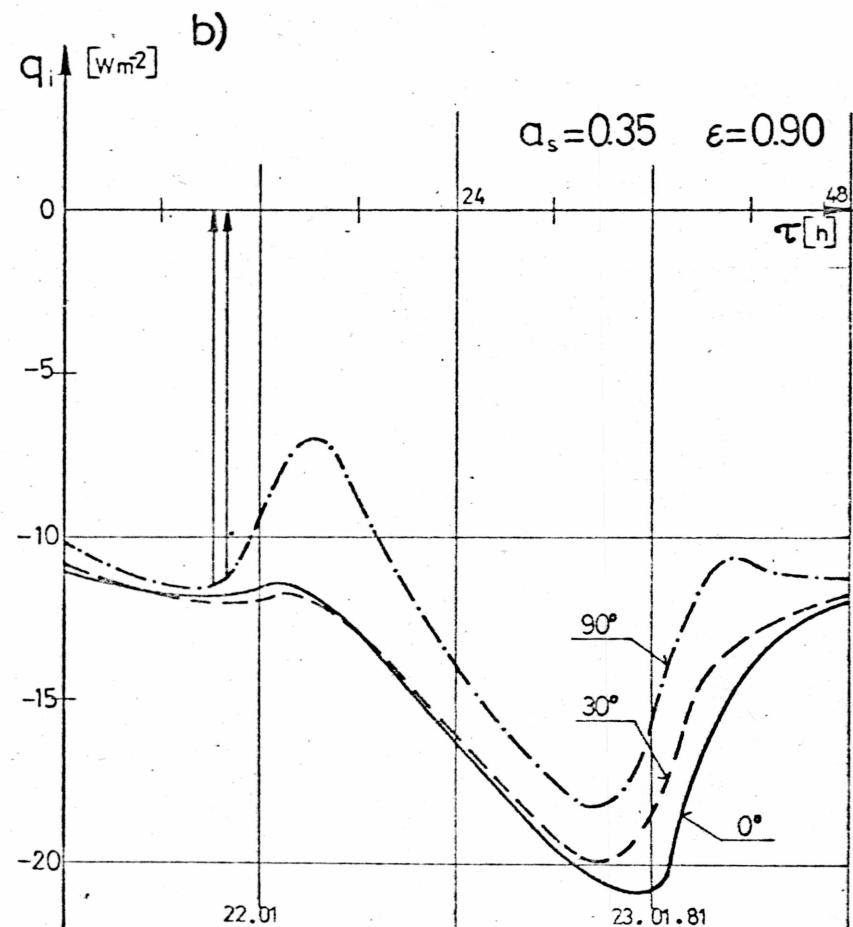
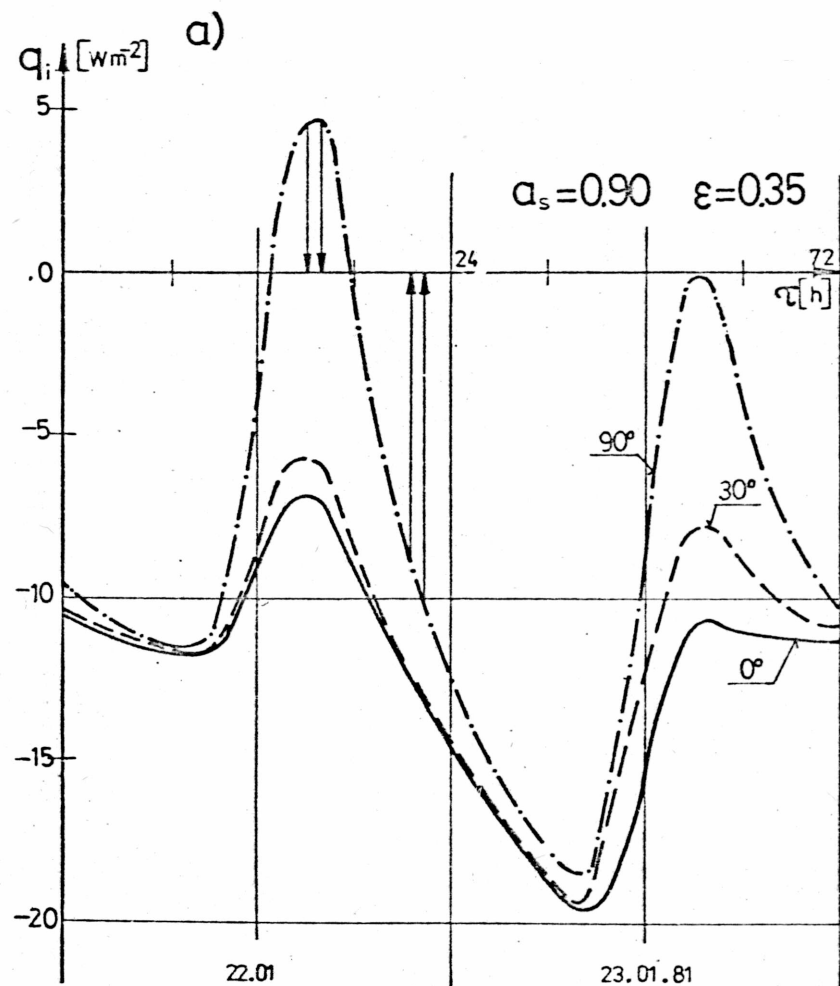
Rys. 7.28. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 2, dla różnych współczynników selektywności n . Kąt pochylenia przegrody 90° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku



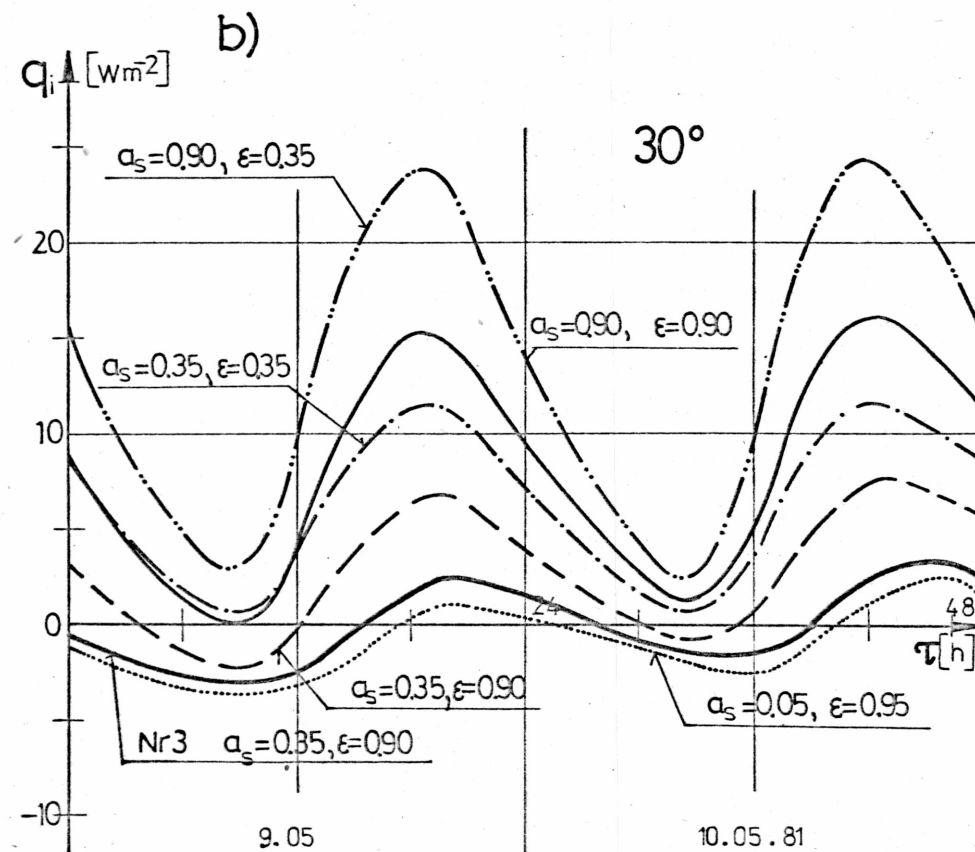
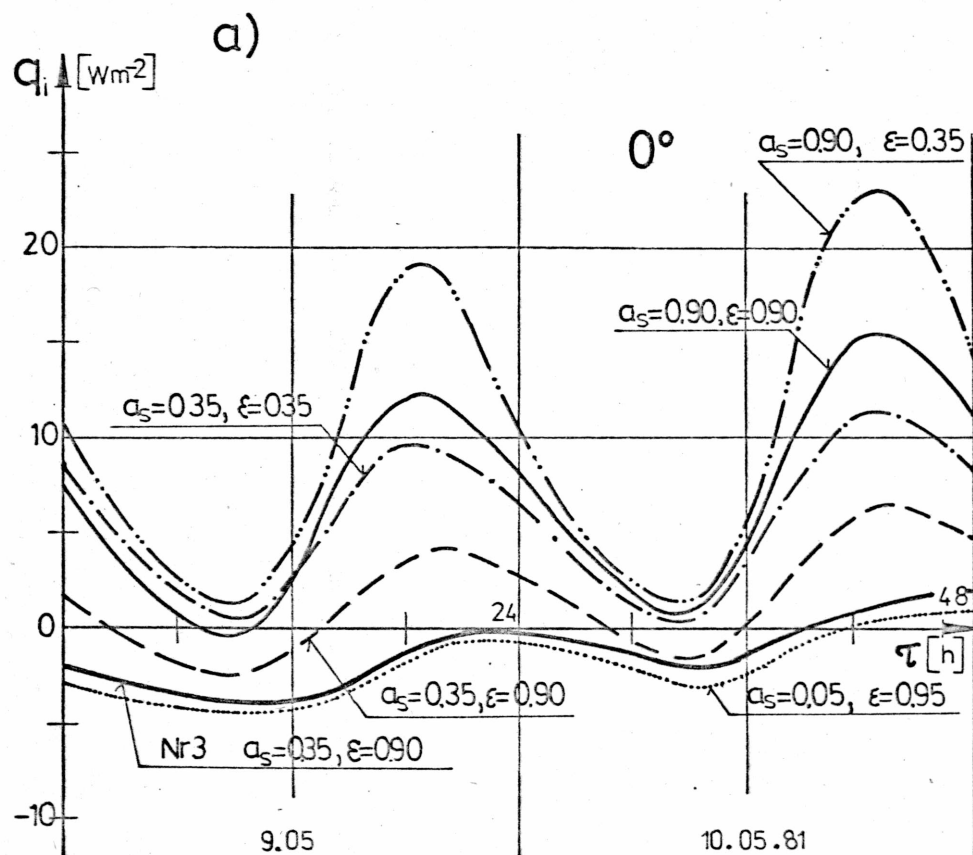
Rys. 7.29. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 2, dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzną powierzchnię przegrody charakteryzują współczynniki: $\alpha_s = 0.05$, $\varepsilon = 0.95$, $n = 0.05$. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



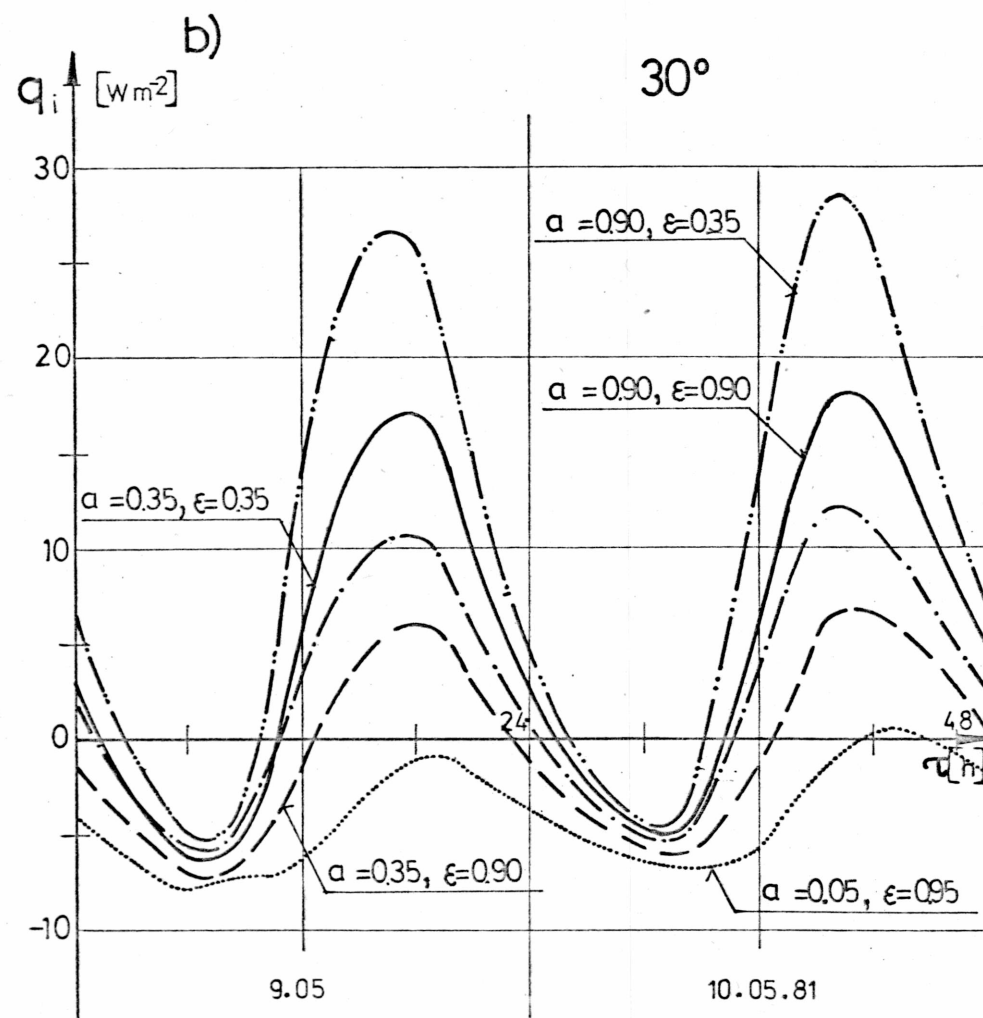
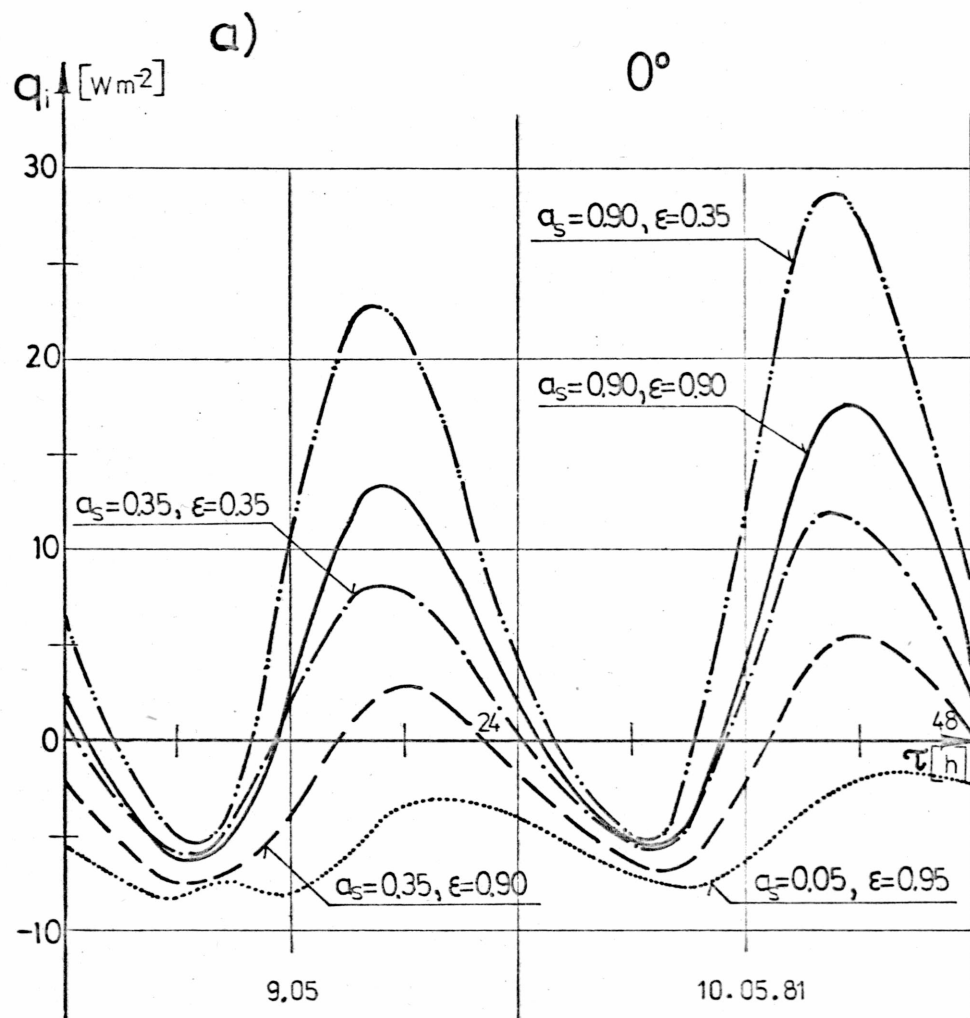
Rys. 7.30. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 2 dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzna powierzchnia przegrody charakteryzują współczynniki: /a/ $a_s=0.90$, $\varepsilon=0.90$, /n=1.0/, /b/ $a_s=0.35$, $\varepsilon=0.35$, /n=1.0/. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



Rys. 7.31. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni przegrody budowlanej nr 2 dla różnych kątów pochylenia. Zewnętrzna powierzchnię przegrody charakteryzują współczynniki: /a/ $a_s=0.90$, $\epsilon=0.35$, /n=2.57/, /b/ $a_s=0.35$, $\epsilon=0.90$, /n=0.39/. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



Rys. 7.32. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni stropodachów nr 1 i nr 3, dla różnych współczynników selektywności n . Kąty pochylenia stropodachów: /a/ 0°, /b/ 30°. Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



Rys. 7.33. Zmienność w czasie gęstości strumieni ciepłych q_i na wewnętrznej powierzchni stropodachu nr 2, dla różnych współczynników selektywności α . Kąt pochylenia stropodachu: /a/ 0° , /b/ 30° . Dane meteorologiczne przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.

8. DYSKUSJA

8.1. Radiacyjna wymiana ciepła między stropodachem a środowiskiem zewnętrznym.

Przy rozpatrywaniu nieustalonego przepływu ciepła przez stropodach, poddany oddziaływaniu zmiennych w czasie wielkości klimatycznych, można wyodrębnić trzy grupy zagadnień a mianowicie: procesy cieplne zachodzące w atmosferze, a zwłaszcza emisja promieniowania krótko- i długofalowego, procesy cieplne zachodzące na zewnętrznej powierzchni stropodachu i wreszcie nieustalone przewodzenie ciepła przez przegrodę wielowarstwową z uwzględnieniem warunków termicznych panujących w pomieszczeniu pod stropodachem. Całościowo zjawiska te ujmuje model przepływu ciepła przez stropodach opisany w rozdziale 2.2. Procesy cieplne, zachodzące w atmosferze uznano w niniejszej pracy za interesujące z punktu widzenia wpływu promieniowania środowiska zewnętrznego na zyski bądź straty ciepła stropodachów.

W dotychczasowych inżynierskich obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli, zarówno dla okresu zimowego jak i letniego, wpływ cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego uwzględnia się w sposób nie odzwierciedlający rzeczywistych zmian elementów tego środowiska i ich oddziaływania na przegrody budowlane. Dla okresu zimowego, w modelu ustalonej wymiany ciepła, zakłada się równość temperatury powietrza zewnętrznego i średniej temperatury promieniowania otoczenia w rzeczywistości zaś temperatury te nie są sobie równe. Rozbieżność między tymi temperaturami może być znaczna /rys. 7.5/, stąd wartość gęstości strumienia ciepła przepływającego /traconego/ przez stropodach, obliczona przy założeniu

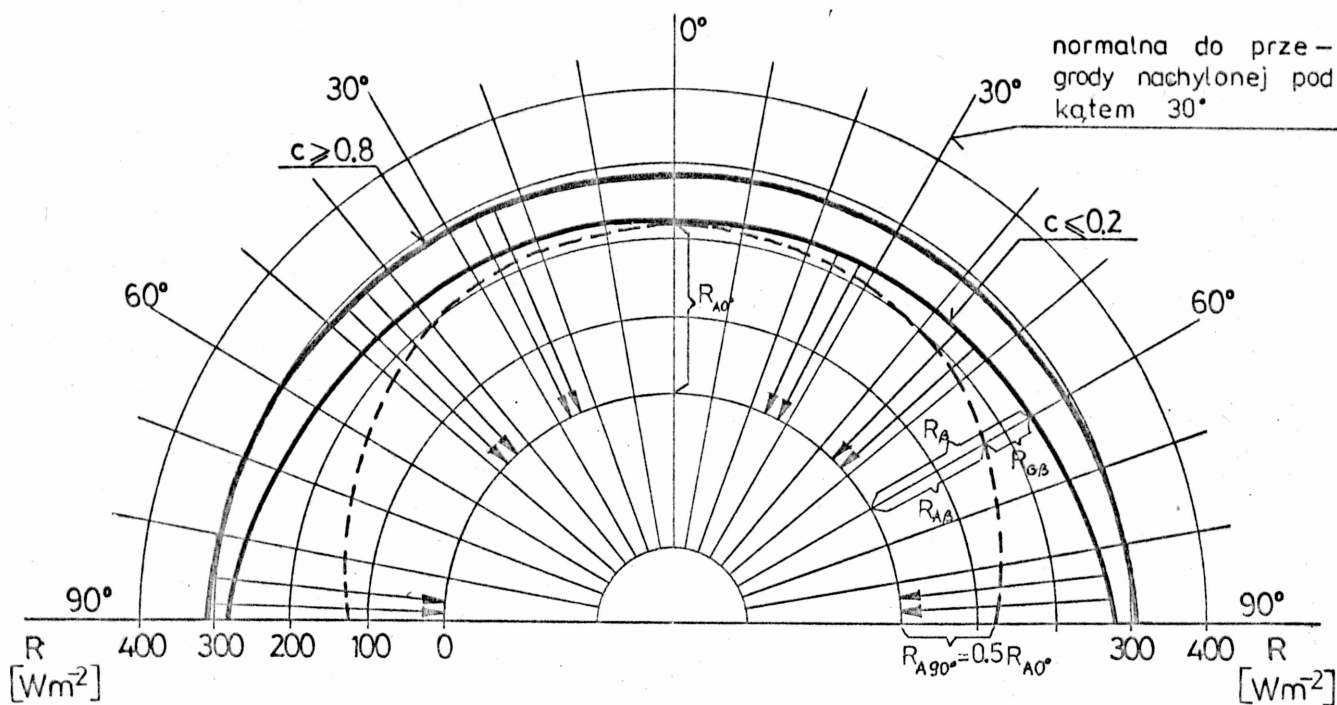
równości tych temperatur, może znacznie różnić się od wartości rzeczywistej.

Dla okresu poza sezonem ogrzewczym /od kwietnia do września/ obliczenia zysków ciepła od nasłonecznienia przez przegrody budowlane wykonuje się /Malicki [72], Mielnicki [77], Mielnicki, Żydanowicz [78] / w oparciu o słoneczną temperaturę powietrza, wprowadzoną przez Mackey'a i Wrighta [69], [70]. Temperatura ta nie uwzględnia wymiany ciepła przez promieniowanie długofalowe między przegrodą budowlaną a otaczającym ją środowiskiem fizycznym, nie opisuje więc w pełni termicznego oddziaływania tego środowiska.

Promieniowanie słoneczne i długofalowe promieniowanie środowiska stanowią dla stropodachu zyski ciepła, przy czym istotniejsze jest to pierwsze, zwłaszcza w miesiącach letnich, w których jego oddziaływanie na poziomą lub nachyloną pod niewielkim kątem płaszczyznę stropodachu jest najintensywniejsze /rys. 2.3/. Bezpośrednie /kierunkowe/ promieniowanie słoneczne decyduje o asymetrii pola promieniowania środowiska zewnętrznego, oddziałującego na zewnętrzną powierzchnię stropodachu. Asymetria ta przejawia się różną wartością natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego, docierającego do dowolnie zorientowanych i dowolnie pochylonych płaszczyzn. Długofalowe promieniowanie nieboskłonu, ze względu na swoją jednorodność, bardziej równomiernie oddziałuje na daną powierzchnię i jego wpływ na wielkość asymetrii pola promieniowania środowiska zewnętrznego jest mały.

W zakresie promieniowania długofalowego na poziomą płaszczyznę stropodachu oddziałuje jedynie promieniowanie nieboskłonu. Gdy kąt pochylenia stropodachu wzrasta, jego powierzchnia zewnę-

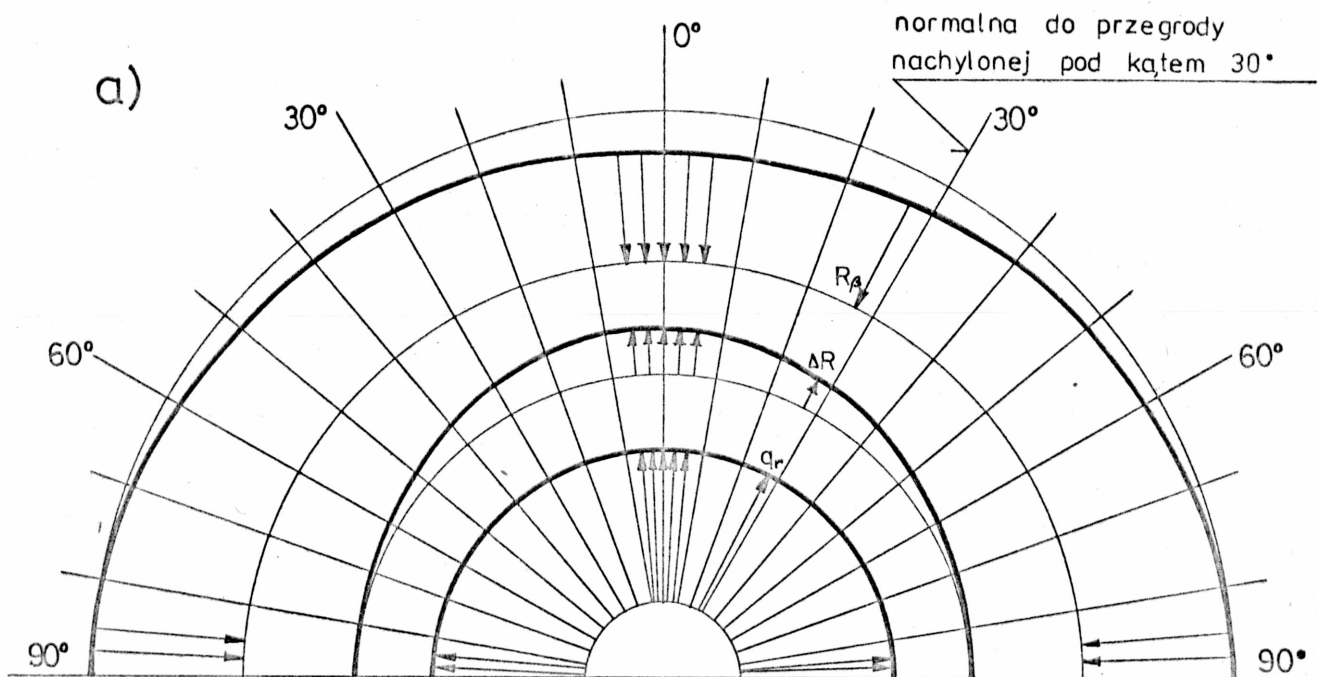
trzną "widzi" coraz to mniejszą część nieboskłonu i jednocześnie coraz to większą część powierzchni gruntu oraz otaczające obiekty, zaś ich łączne oddziaływanie w postaci promieniowania termicznego sumuje się, by dla kąta 90° /ściana pionowa/ osiągnąć maksymalną wartość /Cole [22] /. Przy bezchmurnym niebie do ściany pionowej dociera połowa wartości natężenia promieniowania nieba w stosunku do wartości jaka w tym czasie dochodzi do poziomego stropodachu oraz maksymalna wartość promieniowania gruntu i otaczających obiektów. Przy niebie całkowicie zachmurzonym intensywność długofalowego promieniowania środowiska, docierającego do poziomego stropodachu i do ściany pionowej, jest niemal identyczna. Oddziaływanie długofalowego promieniowania nieboskłonu i gruntu na przegrody budowlane zilustrowano na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Natężenie długofalowego promieniowania nieboskłonu gruntu dochodzącego do dowolnie pochylonych przegród budowlanych $/0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ/$ dla czystego $/C \leq 0,2/$ i całkowicie zachmurzonego nieba $/C \geq 0,8/$. Obliczenia wykonano według wzoru (2.15).

W warunkach bezchmurnego nieba w nocy do poziomego lub nachylnego pod niewielkim kątem stropodachu dociera najmniejsza wartość natężenia długofalowego promieniowania nieboskłonu /rys. 2.6 i 8.1/, stanowiąc najslabszą rekompensatę dla wypromieniowania energii przez przegrodę. W związku z tym straty ciepła stropodachu przez promieniowanie są wówczas największe zwłaszcza, że atmosfera jest w zakresie długości fal od $8\text{ }\mu\text{m}$ do $14\text{ }\mu\text{m}$ prawie całkowicie przepuszczalna dla promieniowania długofalowego /"okno atmosferyczne", rozdział 2.1.2/ a maksimum promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu przypada na fale o długości od $10\text{ }\mu\text{m}$ do $12\text{ }\mu\text{m}$ /Kneubühl i inni [59], [60]/. W wyniku tych strat temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu może osiągnąć temperaturę niższą od temperatury otaczającego powietrza i wówczas zachodzi zjawisko tzw. radiacyjnego chłodzenia stropodachu. Dla warunków bezchmurnego nieba w nocy, w bilansie cieplnym ścian zewnętrznych, efekt wymiany ciepła przez promieniowanie z otoczeniem jest pomijalnie mały /Reagan, Acklam [103], Rodriguez i inni [106], Sonderegger [117]/. Wynika to stąd, że straty ciepła przez promieniowanie przegród pionowych budynków kompensowane są porównywalnymi zyskami energii promienistej od sąsiadujących obiektów. Oznaczałoby to, że temperatury obliczeniowe powietrza zewnętrznego do obliczania strat ciepła przenikającego przez przegrody budowlane, powinny być zróżnicowane dla ścian zewnętrznych i dla stropodachów.

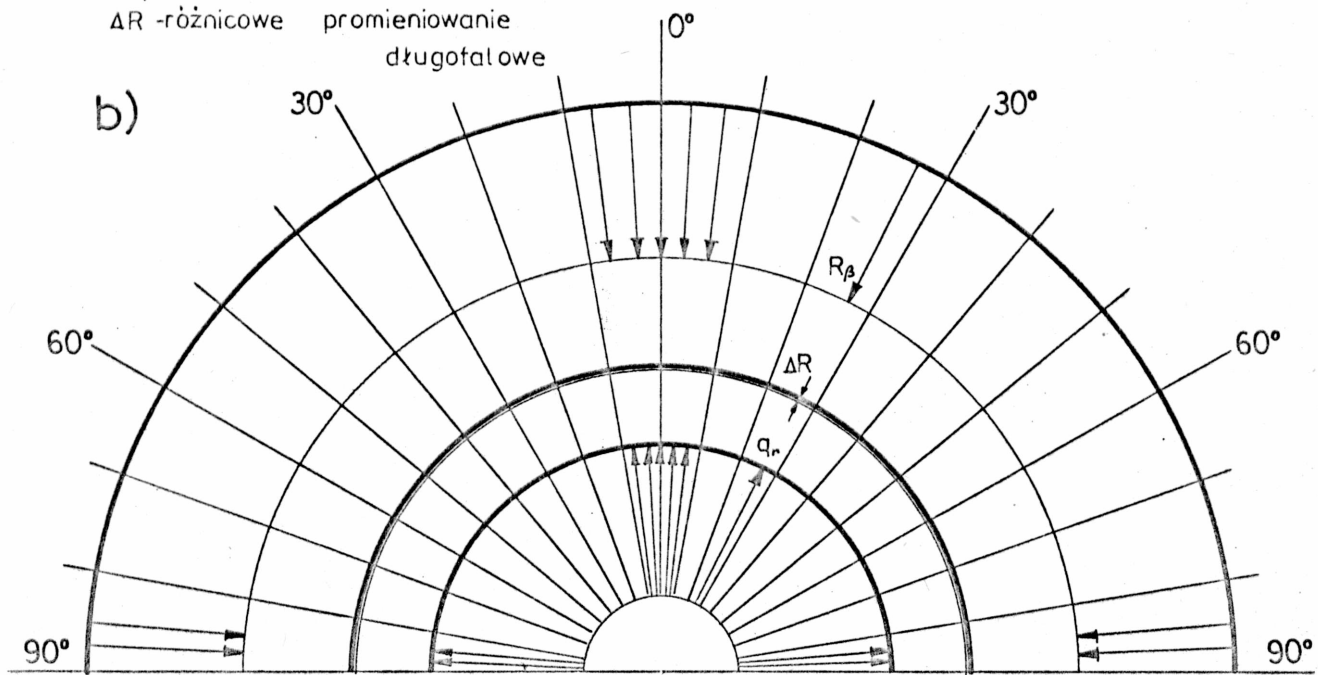
Obecność chmur powoduje wzrost natężenia długofalowego promieniowania nieboskłonu /rozdział 2.1.2/, co z kolei częściowo kompensuje radiacyjne straty ciepła stropodachu. Zachmurzenie nieba zmniejsza więc wypromieniowanie ciepła przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu.



q_r - natężenie promieniowania emitowanego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody budowlanej

R_β - długofalowe promieniowanie otoczenia

ΔR - różnicowe promieniowanie długofalowe



Rys. 8.2. Wymiana ciepła przez promieniowanie w nocy między dowolnie pochylonymi przegrodami budowlanymi a środowiskiem zewnętrznym: /a/ - w warunkach bezchmurnego nieba / $c \leq 0,2$ / /b/ - przy niebie całkowicie zachmurzonym / $c \geq 0,8$ /.

Na rysunku 8.2 przedstawiono efekty radiacyjnej wymiany ciepła między zewnętrzną powierzchnią dowolnie pochylonej przegrody budowlanej a środowiskiem zewnętrznym dla skrajnych wartości stopnia zachmurzenia nieba w porze nocnej. W danych warunkach dowolnie pochylona przegroda emituje radiacyjny strumień cieplny q_r , zaś na przegrodę oddziałuje promieniowanie nieboskłonu oraz ewentualnie gruntu i otaczających obiektów R_β . Największa różnica ΔR między strumieniami q_r i R_β , decydująca o radiacyjnych stratach ciepła, występuje w przypadku /a/ dla płaszczyzny poziomej /Badot [6], Coldicutt [20]/. Różnica ta maleje do zera dla $\beta = 90^\circ$. W przypadku /b/, różnica ΔR dla wszystkich kątów pochylenia jest pomijalnie mała - całkowite zachmurzenie nieba prawie zupełnie kompensuje radiacyjne straty cieplne przegród budowlanych. Przy niebie częściowo zachmurzonym różnica ΔR dla danego kąta pochylenia przyjmuje wartości pośrednie między wartościami ΔR dla przypadków /a/ i /b/.

8.1.1. Średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego. -----

W obliczeniach cieplnych z zakresu fizyki budowli często wygodniej jest, zamiast mocy promieniowania krótko- i długofalowego środowiska zewnętrznego traktowanych oddzielnie, stosować jedną wielkość, która reprezentowałaby ich łączne oddziaływanie radiacyjne na przegrodę budowlaną. Wielkością tą jest tak zwana średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego, która dla pory nocnej, z uwagi na występowanie jedynie długofalowego promieniowania nieboskłonu, zwana jest temperaturą nieboskłonu lub temperaturą

nieba /Monteith [82] /. Średnią temperaturę promieniowania środowiska zewnętrznego określa zależność:

$$t_r(\tau) = [R_{c\beta}(\tau) / \sigma]^{0.25} - 273.15 \quad (8.1)$$

gdzie:

- $t_r(\tau)$ - średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego, w całym zakresie widma promieniowania krótko- i długofalowego, w chwili τ [°C],
- σ - stała Stefana-Boltzmann [Wm⁻²K⁻⁴],
- $R_{c\beta}(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego, oddziałującego na przegrodę budowlaną nachyloną pod kątem β , w chwili τ [Wm⁻²]

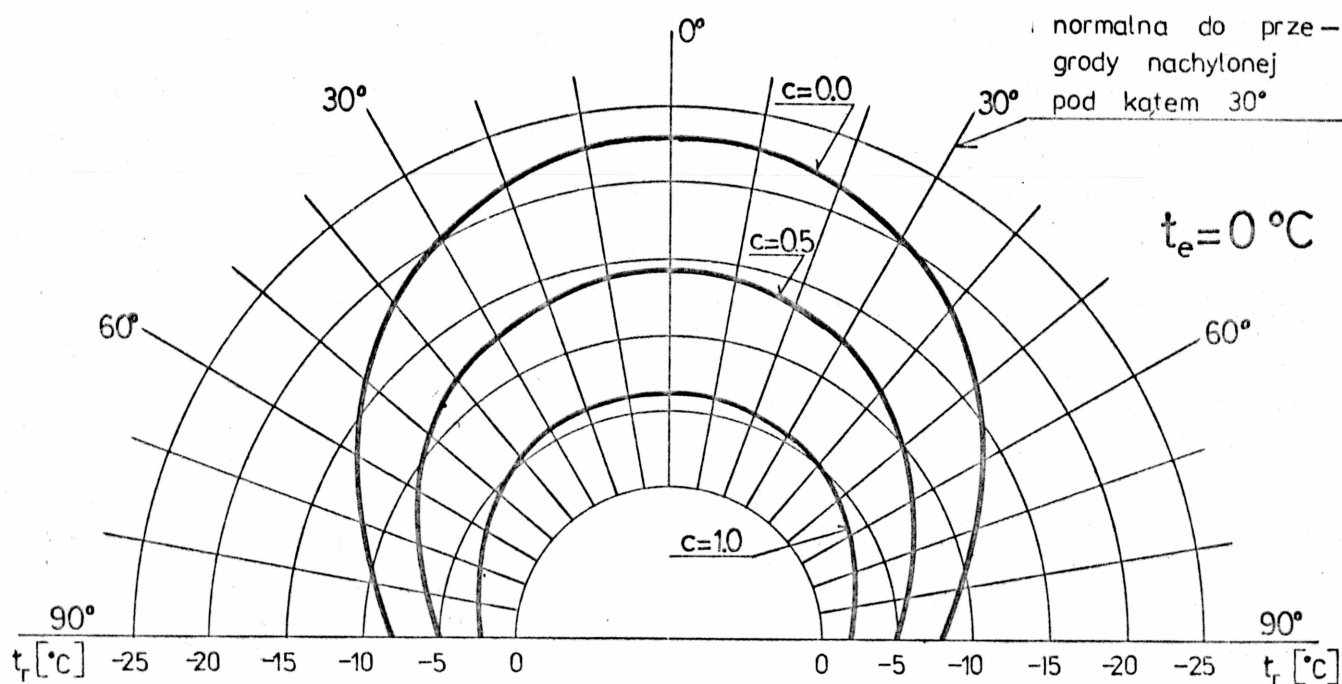
przy czym

$$R_{c\beta}(\tau) = R_{\beta}(\tau) + I_{T\beta}(\tau) \quad (8.2)$$

gdzie:

- $R_{\beta}(\tau), I_{T\beta}(\tau)$ - natężenie promieniowania, odpowiednio, długo- i krótkofalowego, oddziałującego na przegrodę budowlaną nachyloną pod kątem β , w chwili τ [Wm⁻²].

Na rysunku 8.3 przedstawiono wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego dla bezchmurnego, w połowie zachmurzonego i całkowicie zachmurzonego nieba w nocy, przy temperaturze powietrza 0°C, w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej. Wartości temperatury t_r obliczono ze wzoru (8.1), zaś wielkość R_{β} /w nocy $R_{c\beta} = R_{\beta}$ / wyznaczono z równania (2.15). W porze nocnej średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego t_r osiąga minimalną wartość dla powierzchni poziomej. Wraz ze wzrostem kąta pochylenia przegrody budowlanej wartość tej temperatury wzrasta, by osiągnąć maksimum dla przegrody pionowej. Zmienność ta jest charakterystyczna przy dowolnym stopniu



Rys. 8.3. Wartość średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego t_r dla bezchmurnego ($c=0$), w połowie zachmurzonego ($c=0,5$) i całkowicie zachmurzonego ($c=1$) nieba w nocy, w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej. Temperatura powietrza zewnętrznego $t_e=0^{\circ}\text{C}$; obliczenia wykonano na podstawie zależności (8.1).

zachmurzenia. Wzrost stopnia zachmurzenia sprawia jedynie, że oddziaływanie radiacyjne na przegrody poziome i pionowe jest bardziej równomierne. Przy bezchmurnym niebie różnica między wartościami temperatur t_r dla przegrody poziomej i pionowej, w warunkach przyjętych na rys. 8.3, wynosi 15°C podczas, gdy przy niebie całkowicie zachmurzonym różnica ta jest rzędu 4°C . Stwierdzony, na podstawie obliczeń, charakter radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, zarejestrowano również w trakcie badań wykonanych przez autora niniejszej pracy w styczniu 1981 roku /rysunki od 7.7 do 7.10/ oraz w maju 1981 r.,

/rysunki od 7.14 do 7.17/. Przytoczone wyniki badań obrazują dodatkowo zmienność w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego oraz pokazują zależność tej temperatury od usytuowania płaszczyzny przegrody budowlanej względem stron świata. Ta ostatnia zależność, związana z oddziaływaniem promieniowania słonecznego, została pokazana również na rysunkach od 7.11 do 7.13 oraz od 7.18 do 7.20.

Zależność (8.1) na obliczanie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego jest wyrażeniem ogólnym. Dla warunków czystego nieba w nocy temperaturę tę można określić w inny sposób. Przekształcając wzór Swinbanka (2.9) otrzymuje się:

$$T_r(\tau) = 0,0553 \cdot [T_e(\tau)]^{1,5} ; \quad (8.3)$$

Monteith [83] podaje zależność uzyskaną przez linearyzację wyrażenia (2.9) w postaci:

$$t_r(\tau) = 1,2 \cdot t_e(\tau) - 21 \quad (8.4)$$

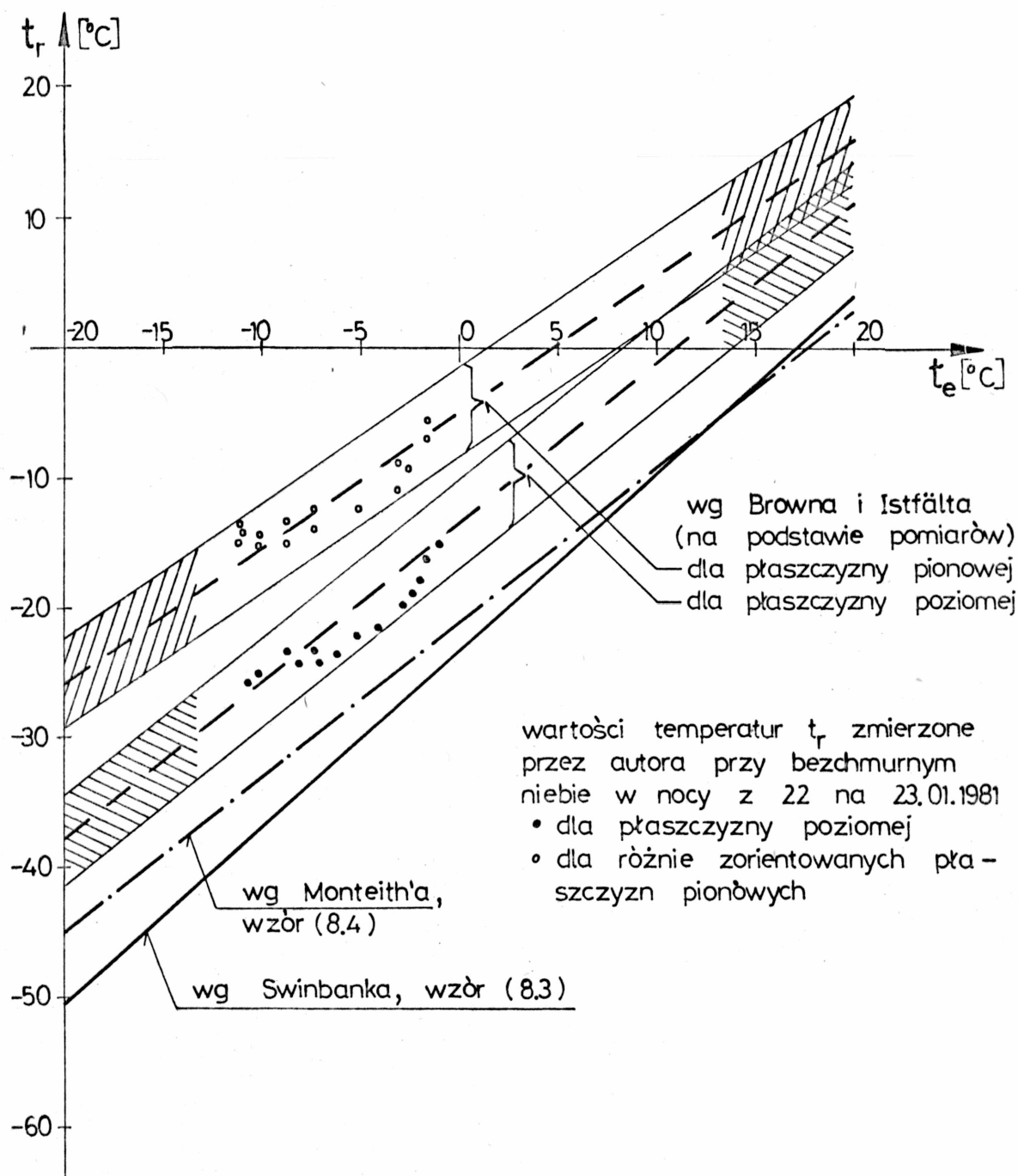
gdzie:

$T_r(\tau)$, $T_e(\tau)$ - temperatury, odpowiednio, nieboskłonu i otaczającego powietrza w chwili τ [K],

$t_r(\tau)$, $t_e(\tau)$ - temperatury, odpowiednio, nieboskłonu i otaczającego powietrza w chwili τ [°C].

Wzory (8.3) i (8.4) obowiązują jedynie dla przegrody poziomej.

Na rysunku 8.4 przedstawiono wartości temperatury nieboskłonu, w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, obliczone na podstawie powyższych zależności oraz wartości tej temperatury zmierzone przez Browna i Istfálta [11], a także wartości zmierzone przez autora niniejszej pracy. Pomiary wykonano dla przegrody poziomej



Rys. 8.4. Wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego w warunkach bezchmurnego nieba w nocy według różnych autorów.

i pionowej, obliczenia natomiast wykonano dla przegrody poziomej. Wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego zmierzone przez autora niniejszej pracy mieszczą się w zakresie pomiarowym, uzyskanym przez Browna i Istfálta. Obliczone z zależności (8.3) i (8.4) wartości temperatury t_r natomiast różnią się od pomierzonych. Największe różnice występują dla temperatur wyznaczonych ze wzoru (8.3), najczęściej cytowanego w literaturze. Wartości temperatur t_r , określone z tej zależności, są niższe średnio o 9°C od wartości zmierzonych przez autora przy temperaturze powietrza zmieniającej się od $-11,5^{\circ}\text{C}$ do -1°C oraz niższe o 7°C do 12°C od wartości zmierzonych przez Browna i Istfálta przy temperaturze powietrza od -20°C do 20°C . Wzór (8.3) obowiązuje dla czystego nieba w nocy. Wykazane różnice między temperaturami zmierzonymi i obliczonymi są wynikiem wpływu zanieczyszczenia atmosfery, które łagodzi "efekt zimnego nieba" /rozdział 2.1.2/. Wartości średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego dla warunków czystego nieba w porze nocnej będą więc dla obszarów przemysłowych i dużych miast wyższe niż to wynika z obliczeń teoretycznych.

8.2. Nieustalona wymiana ciepła między stropodachem a otoczeniem

8.2.1. Bilans cieplny stropodachu

Zyski ciepła przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu zeterminowane są przez wartość całkowitą promieniowania słonecznego, długofalowego promieniowania nieboskłonu oraz ewentualnie gruntu i otaczających obiektów, a także przez wielkość wymiany

ciepła przez konwekcję. Straty ciepła są natomiast wynikiem konwekcji i wypromieniowania energii do otoczenia.

Przy danym natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ ilość energii absorbowanej przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu zależy wyłącznie od wartości współczynnika absorpcji a_s dla tego zakresu widma promieniowania. Podobnie, przy danym natężeniu promieniowania nieboskłonu i otoczenia $R_\beta(\tau)$ ilość energii zależy jedynie od wartości współczynnika absorpcji dla promieniowania długofalowego $/a = \epsilon/$. Ilość energii emitowanej przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu, zgodnie z prawem Plancka, przy danej temperaturze jest funkcją współczynnika emisyjności ϵ . Natomiast zyski bądź straty ciepła przez konwekcję są funkcją współczynnika przejmowania ciepła $\alpha_k(\tau)$ i różnicy temperatur $/T_{os}(\tau) - T_e(\tau)/$.

Na podstawie analizy wyników pomiarów ze stycznia i z maja 1981 roku stwierdzono pewne prawidłowości w całodobowym przebiegu zarówno wartości elementów klimatycznych /zwłaszcza temperatury powietrza $T_e(\tau)$, natężenia całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ i natężenia promieniowania nieboskłonu i otoczenia $R_\beta(\tau)$; rysunki 7.1 i 7.2/ jak i wielkości będących wynikiem przepływu ciepła przez stropodach /temperatury powierzchni zewnętrznej $T_{os}(\tau)$ i wewnętrznej stropodachu $T_{is}(\tau)$ oraz gęstości strumieni cieplnych przy tych powierzchniach $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$; rys. 7.1 i 7.2/. Minimum temperatury powietrza $T_e(\tau)$ występuje zwykle podczas wschodu lub wkrótce po wschodzie Słońca, w chwili zahamowania przez promieniowanie słoneczne jej nocnego spadku. Następnie temperatura powietrza zaczyna wzrastać i o godzinie 14⁰⁰-15⁰⁰ osiąga maksimum, po czym następuje jej spadek, począt-

kowo szybszy, później wolniejszy, trwający aż do rana. Maksimum $T_e(\tau)$ pojawia się z opóźnieniem od 1 do 3 godzin w stosunku do astronomicznego południa, kiedy to natężenie całkowitego promieniowania słonecznego $I_T(\tau)$ oraz natężenie całkowitego promieniowania środowiska zewnętrznego $R_o(\tau)$ osiągają najwyższe wartości.

W poszczególnych dniach prawidłowość dobowego przebiegu temperatury powietrza może być zakłócona zmianami zachmurzenia, silnymi wiatrami, a przede wszystkim napływem mas powietrznych z innych obszarów. Krzywa dobowego przebiegu temperatury przybiera wtedy bardzo nieregularny kształt. Adwekcja /napływ powietrza z innych obszarów/ może nawet spowodować przesunięcie dobowego minimum na okres dnia, a dobowego maksimum na porę nocną /Radomski [102] /.

Wielkości $T_e(\tau)$, $I_{T\beta}(\tau)$, $R_o(\tau)$ wpływają istotnie na straty lub zyski ciepła przez stropodach, który poddany jest również oddziaływaniu środowiska termicznego pomieszczenia pod stropodachem. Temperatury jego powierzchni zewnętrznej $T_{os}(\tau)$ i wewnętrznej $T_{is}(\tau)$ oraz gęstości strumieni ciepłych przewodzonych przy powierzchniach, zewnętrznej $q_o(\tau)$ i wewnętrznej $q_i(\tau)$, cechują się charakterystycznym przebiegiem wynikającym z oddziaływań środowisk termicznych po obu stronach przegrody oraz z wpływu pojemności cieplnej przegrody. Temperatura na wewnętrznej powierzchni stropodachu $T_{is}(\tau)$ wykazuje mniejsze wahania /mniejszą amplitudę/ niż temperatura na zewnętrznej powierzchni $T_{os}(\tau)$ a maksimum wartości temperatury na wewnętrznej powierzchni jest przesunięte /opóźnione/ o pewien czas w stosunku maksymalnej wartości temperatury zewnętrznej powierzchni. Odnosi się to także do gęstości strumieni ciepłych $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$ /rys. 7.1 i 7.2/.

Wielkości meteorologiczne $T_e(\tau)$, $I_{T\beta}(\tau)$, $R_c(\tau)$ / oraz temperatury i gęstości strumieni cieplnych na obu powierzchniach granicznych stropodachu $T_{os}(\tau)$, $T_{is}(\tau)$, $q_o(\tau)$, $q_i(\tau)$ / wykazują charakterystyczne korelacje.

Zewnętrzna powierzchnia stropodachu zaczyna zyskiwać ciepło prawie zaraz po wschodzie Słońca /rys. 7.1 i 7.2/. Oddziaływanie zasadniczego źródła zysków ciepła, jakim jest bezpośrednie promieniowanie słoneczne, powoduje wzrost temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $T_{os}(\tau)$. Wzrost tej temperatury, przy prawie stałej w czasie w danych warunkach wartości długofalowego promieniowania nieboskłonu i najbliższego otoczenia, powoduje coraz to większe straty ciepła przez promieniowanie długofalowe /wzrost różnicowego promieniowania długofalowego skierowanego od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska; rys. 7.3 i 7.4/. Zyski ciepła od nasłonecznienia są jednak tak duże, że w efekcie stropodach zyskuje ciepło przez promieniowanie /ogrzewanie słoneczne/, przy mniejszych stratach przez konwekcję $T_{os}(\tau) > T_e(\tau)$ /. Gęstość strumienia ciepła $q_o(\tau)$, zyskiwanego przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu wzrasta, by około godziny 10⁰⁰-12⁰⁰ osiągnąć maksymalną wartość. Wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła $q_o(\tau)$ wzrasta również temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu $T_{os}(\tau)$ przy rosnącym natężeniu całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$. Wartości $T_{os}(\tau)$ i $I_{T\beta}(\tau)$ osiągają maksimum mniej więcej w tym samym czasie, około godziny 13⁰⁰ - 14⁰⁰ . Tak więc maksimum gęstości strumienia $q_o(\tau)$ pojawia się o 2-4 godziny wcześniej w stosunku do maksymalnych wartości $T_{os}(\tau)$ i $I_{T\beta}(\tau)$. Charakterystyczne jest również to, że zewnętrzna powierzchnia stropodachu przestaje

zyskiwać ciepło po 2-3 godzinach w maju i po 1-2 godzinach w styczniu od momentu pojawienia się maksymalnej wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego /rys. 7.1 i 7.2/. Tak więc, zewnętrzna powierzchnia stropodachu oddaje ciepło do otoczenia w sytuacji, gdy jeszcze przez kilka godzin poddana jest działaniu promieniowania słonecznego. Zjawisko to można tłumaczyć następująco: po nocnych stratach ciepła stropodach jest bardziej "chłonny", jeżeli chodzi o zyskiwanie energii cieplnej z zewnątrz. W związku z tym zaraz po wschodzie Słońca zaczyna gwałtownie zyskiwać ciepło od nasłonecznienia. Pojemność cieplna przegrody zostaje jednak wyczerpana jeszcze przed pojawieniem się maksymalnej wartości $I_{T\beta}(\tau)$. Ponieważ natężenie całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ nadal rośnie, zaś przegroda nie może więcej ciepła akumulować, wzrasta więc coraz bardziej temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu $T_{os}(\tau)$. Wskutek tego rosną straty ciepła przez konwekcję /wzrasta różnica temperatur $[T_{os}(\tau) - T_e(\tau)]$ /, które w chwili pojawienia się maksymalnej wartości temperatury $T_{os}(\tau)$ osiągają największą wartość. Zwiększające się konwekcyjne straty ciepła stropodachu powodują ciągłe zmniejszenie się wartości gęstości strumienia ciepła przy zewnętrznej powierzchni $q_o(\tau)$ mimo, że wartość $I_{T\beta}(\tau)$ w tym samym czasie wzrasta; nadal jednak bilans ciepła dla stropodachu jest dodatni, to znaczy stropodach zyskuje ciepło. Dopiero na kilka godzin przed zachodem Słońca zewnętrzna powierzchnia stropodachu zaczyna oddawać ciepło do otoczenia, ponieważ zyski ciepła od nasłonecznienia stają się mniejsze od strat przez konwekcję, a wektor różnicowego promieniowania długofalowego skierowany jest od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska. W nocy zewnętrzna

powierzchnia stropodachu traci ciepło przez promieniowanie długofalowe $/T_r(\tau) < T_{os}(\tau) /$, zaś zyskuje ciepło przez konwekcję $/T_{os}(\tau) < T_e(\tau) /$. Cały opisany proces trwa nieprzerwanie aż do momentu wschodu Słońca, po czym cyklicznie powtarza się.

W przypadku nieba zachmurzonego /21.01.1982, rys. 7.1/ opisane wyżej prawidłowości są mniej wyraziste, występują mniejsze różnice w wartościach elementów klimatycznych i wartościach $T_{os}(\tau)$, $T_{is}(\tau)$ oraz $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$. W nocy temperatura zewnętrznej powierzchni stropodachu nie osiąga wartości niższej od wartości temperatury powietrza.

8.2.2. Bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu

Zewnętrzna powierzchnia stropodachu równocześnie otrzymuje i oddaje energię promienistą; strumienie radiacyjne biorące udział w wymianie ciepła przez promieniowanie na tej powierzchni pokazano na rysunku 2.8 /rozdział 2.2.3/. Bilans promieniowania krótkofalowego /słonecznego/ na zewnętrznej powierzchni stropodachu ma postać:

$$q_s(\tau) = I_{Tp}(\tau) - (1-a_s)I_{Tp}(\tau) = a_s I_{Tp}(\tau) \quad (8.5)$$

gdzie:

- $I_{Tp}(\tau)$ - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę nachyloną pod kątem , w chwili τ , $[Wm^{-2}]$,
- a_s - współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni stropodachu dla promieniowania słonecznego,
- $(1-a_s)$ - współczynnik odbicia zewnętrznej powierzchni stropodachu dla promieniowania słonecznego,

Bilans promieniowania długofalowego natomiast opisuje równanie:

$$\begin{aligned} q_L(\tau) &= q_r(\tau) - R_\beta(\tau) - (1-\varepsilon)R_\beta(\tau) = q_r(\tau) - \varepsilon R_\beta(\tau) = \\ &= q_r(\tau) - q_L(\tau) \end{aligned} \quad (8.6)$$

gdzie:

$q_r(\tau)$ - gęstość strumienia ciepła emitowana przez zewnętrzną powierzchnię stropodachu /obliczana z wyrażenia (2.33)/ w chwili τ $[Wm^{-2}]$,

$R_\beta(\tau)$ - natężenie promieniowania długofalowego padającego na stropodach nachylony pod kątem β , w chwili τ $[Wm^{-2}]$,

ε - współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni stropodachu,

$(1-\varepsilon)$ - współczynnik odbicia zewnętrznej powierzchni stropodachu dla promieniowania długofalowego,

$q_L(\tau)$ - natężenie promieniowania długofalowego absorbowanego przez stropodach w chwili τ $[Wm^{-2}]$.

Wielkość $q_L(\tau)$ - zwana jest również promieniowaniem efektywnym /Bac, Rojek [5] /. Różnica między pochłoniętym całkowitym promieniowaniem słonecznym a promieniowaniem efektywnym stanowi całkowity bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu:

$$R_n(\tau) = q_s(\tau) - q_L(\tau) \quad (8.7)$$

Po podstawieniu otrzymujemy:

$$R_n(\tau) = q_s(\tau) + q_l(\tau) - q_r(\tau) \quad (8.8)$$

Na rysunkach 7.3 i 7.4 przedstawiono, odpowiednio dla miesięcy stycznia i maja, bilans promieniowania krótkofalowego $q_s(\tau)$ - długofalowego $q_L(\tau)$ oraz całkowity bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu $R_n(\tau)$.

Poszczególne składowe równania całkowitego bilansu promieniowania (8.7) wykazują określone prawidłowości przebiegu dobowego i rocznego. Wyniki dla miesiący stycznia /rys. 7.3/ i maja /rys. 7.4/, różniących się długościami dnia i kątami padania promieni słonecznych, świadczą o istotnym wpływie czynnika astronomicznego - regularnego pozornego ruchu Słońca nad horyzontem - na efekty wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu.

Zjawiska związane z bilansem promieniowania krótkofalowego $q_s(\tau)$ rozpoczynają się od wschodu Słońca, największą intensywność osiągają w godzinach południowych i kończą się wraz z zachodem. Ze względu na znikomy przychód promieniowania krótkofalowego przy niskim położeniu tarczy słonecznej nad horyzontem, ujemne wartości całkowitego bilansu promieniowania $R_n(\tau)$ obserwowano również po wschodzie i przed zachodem Słońca. Dobowy przebieg godzinnych wielkości $R_n(\tau)$ w styczniu wykazywał wartości dodatnie od około godziny 8³⁰ do 15⁰⁰ - przez 6,5 godziny /rys.7.3/, podczas gdy usłonecznienie możliwe wynosi około 8,5 godziny, zaś w maju /rys. 7.4/ od około godziny 6⁰⁰ do 19⁰⁰ czyli 12,5 godziny, podczas gdy usłonecznienie możliwe wynosi około 15 godzin.

Zjawiska związane z bilansem promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$ trwają bez przerwy przez całą dobę. Całkowity bilans promieniowania $R_n(\tau)$ od zachodu do wschodu Słońca odpowiada wielkościom bilansu promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$.

Wartość składowej $q_r(\tau)$ bilansu promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$, odpowiadająca emisji promieniowania zewnętrznej powierzchni, zmieniała się od około 230 Wm⁻² w styczniu do około 550 Wm⁻² w maju. Minimum promieniowania atmosfery $R_\beta(\tau)$ zanotowano w stycz-

niu dla powierzchni poziomej - wynosiło ono około 190 Wm^{-2} . Zakresowane części wykresów na rysunkach 7.3 i 7.4 przedstawiają straty ciepła zewnętrznej powierzchni stropodachu przez promieniowanie /bilans promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$ /. Badania wykazały, że różnicowe promieniowanie długofalowe $q_L(\tau)$, w ciągu całego cyklu pomiarowego, skierowane było od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska. Największe wartości osiągało ono w ciągu dnia w godzinach południowych /rys. 7.3 i 7.4/. Jednak oddziaływanie zasadniczego źródła zysków ciepła jakim jest promieniowanie słoneczne powodowało to, że całkowity bilans promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu $R_n(\tau)$ był w tym czasie dodatni. Tuż przed zachodem Słońca oraz w nocy $R_n(\tau)$ było ujemne - stropodach tracił ciepło przez promieniowanie długofalowe. W nocy, przy braku zachmurzenia w styczniu /rys. 7.3; noc z 22 na 23.01.81 r./ straty ciepła przez promieniowanie wynosiły średnio od 45 do 65 Wm^{-2} , zaś w maju, również w nocy, średnio od 30 do 80 Wm^{-2} .

Przy bezchmurnej pogodzie dzienne zmiany obydwu składowych promieniowania długofalowego /tj. $q_L(\tau)$ i $q_R(\tau)$ / są o wiele mniejsze od zmian promieniowania krótkofalowego, przebiegających niemal sinusoidalnie. Krzywa całkowitego bilansu promieniowania $R_n(\tau)$ jest więc prawie równoległa do krzywej $I_{Tg}(\tau)$. W warunkach częściowo lub całkowicie zachmurzonego nieba prawidłowość ta jest mniej wyrazista /rys. 7.3 ; 21.01.81/.

Z porównania rysunków 7.3 i 7.4 wynika, że w maju różnicowe promieniowanie długofalowe, skierowane od zewnętrznej powierzchni stropodachu do środowiska, było znacznie większe niż w styczniu. Jest to zrozumiałe, jako że w maju, ze względu na większe war-

tości zarówno natężenia promieniowania słonecznego jak i temperatury powietrza, zewnętrzna powierzchnia stropodachu osiągała wyższe wartości temperatur $T_{os}(\tau)$ niż w styczniu /emisja promieniowania zewnętrznej powierzchni stropodachu jest funkcją m.in. temperatury $T_{os}(\tau)$, wyrażenie (2.33) /. Przyrost temperatury $T_{os}(\tau)$ w maju w stosunku do wartości $T_{os}(\tau)$ dla stycznia, nie był zrekompensowany odpowiednim przyrostem promieniowania długofalowego $R_p(\tau)$. W związku z tym w maju straty ciepła zewnętrznej powierzchni stropodachu przez promieniowanie długofalowe były większe niż w styczniu. Z punktu widzenia strat ciepła z pomieszczenia przez stropodach istotna jest wartość natężenia i zwrot strumienia ciepła $q_i(\tau)$ na wewnętrznej powierzchni stropodachu. Wprawdzie w maju wartości natężenia różnicowego promieniowania długofalowego $q_L(\tau)$ na zewnętrznej powierzchni stropodachu były znacznie większe niż w styczniu /rys. 7.3 i 7.4/, jednak dla stycznia straty ciepła z pomieszczenia przez stropodach były większe niż dla maja. W styczniu, w ciągu całego okresu pomiarowego, gęstość strumienia ciepła $q_i(\tau)$ skierowana była od pomieszczenia na zewnątrz /rys. 7.1/, gdy tymczasem w maju strumień ten, o mniejszej wartości, skierowany był naprzemiennie do i od pomieszczenia /rys. 7.2/.

Wymiana ciepła przez promieniowanie /a w tym przez promieniowanie długofalowe/ stanowi jeden ze składników bilansu cieplnego zewnętrznej powierzchni stropodachu. Jednocześnie bowiem zachodzi wymiana ciepła przez konwekcję tej powierzchni z otoczeniem, a ponadto wpływ na zjawiska cieplne na zewnętrznej powierzchni stropodachu mają również warunki cieplne w pomieszczeniu znajdującym się pod stropodachem /procesy te omówiono w rozdziale 2.2/.

Bilans cieplny stropodachu jest wypadkową oddziaływań wymiennych elementów.

8.2.3. Wpływ kąta pochylenia i zorientowania względem stron świata płaszczyzny stropodachu na jego bilans cieplny

Kąt pochylenia oraz zorientowania płaszczyzny stropodachu względem stron świata mogą mieć istotny wpływ na wielkość strat lub zysków ciepła przez stropodach, zarówno w sezonie ogrzewczym jak i w okresie poza tym sezonem. Największe zyski ciepła od bezpośredniego promieniowania słonecznego, w skali roku, otrzymuje płaszczyzna, zorientowana na południe i nachylona pod kątem φ równym szerokości geograficznej rozpatrywanego miejsca, przy czym dla okresu zimowego pochylenie to powinno wynosić około $/\varphi+10^\circ/$, zaś dla okresu letniego około $/\varphi-10^\circ/$ /Duffie, Beckmann [32] /. Dla warunków klimatycznych Polski optymalny, ze względu na zyski ciepła od nasłonecznienia w zimie, kąt pochylenia stropodachu musiałby wynosić wówczas około 60° .

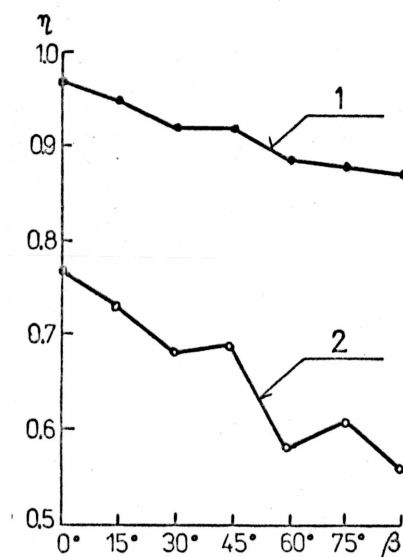
Nachylenie i zorientowanie płaszczyzny stropodachu determinują ilość dochodzącego bezpośredniego promieniowania słonecznego. Najwięcej "dodatkowego" promieniowania otrzymuje płaszczyzna stropodachu eksponowana na południe wiosną i jesienią, kiedy zenitalna wysokość Słońca nad horyzontem jest mniejsza niż w lecie. Na szerokości północnej $\varphi = 60^\circ$, w środku kwietnia, ilość oddziaływującego promieniowania słonecznego na płaszczyznę ukierunkowaną na południe i pochyłoną pod kątem $\beta = 30^\circ$ jest o 50% większa w porównaniu z ilością docierającą do płaszczyzny poziomej, natomiast na szerokości północnej $\varphi = 50^\circ$ - tylko o 28% /Bac, Rojek

[5]/. W czerwcu, kiedy Słońce podczas pozornego ruchu nad horyzontem osiąga większe wysokości, różnice w dochodzącym promieniowaniu bezpośrednim zacierają się zarówno dla różnych szerokości geograficznych, jak i dla powierzchni o różnej ekspozycji i nachyleniu /Bac, Rojek [5] /.

Wpływ na sumy godzinowe całkowitego promieniowania słonecznego Q dla poziomych i pochylonych powierzchni mają średni w ciągu dnia stopień zachmurzenia nieba c oraz usłonecznienie rzeczywiste /czas, podczas którego na drodze między tarczą słoneczną i danym punktem na Ziemi nie było przeszkód, przede wszystkim gęstych chmur/. Okazuje się, że korelacja godzinowych sum całkowitego promieniowania słonecznego ze stopniem zachmurzenia nieba i z usłonecznieniem rzeczywistym istotnie zależy od kąta pochylenia rozważanej płaszczyzny - wraz ze wzrostem kąta pochylenia korelacja ta maleje. Ponadto zależność Q od usłonecznienia rzeczywistego jest bardziej znacząca niż w przypadku zależności Q od średniego stopnia zachmurzenia nieba /Pobierowskaja, Fiedorowa [99] /. Ilustruje to rysunek 8.5.

Zagadnienie wpływu kąta pochylenia stropodachu na jego bilans cieplny komplikuje się w sytuacji, gdy stropodach jest dwuspadowy. Mogłaby wówczas zaistnieć sytuacja, w której przy danym zorientowaniu względem stron świata jedna z płaszczyzn stropodachu uzyskałaby maksymalne, druga zaś minimalne zyski ciepła od nasłonecznienia. Całkowity efekt w postaci bilansu cieplnego dla całego stropodachu mógłby być wtedy bardziej niekorzystny niż przy innym zorientowaniu stropodachu. To samo dotyczy strat ciepła.

Znaczenie orientacji stropodachu dwuspadowego wzrasta wraz ze



Rys. 8.5. Współczynnik korelacji η godzinowych sum całkowitego promieniowania słonecznego z usłonecznieniem rzeczywistym /1/ i ze średnim w ciągu dnia stopniem zachmurzenia nieba /2/ dla różnych kątów pochylenia β rozważanej płaszczyzny skierowanej na południe /Pobierowska, Fiedorowa [99] /.

wzrostem kąta pochylenia jego płaszczyzn; w bilansie cieplnym obu powierzchni wzrasta udział i znaczenie asymetrycznego pola promieniowania środowiska zewnętrznego, związanego przede wszystkim z kierunkowym działaniem promieniowania słonecznego.

W niniejszej pracy analizowano wpływ kąta pochylenia i zorientowania płaszczyzny stropodachu względem stron świata na jego bilans cieplny. Analizę przeprowadzono w oparciu o przebieg zmienności w czasie średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego, reprezentującej radiacyjne oddziaływanie tego środowiska w zakresie promieniowania krótko- i długofalowego.

Badania przeprowadzone w styczniu 1981 roku wykazały, że przy bezchmurnym niebie w nocy wielkość radiacyjnego oddziaływania środowiska zewnętrznego na dowolną przegrodę uzależniona jest jedynie od kąta jej pochylenia, zaś jej zorientowanie nie ma znaczenia

/rysunki od 7.7 do 7.10; noc z 22 na 23.01.1981/. Podobne wnioski wynikają z pomiarów przeprowadzonych w maju 1981 roku /rysunki od 7.14 do 7.17/. W warunkach zachmurzonego nieba w nocy do dowolnie pochylnych i dowolnie usytuowanych względem stron świata przegród budowlanych dociera prawie ta sama ilość długofalowego promieniowania środowiska zewnętrznego /rysunki 7.7 do 7.10; noc z 21 na 22.01 oraz z 23 na 24.01.1981/. W ciągu dnia wielkość radiacyjnego oddziaływania środowiska na daną przegrodę uzależniona jest zarówno od kąta jej pochylenia jak i zorientowania, co związane jest przede wszystkim z oddziaływaniem promieniowania słonecznego. Wówczas, różnica między wartościami średniej temperatury promieniowania otoczenia dla różnie ukierunkowanych i dowolnie pochylnych przegród może wynosić nawet około 45°C w styczniu /rys.7.12/ oraz około 70°C w maju /rys.7.19/. Zachmurzenie nieba zmniejsza natężenie docierającego do powierzchni przegrody bezpośredniego promieniowania słonecznego, stąd też wspomniane różnice, dotyczące średniej temperatury promieniowania środowiska, są mniejsze.

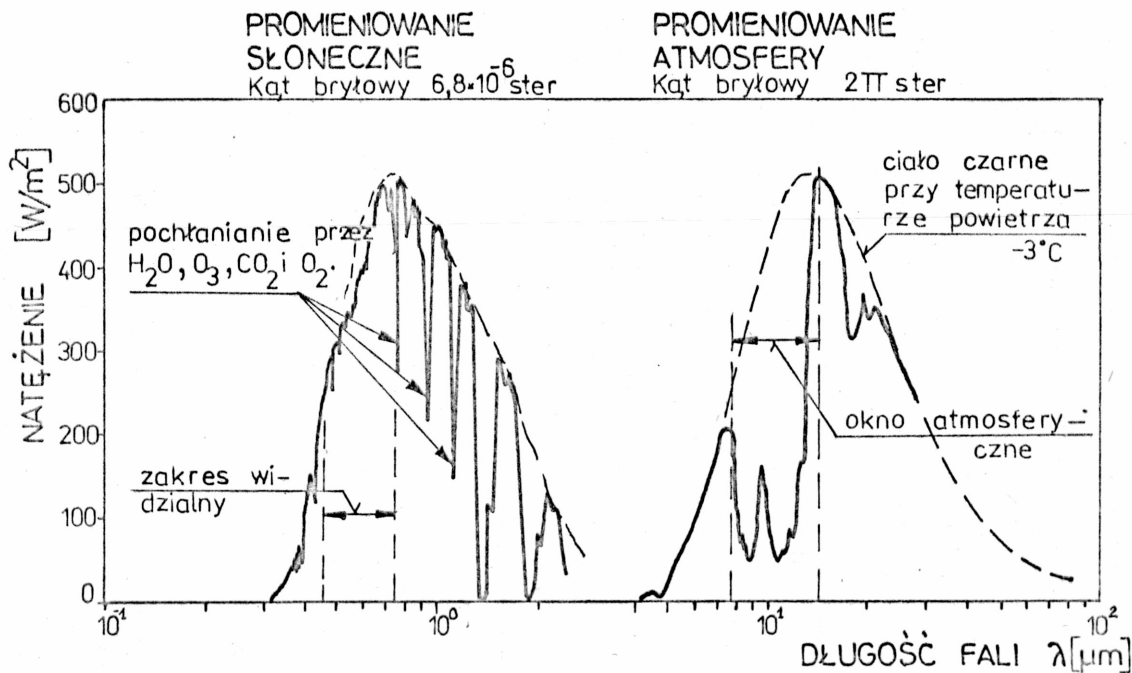
Stosowane obecnie w kraju stropodachy należy zaliczyć do płaskich, o niewielkim kącie pochylenia, wynikającym przede wszystkim z niezbędnego minimalnego spadku w celu odprowadzenia wody opadowej - około 10% /Płoński, Pogorzelski [98] /. Uwzględnienie w analizie kąta pochylenia rzędu $30-60^{\circ}$ może mieć duże znaczenie przy rozwiązywaniu zagadnień, związanych z bilansowaniem ciepła dla dachów stromych /np. mansardowych/, przy czym dla takich dachów komplikuje się opis radiacyjnej wymiany ciepła od strony pomieszczenia /Burch, Luna [14], Pawelski, Mitchell [93] /.

Kąt pochylenia oraz zorientowanie stropodachu wpływają jedynie na ilość docierającego do jego płaszczyzny promieniowania środowiska zewnętrznego. Natomiast efekt cieplny w postaci zysków bądź strat ciepła przez stropodach, związany jest ściśle z własnościami jego zewnętrznej powierzchni. Selektywne własności radiacyjne zewnętrznej powierzchni stropodachu determinują zdolność tej powierzchni do pochłaniania i emisji promieniowania. Stąd analizując bilans cieplny stropodachu należy rozpatrywać łącznie wpływ kąta pochylenia i orientacji jego płaszczyzny oraz selektywnych własności radiacyjnych jego zewnętrznej powierzchni. Wnioski ilościowe związane z tym zagadnieniem zostaną podane w następnym rozdziale.

8.2.4. Wpływ selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu na jego bilans cieplny

W rozdziale 2.1 omówiono zasadnicze zagadnienia związane z radiacyjnym oddziaływaniem środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane, a zwłaszcza na stropodachy. Na rysunku 8.6 przedstawiono natężenie całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania nieboskłonu, docierającego do płaszczyzny poziomej, w funkcji długości fali promieniowania, w warunkach bezchmurnego nieba w zimie /Kneubühl i inni [59]/.

Natężenia całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania nieboskłonu dochodzącego do płaszczyzny poziomej są porównywalne, przy czym emisja promieniowania następuje w różnych zakresach widma. Zewnętrzna powierzchnia przegrody budowlanej wykazuje natomiast różną zdolność do pochłaniania i emisji promieniowania o różnych



Rys. 8.6. Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego i promieniowania nieboskłonu docierającego do płaszczyzny poziomej /600 m n.p.m., zima, temperatura powietrza $t_e = -3^\circ C$, wzniesienie Słońca około 20° .

zakresach widma, zależą od selektywnych własności radiacyjnych materiału, z którego jest wykonana. W związku z tym zastosowanie odpowiedniego materiału /o odpowiednich selektywnych własnościach radiacyjnych/ na zewnętrzną powierzchnię przegrody budowlanej może prowadzić do zmiany bilansu promieniowania, a więc w konsekwencji do zmiany bilansu cieplnego tej przegrody. W okresie zimowym zewnętrzna powierzchnia stropodachu powinna charakteryzować się wysoką wartością współczynnika absorpcji a_s dla promieniowania krótkofalowego /ze względu na zyski ciepła od nasłonecznienia/ i niską wartością współczynnika emisyjności ε dla promieniowania długofalowego /ze względu na wypromieniowanie ciepła z tej

powierzchni;/; współczynnik selektywności n /wyrażenie (2.38)/ powinien więc być jak największy. W lecie zaś, z uwagi na zabezpieczenie się przed nadmiernymi zyskami ciepła od nasłonecznienia, sytuacja powinna być odwrotna - współczynnik n powinien być jak najmniejszy. W praktyce nie stosuje się przegród budowlanych /w tym stropodachów/, dla których istniałaby możliwość zmiany selektywnych własności radiacyjnych ich powierzchni w różnych porach roku. Problem prawidłowego doboru własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu, pod kątem ograniczenia nadmiernych zysków ciepła latem i nadmiernych strat ciepła zimą, jest więc problemem złożonym. Dobór wartości współczynnika selektywności n /dobór współczynników α_s i ε / zewnętrznej powierzchni stropodachu powinien być dokonany przy jednoczesnym uwzględnieniu kąta pochylenia i zorientowania płaszczyzny stropodachu, co dodatkowo komplikuje zagadnienie.

W niniejszej pracy podjęto próbę przeanalizowania wpływu powyższych wielkości na bilans cieplny stropodachu. Analizę przeprowadzono w oparciu o wyniki obliczeń, uzyskane dla kilku typowych stropodachów /opis w rozdziale 5/. Do obliczeń przyjęto model jednokierunkowego nieustalonego przepływu ciepła przez stropodach wielowarstwowy w warunkach asymetrii pola promieniowania środowiska zewnętrznego. Obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej, wykorzystując metodę obliczeniową Stephensona i Mitalasa. Wyniki obliczeń dla stycznia przedstawiono na rysunkach od 7.21 do 7.31, zaś dla maja na rysunkach 7.32, 7.33.

Analiza przebiegu zmienności gęstości strumienia ciepła $q_1(\tau)$ na powierzchni wewnętrznej stropodachu /od strony pomieszczenia/ wykazała, że najmniejsze straty ciepła w zimie i największe zyski

ciepła latem zachodziły dla stropodachu, którego zewnętrzna powierzchnia cechowała się największym współczynnikiem selektywności n . Ponadto dla stropodachu o największym współczynniku selektywności występowały największe w ciągu doby amplitudy wahań gęstości strumienia ciepła $q_0(\tau)$ na jego zewnętrznej powierzchni, zaś dla najmniejszej wartości współczynnika n występowały najmniejsze amplitudy wahań $q_0(\tau)$. Prawidłowości te zachodziły zarówno dla warunków zimowych, jak i letnich.

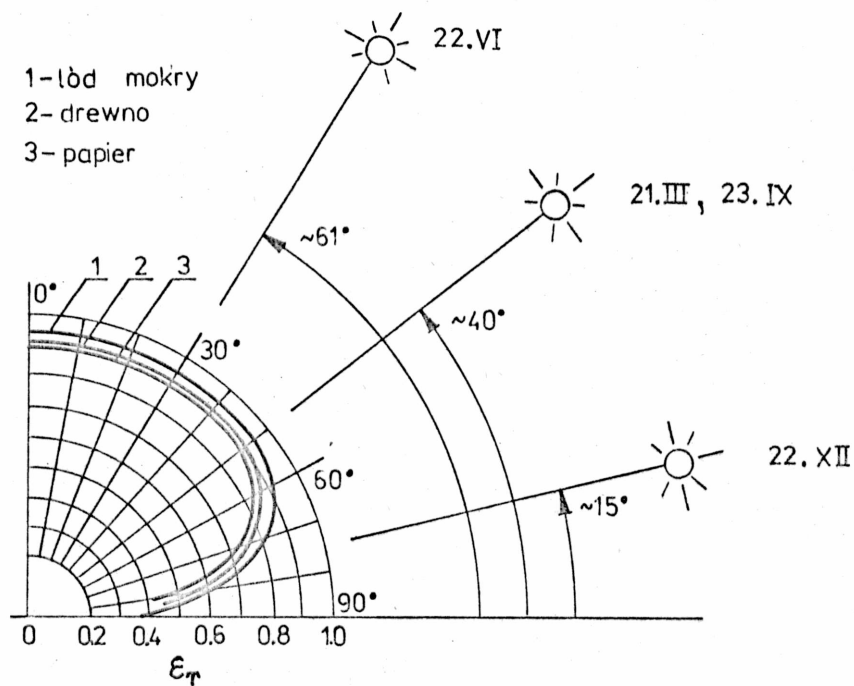
W sezonie zimowym, przy prawie zupełnie zachmurzonym niebie, zmiana selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu praktycznie nie wpływa na zmianę wartości gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$, a więc na zmianę wielkości strat ciepła przez stropodach. Potwierdzają to wyniki obliczeń ze stycznia dla stropodachów poziomych a także pochyłonych /rysunki od 7.21 do 7.31; 22.01.1981 r., godziny 0^{00} - 10^{00} /.

W warunkach bezchmurnego nieba zimą, zarówno w ciągu dnia jak i w nocy, występują zauważalne różnice w wartościach $q_i(\tau)$ dla różnych, w sensie własności radiacyjnych, zewnętrznych powierzchni stropodachu. Dla stropodachu nr 1 /dane w tabelicy 5.2/, w odniesieniu do gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ dla powierzchni o współczynnikach $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$, najczęściej spotykanej w praktyce, wartość $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,35$ jest mniejsza o 14,8% /mniejsze chwilowe straty ciepła z pomieszczenia/, zaś dla powierzchni o $a_s = 0,35$ i $\varepsilon = 0,9$ występują większe chwilowe straty ciepła o 22,2% /rys. 7.21; 23.01.1981 r., godz. 16^{00} /. Dla stropodachu nr 2 /dane w tabelicy 5.2/ natomiast, przy tej samej powierzchni odniesienia / $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$ /, wartość $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,35$ jest mniejsza o 15,9%, zaś dla

powierzchni o $a_s = 0,35$ i $\varepsilon = 0,9$ jest większa o 23,8% /rys.7.27a 23.01.1981 r., godz. 16⁰⁰/. Powyższego porównania dokonano dla chwili czasowej τ , w której wartości gęstości strumienia cieplnego $q_i(\tau)$ dla różnych powierzchni wykazywały największe różnice. Podobnego rzędu różnice w wartościach gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ występują dla różnych powierzchni zewnętrznych /różne wartości współczynników a_s, ε / stropodachów nr 1 i nr 2 pochyłonych pod kątem 30° i zorientowanych na południe /rysunki 7.22 i 7.27b/. Analiza przebiegu zmienności gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ w całym rozpatrywanym okresie /dwie doby/ wykazuje jednak, że dla stropodachów o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ i o orientacji południowej można uzyskać poprzez zastosowanie powierzchni zewnętrznej o korzystniejszych własnościach radiacyjnych, ograniczenie całkowitych strat ciepła przez stropodach rzędu 3 do 12%. Jest to więc efekt nieznaczny w stosunku do tego, jaki uzyskuje się dla chwilowych strat ciepła przez stropodach /rysunki 7.21, 7.22, 7.27a, 7.27b/.

W niniejszej pracy przyjęto w obliczeniach założenie o stałej, w całym zakresie widma promieniowania słonecznego, wartości współczynnika absorpcji a_s dla zewnętrznej powierzchni stropodachu. Założenie to jest pewnym uproszczeniem, wprowadzonym w celu ułatwienia obliczeń i interpretacji wyników. Wartość współczynnika absorpcji, ściślej - kierunkowej absorpcyjności panchromatycznej, dla danej powierzchni jest bowiem funkcją długości fali promieniowania słonecznego oraz kąta padania bezpośredniego /kierunkowego/ promieniowania słonecznego na tę powierzchnię. Zależność a_s od długości fali promieniowania słonecznego pokazano w rozdziale 2.2.3 /rys. 2.9/. Z punktu widzenia wpływu na bilans cieplny stropodachu, szczególnie istotna jest zależność współczynnika absorp-

cji zewnętrznej powierzchni stropodachu od kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na tę powierzchnię. Na rysunku 8.7 przedstawiono zmienność wartości współczynnika kierunkowej emisyjności panchromatycznej $\epsilon_T / a_s = \epsilon_T /$ dla dielektryków w funkcji kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego /Wiśniewski [130]/. Zaznaczono również kąty wzniesienia Słońca dla astronomicznego południa, w okresie całorocznym dla Wrocławia.



Rys. 8.7. Zmiana kierunkowej emisyjności panchromatycznej ϵ_T dla dielektryków w funkcji kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego. Zaznaczone kąty wzniesienia Słońca dla astronomicznego południa obowiązują dla miejscowości położonej na 51° szerokości geograficznej północnej.

Dla miesięcy od listopada do lutego maksymalny kąt wzniesienia Słońca nie przekracza 25°. Przy małych kątach wzniesienia Słońca maleje znacznie wartość współczynnika absorpcji dla poziomej powierzchni, na którą oddziałują promieniowanie słoneczne. Dla okresu zimowego więc zdolność zewnętrznej powierzchni poziomego lub nachylonego

pod niewielkim kątem stropodachu do absorbowania promieniowania słonecznego jest znacznie mniejsza od przyjętej do obliczeń $/a_s = \text{const.}/$. W związku z tym ograniczenie strat ciepła przez taki stropodach $/w \text{ porze zimowej}/$, poprzez maksymalne wykorzystanie absorpcji promieniowania słonecznego oraz zmniejszenie emisji promieniowania przez jego zewnętrzną powierzchnię, jest znacznie mniejsze od uzyskanego z obliczeń. Możliwość ograniczenia $/w \text{ sezonie ogrzewczym}/$ całkowitych strat ciepła przez stropodach o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$, przez zastosowanie na jego zewnętrzną powierzchnię materiału o korzystniejszych selektywnych właściwościach radiacyjnych, maleje więc do kilku procent.

Dla stropodachów o kącie pochylenia $\beta > 30^\circ$ rośnie wpływ selektywnych właściwości radiacyjnych ich zewnętrznej powierzchni na bilans cieplny $/\text{rysunki od 7.24 do 7.26; od 7.29 do 7.31}/$. Związane jest to ze zmniejszeniem kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego, a w konsekwencji wzrostem współczynnika absorpcji dla zewnętrznej powierzchni stropodachu. Powstaje więc możliwość lepszego, niż dla stropodachów płaskich, wykorzystania energii słonecznej. W związku z dużym pochyleniem stropodachu istotnego znaczenia, w sensie wpływu na bilans cieplny, nabiera zorientowanie płaszczyzny stropodachu względem stron świata. Problem ograniczenia strat ciepła zimą przez stropodachy o dużym kącie pochylenia należy rozpatrywać, mając na uwadze, że stosowanie materiałów na zewnętrzną powierzchnię stropodachu o dużym współczynniku absorpcji i małym współczynniku emisyjności oraz zorientowanie płaszczyzny stropodachu na południe, jest najbardziej niekorzystnym rozwiązaniem w porze letniej, z uwagi na duże zyski ciepła od nasłonecznie-

nia i małe wypromieniowanie z powierzchni stropodachu. Rozwiązanie tego problemu wymaga wykorzystania rachunku optymalizacyjnego.

Analiza wyników wykazała, że dla okresu zimowego odpowiedni dobór selektywnych własności radiacyjnych może mieć pierwszorzędne znaczenie dla "poprawienia" bilansu cieplnego przegród pionowych /ścian/ ukierunkowanych na południe. Wynika to stąd, że w zimie natężenie całkowitego promieniowania słonecznego padającego na ścianę południową jest od 2 do 2,5 raza większe w stosunku do wielkości tego promieniowania, jaka w tym samym czasie dociera do płaszczyzny poziomej /rys. 2.3/. Ponadto, przy maksymalnym wzniesieniu Słońca dla miesięcy zimowych, kąt padania tego promieniowania na ścianę południową jest mniejszy od 60° /rys. 8.7/ i dlatego wartość współczynnika absorpcji a_s można przyjąć za stałą i niezależną od kąta padania promieniowania słonecznego. Wprawdzie po wschodzie i przed zachodem Słońca występują odchylenia od założonej stałej wartości a_s , jednak sytuacja taka trwa stosunkowo krótko i można tego nie uwzględniać w obliczeniach. Wyniki uzyskane dla ściany południowej wykazały, że w zimie mogą wystąpić zyski ciepła przez ścianę do pomieszczenia /dla powierzchni o współczynnikach $a_s = 0,90$ i $\varepsilon = 0,35$; rys. 7.25a i 7.31a/.

Otrzymane wyniki obliczeń wskazują, że całkowite straty ciepła z pomieszczenia przez stropodach nr 2 są większe niż przez stropodach nr 1, przy czym oba stropodachy charakteryzują się takim samym współczynnikiem przenikania ciepła $/K = 0,67 [Wm^{-2}K^{-1}]$. Wielkość tych strat jest uzależniona od kąta pochylenia stropodachu oraz od wartości współczynników a_s i ε dla jego zewnętrznej powierzchni /przyjęto orientację południową/. Znaczne różnice w wartościach gęstości strumienia cieplnego $q_i(\tau)$ dla tych stropodachów /różnice

rzędu 40%/, przy równości ich oporów cieplnych, są efektem zróżnicowania ich masy /tablica 5.2/. Nijamniejsze straty ciepła z pomieszczenia wykazuje stropodach nr 3 /dane w tablicy 5.2/. Wyniki dla tego stropodachu przedstawiono na rysunkach 7.21 i 7.22. Stropodach nr 3 charakteryzuje się większą izolacyjnością cieplną oraz większą masą w odniesieniu do stropodachów nr 1 i nr 2.

Obliczenia dla okresu zimowego wykonano przy założeniu braku śniegu, lodu ewentualnie szronu na zewnętrznej powierzchni przegrody. Ich obecność może zmienić, w sposób znaczący, selektywne własności radiacyjne zewnętrznej powierzchni przegrody /Burch [13], Cammerer [16]/.

W niniejszej pracy wykonano również obliczenia dla okresu letniego, wykorzystując dane meteorologiczne z maja 1981 r. Analiza wyników wykazała, że w warunkach bezchmurnego nieba, podobnie jak w zimie, występują w ciągu dnia i nocy zauważalne różnice w wartościach $q_i(\tau)$ dla różnych, w sensie własności radiacyjnych, zewnętrznych powierzchni stropodachu. Przykładowo dla stropodachu nr 1, w odniesieniu do gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ dla powierzchni o współczynnikach $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$, wartość $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,35$ jest większa o 48,4% /większe chwilowe zyski ciepła do pomieszczenia/, zaś dla powierzchni o $a_s = 0,35$ i $\varepsilon = 0,9$ występują mniejsze chwilowe zyski ciepła o 58,1% /rys. 7.32a; 10.05.1981 r, godz. 19⁰⁰/. Podobne wyniki uzyskano dla stropodachu nr 2 płaskiego /rys. 7.33a/ oraz pochylonego pod kątem 30° i zorientowanego na południe /rys. 7.33b/, a także dla stropodachu nr 1 pochylonego pod kątem 30° i zorientowanego na południe /rys. 7.32b/. Analiza przebiegu zmienności

gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ w całym rozpatrywanym okresie /dwie doby/ wykazuje, że dla stropodachów o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ można osiągnąć, poprzez zastosowanie powierzchni zewnętrznej o korzystniejszych własnościach radiacyjnych, znaczne ograniczenie nadmiernych zysków ciepła od nasłonecznienia przez stropodach. Przykładowo dla stropodachu nr 1, w odniesieniu do gęstości strumienia ciepła $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$, wartość $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,35$ jest większa o 45,5% /większe całkowite zyski ciepła/, zaś dla powierzchni o $a_s = 0,35$ i $\varepsilon = 0,9$ występują mniejsze całkowite zyski ciepła aż o 78,5%. Na tak duży wpływ selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachu, pochylonego pod kątem $\beta \leq 30^\circ$, na jego bilans cieplny w okresie letnim składają się dwie przyczyny. W okresie letnim powierzchnie o niewielkim kącie pochylenia są najbardziej eksponowane na działanie promieniowania słonecznego, z uwagi na duży kąt wzniesienia Słońca /rys. 2.3/. Po drugie, dla dużych kątów wzniesienia Słońca współczynnik absorpcji a_s , dla zewnętrznej powierzchni stropodachu, można uznać za stały, niezależny od kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego /rys. 8.7/.

Zwraca uwagę również fakt, że dla stropodachu, którego zewnętrzna powierzchnia charakteryzuje się współczynnikiem selektywności $n=1$, uzyskano, zarówno dla stycznia jak i maja, różne wartości gęstości strumienia $q_i(\tau)$ dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$ oraz powierzchni o $a_s = 0,35$ i $\varepsilon = 0,35$ /rys. 7.24; 7.30; 7.32 i 7.33/. W maju różnice w wartościach $q_i(\tau)$ dla tych powierzchni były wyraźniejsze niż w styczniu; dla powierzchni o $a_s = 0,9$ i $\varepsilon = 0,9$ wartości $q_i(\tau)$ były większe.

Analiza wyników wykazała, że w obliczeniach bilansu cieplnego stropodachów pełnych o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ dla okresu zimowego i dla nocy w okresie letnim, w warunkach nieustalanej wymiany ciepła, stropodachy te można traktować jako poziome. Dla stropodachów płaskich i o niewielkim kącie pochylenia celem doboru selektywnych własności radiacyjnych ich zewnętrznej powierzchni powinno być ograniczenie nadmiernych zysków ciepła od nasłonecznienia latem w porze dziennej, przy czym należy uwzględnić rzeczywisty kąt pochylenia stropodachu oraz zorientowanie względem stron świata. Wysoka wartość współczynnika selektywności n dla zewnętrznej powierzchni tych stropodachów zapewnia bowiem, w okresie zimowym, jedynie nieznaczne, rzędu kilku procent, ograniczenie strat ciepła przez stropodach. Dobór wartości współczynnika selektywności dla zewnętrznej powierzchni stropodachów o kącie pochylenia $\beta > 30^\circ$ należy przeprowadzić w oparciu o rachunek optymalizacyjny z uwagi na ograniczenie zysków ciepła od nasłonecznienia latem i zmniejszenie strat ciepła zimą. W obliczeniach tych należy uwzględnić kąt pochylenia stropodachu i zorientowanie względem stron świata. Powyższe wnioski odnoszą się do warunków klimatycznych Polski.

8.3. Obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego w modelu ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez stropodach, uwzględniająca rzeczywiste oddziaływanie środowiska zewnętrznego

W niniejszej pracy w obliczeniach wykorzystano model nieustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła przez stropodach wielowarstwowy, poddany oddziaływaniu, zmiennego w czasie, środowiska zewnętrznego i środowiska cieplnego w pomieszczeniu pod stropoda-

chem. W wielu zastosowaniach z zakresu fizyki cieplnej budowli stosuje się na ogół model ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła, który w sposób uproszczony opisuje proces przenikania ciepła przez przegrody budowlane. Zakłada on, że temperatura powietrza zewnętrznego t_e jest równa średniej temperaturze promieniowania środowiska zewnętrznego t_r , czyli $t_e = t_r$. Interesującą wydaje się być odpowiedź na pytanie - jaki błąd popełnia się w obliczeniach strat ciepła metodą tradycyjną /stan ustalony, $t_e = t_r$ / w stosunku do wielkości tych strat obliczonych przy wykorzystaniu modelu ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła, ale bez założenia równości temperatur t_e i t_r . Pytanie to można sformułować inaczej - jaką wartość powinna mieć obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego /dla okresu zimowego/ aby przyjęty model ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła uwzględniał rzeczywiste radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego. W niniejszym rozdziale przeprowadzono analizę tego zagadnienia.

W bilansie cieplnym przegród budowlanych /równanie (2.34)/, w modelu nieustalonej wymiany ciepła, środowisko zewnętrzne scharakteryzowane jest przez temperaturę powietrza zewnętrznego $t_e(\tau)$ warunki wietrzne /uwzględnione w wartości współczynnika $\alpha_k(\tau)$ /, natężenie całkowitego promieniowania słonecznego $I_{T\beta}(\tau)$ oraz natężenie promieniowania długofalowego $R_\beta(\tau)$. Ostatnie dwie wielkości mogą być zastąpione średnią temperaturą promieniowania środowiska zewnętrznego /wyrażenie (8.1)/. W obliczeniach strat ciepła przez przegrody budowlane w stanie ustalonym jedyną wielkością, która charakteryzuje zewnętrzne środowisko termiczne jest temperatura powietrza zewnętrznego t_e , przy czym w modelu wymiany ciepła zakłada się, że jest ona równa średniej temperaturze

promieniowania tego środowiska $t_r / t_e = t_r /$. Założenie to ma pewne tradycyjne w obliczeniach stacjonarnego przenikania ciepła przez przegrody budowlane w okresie zimowym, np. przy obliczaniu zapotrzebowania ciepła dla urządzeń grzewczych. Wielu autorów zwracało uwagę na fakt, że stosowanie temperatury powietrza zewnętrznego, przy założeniu $t_e = t_r$ jako wskaźnika cieplnego oddziaływania środowiska zewnętrznego, jest zbyt dużym uproszczeniem i prowadzi do pewnych błędów w obliczeniach cieplnych.

Już od ponad 30 lat czynione są próby dokładniejszego opisu środowiska zewnętrznego dla potrzeb fizyki cieplnej budowli. W 1944 roku Mackey i Wright [69], [70] wprowadzili pojęcie tak zwanej słonecznej temperatury powietrza. Wielkość ta opisuje środowisko zewnętrzne przy działaniu promieniowania słonecznego i jest stosowana do, mniej lub bardziej uproszczonych, praktycznych metod obliczania zysków ciepła od nasłonecznienia przez przegrody budowlane. Słoneczną temperaturę powietrza opisuje wyrażenie:

$$t_s = t_e + \frac{a_s I_T}{\alpha_e} \quad (8.9)$$

gdzie:

- t_s - słoneczna temperatura powietrza, [K] ,
- t_e - temperatura powietrza zewnętrznego, [K] ,
- α_e - współczynnik przejmowania ciepła dla zewnętrznej powierzchni przegrody, [Wm⁻²K⁻¹],
- a_s - współczynnik absorpcji zewnętrznej powierzchni przegrody dla promieniowania słonecznego,
- I_T - natężenie całkowitego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię przegrody, [Wm⁻²].

Słoneczna temperatura powietrza nie uwzględnia wymiany ciepła przez promieniowanie długofalowe między zewnętrzną powierzchnią

przegrody i środowiskiem zewnętrznym. Zwrócili na to uwagę również twórcy słonecznej temperatury powietrza, którzy w 1952 roku zasugerowali uwzględnienie tego wpływu, zaś sugestie te przedyskutowali Parmelee i Aubele [91].

Wskaźnik cieplnego oddziaływania środowiska zewnętrznego, uwzględniający wpływ promieniowania krótko- i długofalowego, przy czym $t_e \neq t_r$, stanowi tak zwana skorygowana temperatura powietrza zewnętrznego o postaci:

$$t_{ca} = t_e + \frac{a_s I_T}{\alpha_k} - \frac{\epsilon \Delta R}{\alpha_k} \quad (8.10)$$

gdzie:

t_{ca} - skorygowana temperatura powietrza zewnętrznego, [K] ,

ϵ - współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody,

α_k - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję dla zewnętrznej powierzchni przegrody, [Wm⁻²K⁻¹],

ΔR - natężenie różnicowego promieniowania długofalowego [Wm⁻²],

t_e, a_s, I_T - jak dla równania (8.9).

Wzór (8.10) jest często spotykany w literaturze /Burch, Luna [14], Rodrigues, Cole, O'Sullivan [106], przy czym niekiedy temperaturę t_{ca} nazywa się również słoneczną temperaturą powietrza /Reagan, Acklam [103]/. Skorygowaną temperaturę powietrza zewnętrznego można również wyznaczyć z innej zależności /Grzeszczyk i inni [44], [45], Grzeszczyk [46]/:

$$t_{ca} = t_e + \frac{\alpha_r}{\alpha_k} (t_r - t_{os}) \quad (8.11)$$

gdzie:

α_r - współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie dla zewnętrznej powierzchni przegrody, [Wm⁻²K⁻¹],

t_r - średnia temperatura promieniowania środowiska zewnętrznego [K] ,

t_{os} - temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody [K] ,
 t_{ca}, t_e, α_k - jak dla wyrażeń (8.9) i (8.10).

W 1980 roku wprowadzono do fizyki cieplnej budowli /Michalczyk, Nowak [76] /, jako wskaźnik cieplnego oddziaływania środowiska zewnętrznego, tak zwaną temperaturę operatywną:

$$t_{op} = \frac{\alpha_k t_e + \alpha_r t_r}{\alpha_k + \alpha_r} \quad (8.12)$$

gdzie:

t_{op} - temperatura operatywna, [K] ,
 $t_e, t_r, \alpha_k, \alpha_r$ - jak wyżej.

Temperatura operatywna znana była wcześniej i wykorzystywano ją przy rozpatrywaniu zagadnień, związanych z komfortem cieplnym ludzi przebywających w pomieszczeniach /Gagge, Nishi [36] /. Stosowanie temperatur t_{ca} i t_{op} daje ten sam efekt końcowy w postaci równości gęstości strumieni cieplnych na zewnętrznej powierzchni przegrody. Wzajemną zależność skorygowanej temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury operatywnej przedstawia wyrażenie:

$$\alpha_e (t_{op} - t_{os}) = \alpha_k (t_{ca} - t_{os}) \quad (8.13)$$

W celu określenia wartości temperatury obliczeniowej, dla potrzeb obliczania strat ciepła przez stropodach w sezonie ogrzewczym, autor niniejszej pracy przeprowadził analizę, przyjmując temperaturę operatywną, jako wskaźnik cieplnego oddziaływania środowiska zewnętrznego. Poniżej przedstawiono dodatkowe założenia oraz dane wykorzystane przez autora do obliczeń. Gęstość strumienia ciepła q przepływającego /traconego/ przez stropodach

można wyrazić w postaci /Michalczyk, Nowak [76]/:

$$q = K(t_{op,i} - t_{op,e}) \quad (8.14)$$

gdzie:

K - współczynnik przenikania ciepła, $[Wm^{-2}K^{-1}]$

$t_{op,i}$ - temperatura operatywna w pomieszczeniu pod stropodachem, $[K]$,

$t_{op,e}$ - temperatura operatywna na zewnątrz $[K]$.

Zakładając, że w pomieszczeniu pod stropodachem temperatury powietrza i promieniowania są sobie równe, wyrażenie (8.14) można zapisać:

$$q = K(t_{op,e} - t_i) \quad (8.15)$$

gdzie:

t_i - temperatura powietrza w pomieszczeniu, $[K]$.

Przyjęto cztery wartości oporności cieplnej stropodachów poziomych: $R_1 = 0,5$; $R_2 = 1,0$; $R_3 = 2,0$; $R_4 = 4,0$ $[m^2KW^{-1}]$. Opór R obejmował rzeczywistą oporność cieplną warstw przegrody oraz opór wnikanía ciepła od strony pomieszczenia. W pomieszczeniu przyjęto stałą wartość temperatury powietrza $t_i = 20^{\circ}C$. Obliczenia wykonano dla temperatury powietrza zewnętrznego t_e równej: $0^{\circ}C$, $-10^{\circ}C$, $-15^{\circ}C$, $-20^{\circ}C$ i $-25^{\circ}C$, przyjmując warunki bezchmurnego nieba w nocy /stopień zachmurzenia $c \leq 0,2$ /. Założono cztery wartości współczynnika emisyjności ϵ zewnętrznej powierzchni stropodachu: 1,0; 0,9; 0,5; 0,1. Ponadto przyjęto prędkość wiatru $v = 2,0$ m/s, a więc taką, jaka była wykorzystana przy określaniu normowego współczynnika przejmowania ciepła α_e po stronie zewnętrznej przegród budowlanych /Będkowski i inni [9]/. Dla po-

szczególnych temperatur powietrza zewnętrznego obliczono, ze wzoru Swinbanka (8.3), średnią temperaturę promieniowania nieboskłonu. Następnie wyznaczono temperaturę zewnętrżnej powierzchni stropodachu t_{os} według wyrażenia /Burch [13], Goldstein [40]/:

$$t_{os} = \frac{\frac{t_i}{R} + \alpha_k t_e + \alpha_r t_r}{\alpha_k + \alpha_r + \frac{1}{R}}, \quad (8.16)$$

przy czym wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję α_k określono ze wzoru (2.32), zaś współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie wyznaczono według Cole [21], Van der Bruggen [128]/:

$$\alpha_r = 4\epsilon \bar{\sigma} T^3 \quad (8.17)$$

gdzie:

$$T = (t_{os} + t_r) 0,5$$

ϵ - współczynnik emisyjności zewnętrznej powierzchni przegrody,
 $\bar{\sigma}$ - stała Stefana-Boltzmann.

Wartość temperatury t_{os} obliczano iteracyjnie, przy czym warunkiem stopu procesu iteracyjnego było osiągnięcie dokładności 0,1 K. Po wyznaczeniu wartości temperatury operatywnej ze wzoru (8.12), obliczono gęstość strumienia ciepła zgodnie z wyrażeniem (8.15), w którym

$$K = \frac{1}{R + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (8.18)$$

Określono również normową wartość gęstości strumienia ciepła /Płoński, Pogorzelski [98] / według wyrażenia

$$q_N = K(t_i - t_e) \quad (8.19)$$

w którym:

$$K = \frac{1}{R+0,04}$$

gdzie $0,04 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ jest wartością normowego oporu przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni stropodachu. Wyniki powyższych obliczeń zamieszczono w tablicy 8.1.

Analiza wyników uzyskanych z obliczeń wskazuje, że konsekwencją stosowania, w obliczeniach strat ciepła przez poziome lub nachylone pod niewielkim kątem stropodachy, założenia upraszczającego o równości temperatur powietrza i promieniowania środowiska zewnętrznego jest wyznaczenie mniejszej wartości gęstości strumienia ciepła przepływającego /traconego/ przez stropodach w stosunku do wartości rzeczywistej. Z tablicy 8.1. wynika, że błąd popełniany w obliczeniach cieplnych metodą tradycyjną wzrasta wraz ze wzrostem wartości współczynnika emisyjności dla zewnętrznej powierzchni stropodachu. Dla powierzchni o współczynniku $\varepsilon = 0,9$ /wartość najczęściej spotykana w praktyce; w tablicy 8.1. wyniki dla $\varepsilon = 0,9$ wydzielono grubszą linią/ błąd w obliczeniach gęstości strumienia ciepła wynosi, dla temperatur $t_e = -15^\circ\text{C}$, -20°C i -25°C , od około 7 do 13% w stosunku do wartości obliczonej przy założeniu $t_e = t_r$, zaś dla wyższych temperatur powietrza zewnętrznego $/-10^\circ\text{C}$, $0^\circ\text{C}/$ nawet do około 25%. Zwraca uwagę fakt, że w przypadku wyższych temperatur powietrza zewnętrznego $/-10^\circ\text{C}$, $0^\circ\text{C}/$ wspomniany błąd obliczeniowy wykazuje najwyższe wartości /dla wszystkich analizowanych wartości ε /, natomiast przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego błąd ten rośnie wraz ze wzrostem oporu cieplnego stropodachu. W tablicy 8.1. zamieszczono również wartości temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} ; grubszą linią

TABLICA 8.1. Zestawienie normowych wartości gęstości strumienia ciepła q_N , przepływającego przez poziomy stropodach o różnych własnościach emisyjnych zewnętrznej powierzchni, obliczonych metodą tradycyjną /stan ustalony, $t_e = t_r$ / z wartościami gęstości strumienia ciepła q przepływającego przez ten stropodach, obliczonymi w stanie ustalonym przy założeniu $t_e \neq t_r$, przy czym t_r wyznaczono dla warunków bardzo czystego nieba w nocy /wzór Swinbanka (8.3)/. Dodatkowo przedstawiono wartości temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} obliczonej przy założeniu $t_e \neq t_r$.

t_e	R	q_N	$\varepsilon = 1,0$		$\varepsilon = 0,9$		$\varepsilon = 0,5$		$\varepsilon = 0,1$		Temperatura t_{os} dla			
			q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	$\varepsilon=1,0$	$\varepsilon=0,9$	$\varepsilon=0,5$	$\varepsilon=0,1$
$^{\circ}\text{C}$	m^2KW^{-1}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0,0	0,5	37,0	45,7	23,5	44,8	21,1	40,9	10,5	37,1	0,3	-3,0	-2,4	-0,4	1,9
	1,0	19,2	24,1	25,5	23,6	22,9	21,7	13,0	19,3	0,5	-4,5	-3,7	-1,7	0,7
	2,0	9,8	12,4	26,5	12,2	24,5	11,2	14,3	10,0	2,0	-4,9	-4,2	-2,4	0,0
	4,0	5,0	6,3	26,0	6,2	24,0	5,7	14,0	5,1	2,0	-5,1	-4,6	-2,7	-0,3
-10,0	0,5	55,6	63,9	14,9	62,9	13,1	58,7	5,6	53,6	-3,6	-12,0	-11,6	-9,5	-6,8
	1,0	28,8	33,8	17,0	33,3	15,6	31,2	8,0	28,6	-0,7	-13,8	-13,3	-11,1	-8,6
	2,0	14,7	17,4	18,4	17,1	16,3	16,1	9,5	14,8	0,7	-14,7	-14,3	-12,1	-9,6
	4,0	7,4	8,8	18,9	8,7	17,6	8,2	10,8	7,5	1,4	-15,2	-14,6	-12,6	-10,2
-15,0	0,5	64,8	72,5	11,9	71,5	10,3	67,2	3,7	62,1	-4,2	-16,3	-15,9	-13,6	-11,1
	1,0	33,7	38,3	13,6	37,8	12,2	35,7	5,9	33,1	-1,8	-18,4	-17,8	-15,7	-13,2
	2,0	17,2	19,7	14,5	13,5	13,4	18,4	7,0	17,2	0	-19,4	-19,0	-16,9	-14,4
	4,0	8,7	10,0	14,9	9,9	12,1	9,4	8,0	8,8	1,1	-20,0	-19,5	-17,5	-15,0
-20,0	0,5	74,1	81,3	9,7	80,3	8,4	76,1	2,7	70,9	-4,2	-20,8	-20,3	-18,1	-15,5
	1,0	38,5	42,9	11,4	42,5	10,4	40,4	4,9	37,9	-1,6	-22,9	-22,5	-20,4	-17,9
	2,0	19,6	21,1	9,2	21,9	11,7	20,9	6,6	19,6	0	-24,3	-23,8	-21,7	-19,2
	4,0	9,9	11,2	13,1	11,1	12,1	10,6	7,1	10,0	1,0	-24,9	-24,5	-22,4	-19,9
-25,0	0,5	83,3	90,0	8,0	89,0	6,8	84,7	1,7	79,6	-4,4	-25,2	-24,6	-22,4	-19,8
	1,0	43,3	47,6	10,2	47,2	9,0	45,0	3,9	42,5	-1,8	-27,6	-27,1	-25,0	-22,6
	2,0	22,1	24,5	10,9	24,3	10,0	23,3	5,4	22,0	0	-29,0	-28,5	-26,5	-24,0
	4,0	11,1	12,4	11,7	12,3	10,8	11,8	6,3	11,2	0,1	-29,8	-29,3	-27,2	-24,8

TABLICA 8.2. Wartości poprawek temperaturowych Δt do obliczeniowych temperatur powietrza zewnętrznego w modelu ustalonego przepływu ciepła przez stropodachy poziome. Wartość temperatury t_e , niezbędnej do obliczenia temperatury operatywnej t_{op} , wyznaczono dla warunków bardzo czystego nieba w Rocy. /wzór Swinbanka (8.3)/.

t_e	R	$\epsilon=1,0$		$\epsilon=0,9$		$\epsilon=0,5$		$\epsilon=0,1$	
		t_{op}	Δt	t_{op}	Δt	t_{op}	Δt	t_{op}	Δt
$^{\circ}\text{C}$	m^2KW^{-1}	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0,0	0,5								
	1,0	-5,5	-5,5	-5,0	-5,0	-3,1	-3,1	-0,7	-0,7
	2,0								
	4,0								
-10,0	0,5								
	1,0	-15,8	-5,8	-15,3	-5,3	-13,2	-3,2	-10,7	-0,7
	2,0								
	4,0								
-15,0	0,5								
	1,0	-20,6	-5,6	-20,2	-5,2	-18,1	-3,1	-15,6	-0,6
	2,0								
	4,0								
-20,0	0,5								
	1,0	-25,6	-5,6	-25,2	-5,2	-23,2	-3,2	-20,7	-0,7
	2,0								
	4,0								
-25,0	0,5								
	1,0	-30,6	-5,6	-30,1	-5,1	-28,1	-3,1	-25,7	-0,7
	2,0								
	4,0								

wydzielono wartości t_{os} niższe od temperatury powietrza zewnętrznego t_e /chłodzenie radiacyjne/. Różnica między wartościami t_{os} i t_e rośnie w miarę wzrostu wartości współczynnika emisyjności zewnętrznej powierzchni stropodachu ϵ , zaś dla danych wartości t_e i ϵ różnica ta rośnie wraz ze wzrostem wartości oporu cieplnego R stropodachu.

W tabelicy 8.2 przedstawiono wartości temperatur operatywnych t_{op} dla poszczególnych temperatur obliczeniowych powietrza zewnętrznego, przyjętych do analizy i dla poszczególnych wartości współczynnika emisyjności ε zewnętrznej powierzchni stropodachu. Ponadto w tabelicy zamieszczono również wartości Δt :

$$\Delta t = t_{op} - t_e \quad (8.20)$$

gdzie Δt jest poprawką temperaturową, wskazującą o jaką wartość należy zmodyfikować obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego, aby przyjęty model ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła uwzględniał rzeczywiste radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego. Inaczej mówiąc, nową temperaturą obliczeniową jest temperatura operatywna środowiska, niższa od temperatury powietrza o wartość Δt . Różnica między temperaturami t_{op} i t_e prowadzi do obniżenia wartości temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} w stosunku do temperatury powietrza t_e /tablica 8.1 oraz rys..8.8/. W obliczeniach metodą tradycyjną /przy założeniu $t_r = t_e$ / otrzymuje się wartość temperatury powierzchni zewnętrznej stropodachu t_{os} minimalnie wyższą od wartości temperatury t_e . Tablica 8.2 wskazuje, że wartość bezwzględna poprawki temperaturowej Δt rośnie wraz ze wzrostem wartości współczynnika emisyjności dla zewnętrznej powierzchni stropodachu. Dla powierzchni o współczynniku $\varepsilon = 0,9$ temperaturę obliczeniową powietrza zewnętrznego, dla poziomych lub nachylonych pod niewielkim kątem stropodachów należałoby obniżyć o $5,2^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że obowiązujące obecnie normowe temperatury obliczeniowe, zawarte w zakresie od -16°C do -24°C , po modyfikacji będą zawarte w za-

kresie od $-21,2^{\circ}\text{C}$ do $-29,2^{\circ}\text{C}$. Analizę obliczeniową przeprowadzono dla warunków bardzo czystego nieba, według wzoru Swinbanka (8.3). Jak już wspomniano w rozdziale 8.1.1, należy się spodziewać, że nad obszarami przemysłowymi lub nad obszarami dużych aglomeracji miejskich wartość średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego będzie wyższa niż to wynika z wyrażenia (8.3) /potwierdzają to Brown i Istfält, a także badania autora niniejszej pracy - rozdział 8.1.1/.

Wyżej opisany cykl obliczeń powtórzono, przy czym do analizy przyjęto średnie wartości temperatur t_r , według badań Browna i Istfälta oraz według badań przeprowadzonych przez autora niniejszej pracy /rys. 8.4/ dla płaszczyzny poziomej. Z braku danych nie przeprowadzono analizy dla temperatury $t_e = -25^{\circ}\text{C}$. Wyniki obliczeń zamieszczono w tablicach 8.3 i 8.4.

Wnioski dotyczące wyników z poprzedniego cyklu obliczeń /tablice 8.1 i 8.2/ można również odnieść do rezultatów zamieszczonych w tablicach 8.3 i 8.4; charakter zmian interesujących wielkości jest podobny, zmieniły się jedynie wartości tych wielkości. Z tablicy 8.4 wynika, że dla stropodachów poziomych lub nachylnych pod niewielkim kątem, których zewnętrzna powierzchnia charakteryzuje się współczynnikiem $\varepsilon = 0,9$, obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego należałoby obniżyć o $3,3^{\circ}\text{C}$.

Na rysunku 8.8 przedstawiono przebieg zmienności temperatury operatywnej w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej. Dla porównania naniesiono również wartości temperatury t_r dla płaszczyzny poziomej oraz temperaturę powietrza zewnętrznego t_e . Natomiast na rysunku 8.9 pokazano wartości poprawek temperatu-

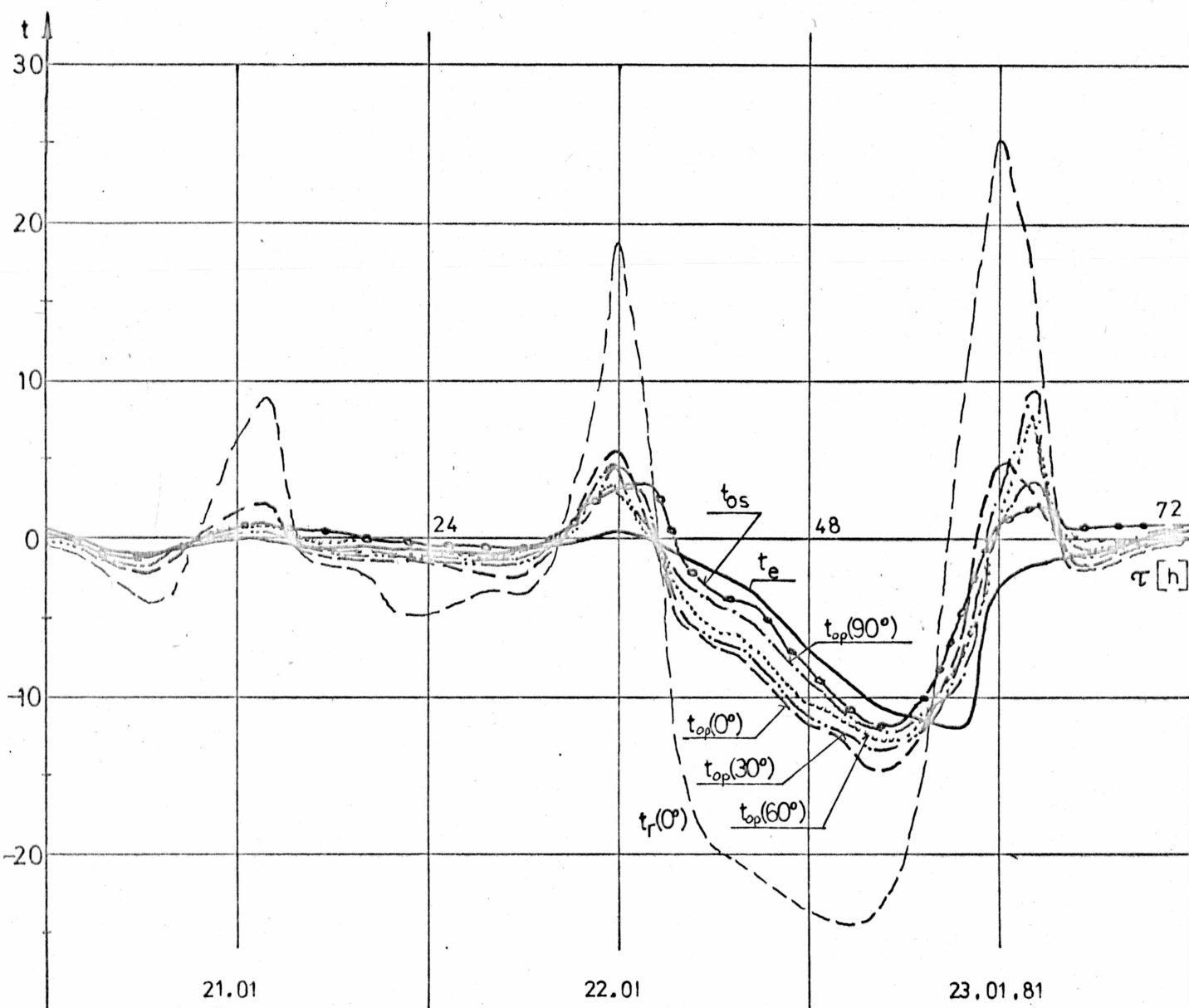
TABLICA 8.3. Zestawienie normowych wartości gęstości strumienia ciepła q_N , przepływającego przez poziomy stropodach o różnych własnościach emisyjnych zewnętrznej powierzchni obliczonych metodą tradycyjną/ stan ustalony, $t_e = t_r$ z wartościami gęstości strumienia ciepła q przepływającego przez ten stropodach, obliczonymi w stanie ustalonym przy założeniu $t_e \neq t_r$, przy czym t_r wyznaczono na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych przez autora niniejszej pracy. Dodatkowo przedstawiono wartości temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu t_{os} , obliczonej przy założeniu $t_e \neq t_r$. Wartości q, t_{os} obowiązują dla czystego nieba w nocy w warunkach klimatycznych Wrocławia.

t_e	R	q_N	$\varepsilon=1,0$		$\varepsilon=0,9$		$\varepsilon=0,5$		$\varepsilon=0,1$		Temperatura t_{os} dla			
			q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	q	$\frac{q-q_N}{q_N}$	$\varepsilon=1,0$	$\varepsilon=0,9$	$\varepsilon=0,5$	$\varepsilon=0,1$
$^{\circ}\text{C}$	m^2KW^{-1}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	Wm^{-2}	%	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
0,0	0,5	37,0	41,7	12,7	41,2	11,4	38,7	4,6	36,6	-1,1	-0,9	-0,6	0,6	2,2
	1,0	19,2	22,0	14,6	21,7	13,0	20,5	6,8	19,1	-0,5	-2,0	-1,8	-0,5	1,0
	2,0	9,8	11,3	15,3	11,2	14,3	10,6	8,2	9,8	0,0	-2,6	-2,3	-1,2	0,3
	4,0	5,0	5,7	14,0	5,7	14,0	5,4	8,0	5,0	0,0	-2,9	-2,7	-1,5	0,0
-10,0	0,5	55,6	59,8	7,6	59,2	6,5	56,4	1,4	55,1	-0,9	-9,9	-9,6	-8,2	-6,5
	1,0	28,8	31,5	9,4	31,3	8,7	29,9	3,8	28,4	-1,4	-11,6	-11,5	-10,0	-8,4
	2,0	14,7	16,2	10,2	16,1	9,5	15,5	5,4	14,7	0,0	-12,4	-12,2	-10,9	-9,4
	4,0	7,4	8,2	10,8	8,2	10,8	7,9	6,8	7,5	1,4	-12,9	-12,3	-11,4	-9,9
-15,0	0,5	64,8	68,8	6,2	68,2	5,2	65,3	0,8	63,9	-1,4	-14,4	-14,2	-12,7	-10,9
	1,0	33,7	36,4	8,0	36,1	7,1	34,7	3,0	33,2	-1,5	-16,4	-16,1	-14,7	-13,0
	2,0	17,2	18,7	8,7	18,6	8,1	17,9	4,1	17,1	-0,5	-17,4	-17,1	-15,8	-14,2
	4,0	8,7	9,5	9,2	9,4	8,0	9,1	4,6	8,7	0,0	-17,9	-17,6	-16,4	-14,8
-20,0	0,5	74,1	77,8	5,0	77,0	3,9	71,1	0,4	73,5	-0,9	-18,9	-18,6	-17,1	-15,3
	1,0	38,5	41,1	6,8	40,6	6,0	39,4	2,3	37,7	-2,1	-21,1	-20,8	-19,4	-17,7
	2,0	19,6	21,1	7,7	21,0	7,1	20,3	3,6	19,5	0,5	-22,3	-21,9	-20,5	-19,0
	4,0	9,9	10,7	8,1	10,7	8,1	10,3	4,0	9,9	0,0	-22,9	-22,6	-21,3	-19,7

TABLICA 8.4. Wartości poprawek temperaturowych Δt do obliczeniowych temperatur powietrza zewnętrznego w modelu ustalonego przepływu ciepła przez stropodachy poziome. Wartości Δt obowiązują dla czystego nieba w nocy w warunkach klimatycznych Wrocławia

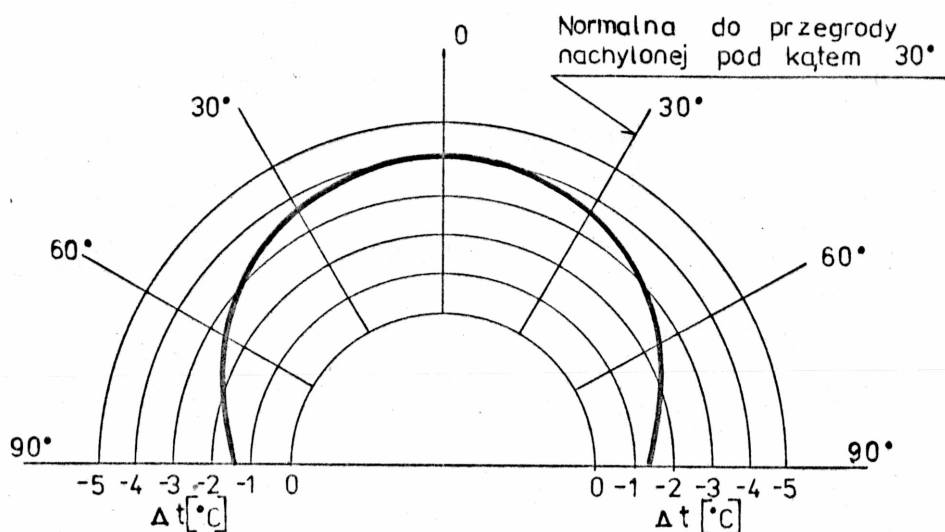
t_e	R	$\epsilon=1,0$		$\epsilon=0,9$		$\epsilon=0,5$		$\epsilon=0,1$	
		t_{op}	Δt	t_{op}	Δt	t_{op}	Δt	t_{op}	Δt
$^{\circ}C$	$m^2_{KW}^{-1}$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
0,0	0,5	-3,3	-3,3	-3,0	-3,0	-1,9	-1,9	-0,4	-0,4
	1,0								
	2,0								
	4,0								
-10,0	0,5	-13,4	-3,4	-13,1	-3,1	-11,9	-1,9	-10,4	-0,4
	1,0								
	2,0								
	4,0								
-15,0	0,5	-18,5	-3,5	-18,3	-3,3	-17,0	-2,0	-15,4	-0,4
	1,0								
	2,0								
	4,0								
-20,0	0,5	-23,6	-3,6	-23,3	-3,3	-22,0	-2,0	-20,4	-0,4
	1,0								
	2,0								
	4,0								

wych Δt /wyrażenie (8.20)/ w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej, na podstawie pomiarów przeprowadzonych w nocy z 22 na 23.01.1981 roku. Pomiary na budynku istniejącym /obiekt we Wrocławiu/ wykazały, że dla stropodachu poziomego / $\epsilon = 0,9$ / wartość poprawki Δt wynosi około $-4,5^{\circ}C$, natomiast dla ściany około $-1,5^{\circ}C$. Badania potwierdziły więc, że obliczeniową temperaturę powietrza zewnętrznego dla poziomego lub nachylonego pod niewielkim kątem stropodachu /pokrytego np. papą, $\epsilon = 0,9$ /,



Rys. 8.8. Przebieg wartości temperatury operatywnej dla różnych kątów pochylenia przegrody budowlanej, na podstawie pomiarów przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.

w warunkach bezchmurnego nieba w nocy, należy obniżyć o około 4°C . Gdy kąt pochylenia stropodachu rośnie, wartość bezwzględna poprawki temperaturowej Δt maleje. Dla stropodachów o dużym kącie pochylenia /a szczególnie ścian/ rośnie bowiem wartość natężenia długofalowego promieniowania nieboskłonu, docierającego do powierzchni stropodachu, rośnie więc udział czynnika kompen-



Rys. 8.9. Wartości poprawek temperaturowych Δt /wyrażenie (8.20)/ w funkcji kąta pochylenia przegrody budowlanej, na podstawie pomiarów przeprowadzonych w warunkach bezchmurnej nocy z 22 na 23.01.1981 roku. Współczynnik emisyjności przegrody $\epsilon = 0,9$.

sującego wypromieniowanie ciepła z powierzchni stropodachu.

Przeprowadzona powyżej analiza obliczeniowa wykazała, że stosowanie w obliczeniach strat ciepła przez stropodachy, w stanach ustalonych, założenia upraszczającego o równości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania środowiska zewnętrznego jest zbyt dużym uproszczeniem i może prowadzić do poważnych błędów w określonej wielkości tych strat. Zaleca się więc wprowadzić poprawki temperaturowe do obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego i w ten sposób uwzględnić w modelu ustalonego jednokierunkowego przepływu ciepła rzeczywiste radiacyjne oddziaływanie środowiska zewnętrznego na przegrody budowlane. Wartość tych poprawek będzie różna w różnych regionach kraju, w zależności od stopnia zanieczyszczenia atmosfery oraz od frekwencji dni pogodnych i pochmurnych na danym obszarze. Dobór wartości Δt powinien więc być poparty analizą danych meteorologicznych dla

danego regionu.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wartość poprawki Δt dla stropodachów pełnych, zlokalizowanych we Wrocławiu, o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ i pokrytych materiałem o współczynniku emisyjności $\epsilon = 0,9$, wynosi $- 4^\circ\text{C}$.

8.4. Ocena przyjętego modelu i zastosowanej metody obliczeniowej

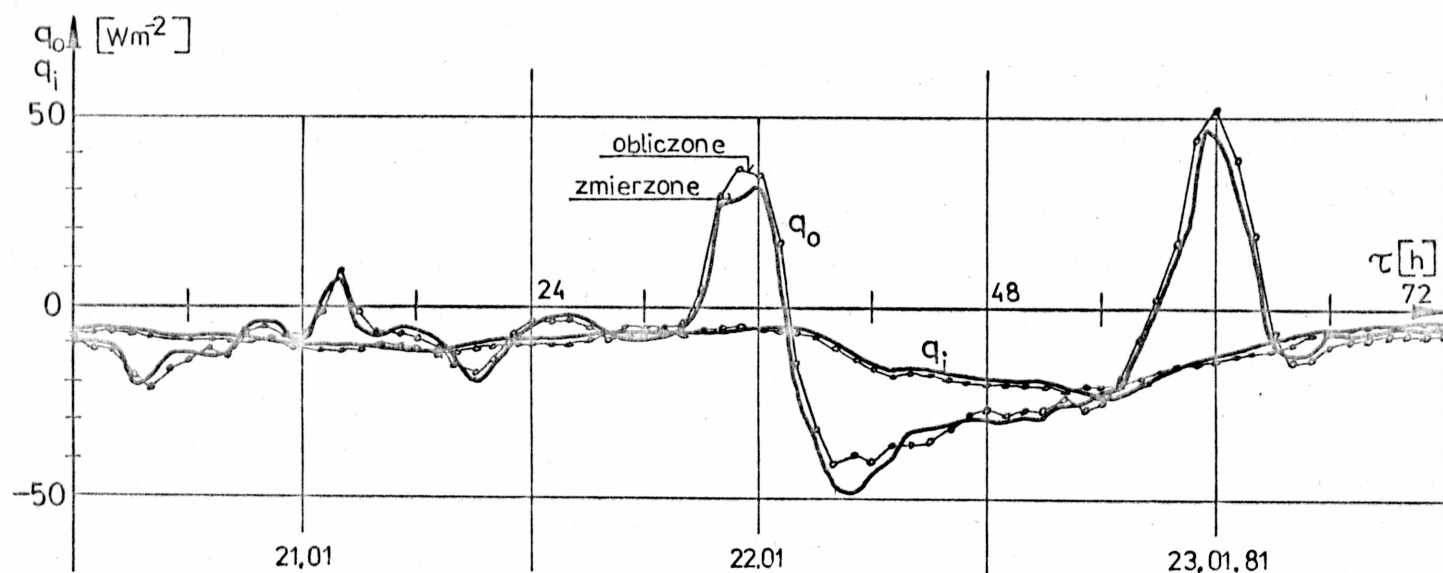
Podstawę do obliczeń wykonanych w niniejszej pracy stanowił model jednokierunkowego nieustalonego przepływu ciepła przez wielowarstwowy stropodach, poddany oddziaływaniu środowiska zewnętrznego. Model ten wraz z założeniami został przedstawiony w rozdziale 2.2. Obliczenia przeprowadzono dla stropodachów pełnych. Przyjęty model nie może być stosowany do opisu przepływu ciepła przez tak zwane stropodachy wentylowane. W wentylowanej pustce powietrznej bowiem, przy prędkości ruchu powietrza różnej od zera, nie jest zachowany warunek jednokierunkowego przepływu ciepła; część ciepła przenikającego przez stropodach pobierana jest na ogrzanie powietrza przepływającego przez pustkę, reszta przekazywana jest do powietrza zewnętrznego przez przekrycie pustki powietrznej.

Jako metodę obliczeniową wykorzystano metodę impulsowej funkcji przeniesienia zaproponowaną w 1971 roku przez Stephensona i Mitalasa. Dokładny opis tej metody wraz z założeniami przedstawiono w rozdziale 3.

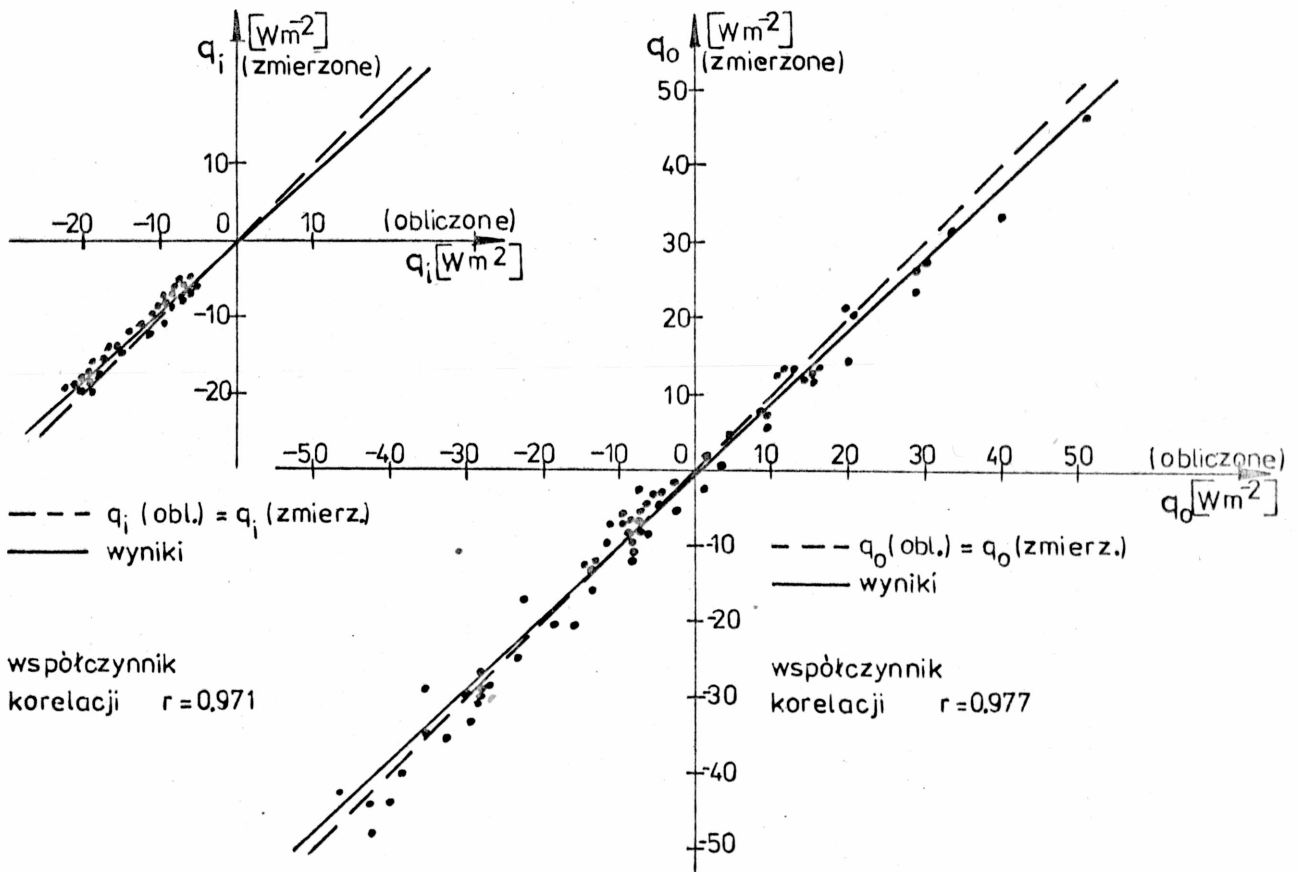
Wyniki obliczeń, wykonanych dla kilku typowych stropodachów, posłużyły jako materiał do analizy wpływu kąta pochylenia płaszczyzny stropodachu i jej zorientowania względem stron świata oraz wpływu selektywnych własności radiacyjnych jego zewnętrznej powierzchni na wielkości zysków i strat ciepła przez stropodach w warunkach nieustalonej wymiany ciepła.

Przed przystąpieniem do wspomnianych obliczeń sprawdzono poprawność przyjętego modelu i zastosowanej metody obliczeniowej poprzez porównanie wyników pomiarów wykonanych na stropodachu

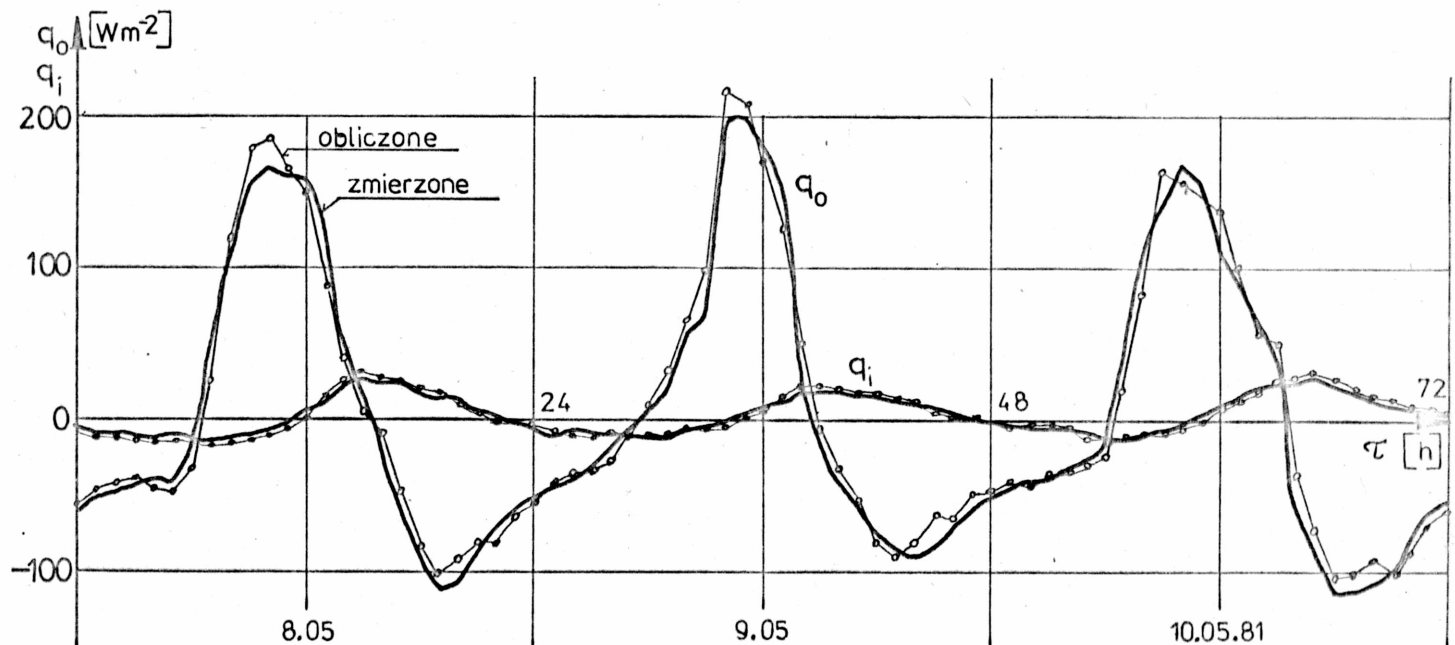
istniejącym z wynikami uzyskanymi dla tego stropodachu na drodze obliczeń. Zestawienie wielkości pomierzonych i obliczonych przedstawiono na rysunkach od 8.10 do 8.13. Z rysunków 8.10 i 8.12 wynika, że przebiegi gęstości strumieni ciepłych, obliczone i zmierzone, prawie pokrywają się w większości przedziałów czasowych. Największe odchylenia między przebiegami przypadają na te przedziały czasowe, w których strumienie osiągają wartości ekstremalne. Przyczyna rozbieżności wartości pomierzonych i obliczonych tkwi, zdaniem autora, w przyjęciu założenia upraszczającego o niezależności współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję $\alpha_k(\tau)$ od temperatury zewnętrznej powierzchni stropodachu $T_{os}(\tau)$.



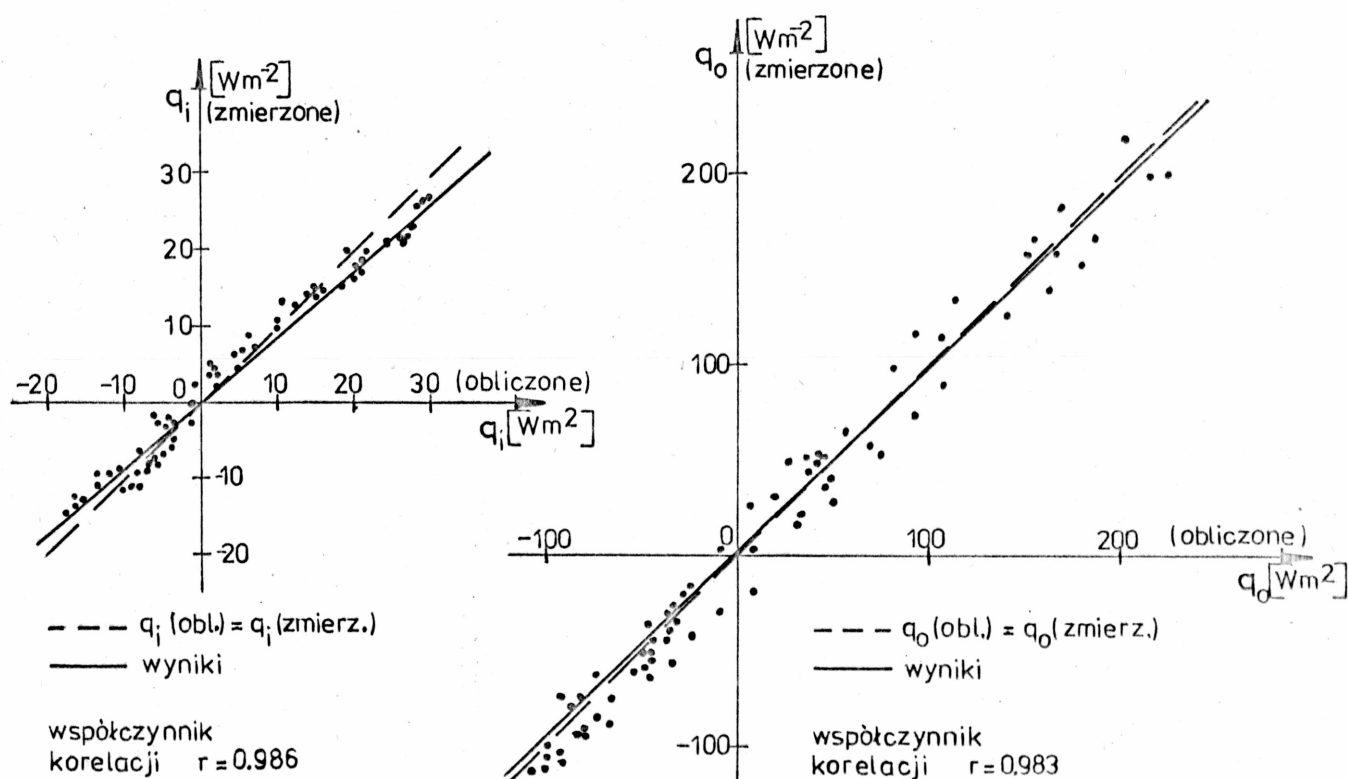
Rys. 8.10. Obliczone i zmierzone wartości gęstości strumienia ciepła $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$ na granicznych powierzchniach stropodachu w funkcji czasu, na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



Rys. 8.11. Porównanie obliczonych i zmierzonych wartości gęstości strumienia ciepła $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$ na granicznych powierzchniach stropodachu, na podstawie badań przeprowadzonych w styczniu 1981 roku.



Rys. 8.12. Obliczone i zmierzone wartości gęstości strumienia ciepła $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$ na granicznych powierzchniach stropodachu w funkcji czasu, na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.



Rys. 8.13. Porównanie obliczonych i zmierzonych wartości gęstości strumienia ciepła $q_o(\tau)$ i $q_i(\tau)$ na granicznych powierzchniach stropodachu, na podstawie badań przeprowadzonych w maju 1981 roku.

Wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję $\alpha_k(\tau)$ uzależniono jedynie od prędkości ruchu powietrza $v(\tau)$ /wyrażenie (2.32)/. W rzeczywistości wartość współczynnika $\alpha_k(\tau)$ zależy między innymi od różnicy temperatur powierzchni i otaczającego powietrza, od szorstkości powierzchni, kierunku i prędkości wiatru oraz od własności fizyko-chemicznych powietrza. Uwzględnienie tych wszystkich czynników w obliczeniach stwarza duże trudności. Stąd w praktycznych zastosowaniach korzysta się z formuł empirycznych uzyskanych na podstawie badań w tunelach aerodynamicznych /Rowley, Algran, Blackshaw [108], [109]/, bądź badań na obiektach rzeczywistych /Ito, Kimura Oka [51]/. Spotykane najczęściej formuły /Cole, Sturrock [23]/ uzależniają wartość $\alpha_k(\tau)$ jedynie od prędkości wiatru. Chwilowa wartość gęstości strumienia ciepła, wymienianego przez konwekcję na zewnętrznej powierzchni stropo-

dachu, zależy od chwilowej wartości współczynnika $\alpha_k(\tau)$ oraz od różnicy temperatur powierzchni $T_{os}(\tau)$ i otaczającego powietrza $T_e(\tau)$. Gdy różnica wymienionych temperatur jest duża /dla słonecznego dnia i bezchmurnej nocy/ niewielkie odchylenie $\alpha_k(\tau)$ od wartości rzeczywistej, spowodowane np. przyjęciem opisanego założenia upraszczającego, może prowadzić do dużego błędu w obliczanej gęstości strumienia ciepła. Stąd więc największe odchylenia między przebiegami gęstości strumieni cieplnych pomierzonych i obliczonych przypadają na przedziały czasowe, w których te wielkości osiągają ekstremalne wartości /wówczas występuje największa różnica między temperaturami $T_{os}(\tau)$ i $T_e(\tau)$ /.

Zbieżność wielkości pomierzonych i obliczonych jest również zdeterminowana dokładnością stosowanych przyrządów pomiarowych. W badaniach wykorzystano przyrządy pomiarowe o dużej dokładności /radiometry różnicowe, solaryometr, kontaktowy termometr o odczycie cyfrowym, termopary i inne/ oraz, w charakterze urządzenia rejestrującego, system minikomputerowy umożliwiający natychmiastowy i obiektywny odczyt oraz zapis na taśmie mierzonych wielkości w żądanej chwili czasowej.

Dobra zgodność przebiegów otrzymanych na podstawie obliczeń i uzyskanych z pomiarów świadczy o tym, że przyjęty model oraz stosowana metoda obliczeniowa stanowią wystarczająco dokładny opis jakościowy i ilościowy procesów cieplnych, zachodzących w układzie termokinetycznym: środowisko zewnętrzne-stropodach-pomieszczenie pod stropodachem.

Uzyskanie zadowalających rezultatów obliczeniowych jest wynikiem niewątpliwych zalet metody Stephensona i Mitalasa. Metoda ta pozwala na dokonywanie obliczeń nieustalonego przepływu ciepła

przez przegrody wielowarstwowe z uwzględnieniem rzeczywistej zmienności środowiska zewnętrznego /zmienność według dowolnej funkcji czasu/. Literatura fachowa wskazuje, że stosunkowo łatwo i we względnie prostej postaci otrzymuje się rozwiązanie nieustalonej wymiany ciepła przy harmonicznym zmianach warunków brzegowych /Albright, Scott [1]/, a gdy warunki brzegowe zmieniają się według dowolnej funkcji /stochastycznie /, znane są jedynie nieliczne rozwiązania. Metoda Stephensona i Mitalasa, zwana metodą impulsowej funkcji przeniesienia, należy więc do tych nielicznych rozwiązań. Pozwala ona także na przyjęcie zależności współczynników przejmowania ciepła od temperatury powierzchni, chropowatości powierzchni, temperatury powietrza, warunków wietrznych itp. pod warunkiem jednak, że znane są formuły matematyczne opisujące te zależności. Metoda impulsowej funkcji przeniesienia umożliwia przeprowadzenie obliczeń dla różnie sformułowanych nieustalonych warunków brzegowych dla powierzchni granicznych przegrody /warunki brzegowe I-rodzaju, II-rodzaju lub III-rodzaju/. Stwarza ona możliwość obliczenia temperatury i gęstości strumienia ciepła nie tylko na powierzchniach granicznych, lecz także w dowolnym przekroju wewnątrz przegrody.

Barierą w powszechnym stosowaniu metody impulsowej funkcji przeniesienia jest jej duża złożoność matematyczna i wynikająca stąd konieczność stosowania komputerów o dużej pojemności pamięci operacyjnej. Ponadto stosowany aparat matematyczny /przekształcenie Laplace'a, przekształcenie-Z/ oraz przyjęcie nomenklatury i pewnych sposobów podejścia z automatyki stwarza trudności w samej adaptacji metody. Trudności z zastosowaniem metody Stephensona i Mitalasa rekompensuje duża prostota w przygotowaniu danych

wejściowych do obliczenia współczynników impulsowych funkcji przeniesienia oraz w wykorzystaniu tych współczynników do obliczania przebiegów czasowych gęstości strumieni cieplnych lub temperatur. Praktyczną zaletą stosowania tej metody obliczeniowej jest to, że wymuszenie /oddziaływanie środowiska zewnętrznego oraz środowiska termicznego w pomieszczeniu/, niezbędne do obliczenia interesujących przebiegów czasowych, podaje się w postaci wartości w dyskretnych chwilach czasowych /mogą to być przykładowo wartości natężenia całkowitego promieniowania słonecznego pomierzone lub obliczone dla pełnych godzin doby/. Wymuszenie może być w związku z tym dowolną funkcją czasu, o dowolnie skomplikowanych kształtach. Dokładność obliczonych współczynników impulsowej funkcji przeniesienia zależy od przyjętego przedziału dyskretyzacji, to znaczy od przyjętej długości kroku czasowego. Stephenson i Mitalas, po przetestowaniu metody dla różnych przegród budowlanych i różnych wymuszeń podają, że przyjęcie do obliczeń kroku czasowego o długości 1 godziny zapewnia zadowalającą dokładność.

W niniejszej pracy obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej o dużej pojemności RIAD-32 oraz na maszynie cyfrowej ODRA-1325 pod systemem GEORGE-3. Program na maszynę cyfrową RIAD-32, opracowany w języku FORTRAN IV, stanowi trzon obliczeń. Danymi wejściowymi do tego programu są własności fizyczne poszczególnych warstw stropodachu, to znaczy: grubość warstwy d_k , współczynnik przewodzenia ciepła λ_k , ciepło właściwe c_{pk} oraz gęstość materiału ρ_k i ewentualnie opór cieplny pustki powietrznej, w przypadku jej występowania. Wielkości wyjściowe z programu stanowią obliczone współczynniki szukanych impulsowych funkcji

przeniesienia. Współczynniki te wykorzystano jako dane wejściowe do programu, opracowanego w języku FORTRAN na maszynie ODRA-1325, który w oparciu o te dane oraz dane klimatyczne, dotyczące środowiska zewnętrznego i środowiska termicznego w pomieszczeniu, oblicza przebiegi czasowe interesujących gęstości strumieni cieplnych oraz temperatur.

Największą zaletą stosowania metody Stephensona i Mitalasa jest to, że dla konkretnej przegrody budowlanej wystarczy wyznaczyć współczynniki impulsowych funkcji przeniesienia tylko raz. Wielkości tych współczynników są charakterystyczne dla danej przegrody budowlanej i w sposób jednoznaczny opisują jej własności dynamiczne. Do ilościowego określenia efektów nieustalonej wymiany ciepła przez wielowarstwową przegrodę budowlaną, dla której znane są współczynniki impulsowych funkcji przeniesienia, wystarczy więc znajomość termicznego oddziaływania środowiska i pomieszczenia. Celowym więc wydaje się opracowanie katalogu współczynników impulsowych funkcji przeniesienia dla typowych stropodachów pełnych i ścian zewnętrznych.

9. WNIOSKI

1. Przyjęty w niniejszej pracy model nieustalanej wymiany ciepła w połączeniu z metodą Stephensona i Mitalasa zadowalająco odzwierciedla rzeczywiste procesy cieplne, zachodzące między środowiskiem zewnętrznym, stropodachem i środowiskiem termicznym pomieszczenia pod stropodachem.
2. Wysoka wartość współczynnika selektywności /stosunek współczynnika absorpcji dla promieniowania krótkofalowego do współczynnika emisyjności dla promieniowania długofalowego/ dla zewnętrznej powierzchni poziomego lub nachylonego pod niewielkim kątem stropodachu pełnego zapewnia jedynie nieznaczne ograniczenie strat ciepła przez stropodach w zimie, rzędu kilku procent.
3. W warunkach nieustalanej wymiany ciepła, w obliczeniach bilansu cieplnego stropodachów pełnych o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ dla okresu zimowego i dla nocy w okresie letnim, stropodachy te można traktować jako poziome. Dla dnia w okresie letnim należy natomiast uwzględnić rzeczywisty kąt pochylenia oraz zorientowanie płaszczyzny stropodachu względem stron świata.
4. Celem doboru selektywnych własności radiacyjnych zewnętrznej powierzchni stropodachów pełnych o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ powinno być ograniczenie nadmiernych zysków ciepła od nasłonecznienia latem.
5. Dla stropodachów pełnych o kącie pochylenia $\beta > 30^\circ$ doboru wartości współczynnika selektywności powierzchni zewnętrznej na-

leży dokonać poprzez optymalizację pod kątem ograniczenia zysków ciepła od nasłonecznienia latem i zmniejszenia strat ciepła zimą. W obliczeniach tych należy uwzględnić kąt pochylenia i zorientowanie płaszczyzny stropodachu względem stron świata.

6. W celu ograniczenia błędu w określaniu wielkości strat ciepła przez stropodachy pełne w zimie, zaleca się uwzględniać w obliczeniach metodą tradycyjną /stan ustalony/ rzeczywiste oddziaływanie radiacyjne środowiska zewnętrznego poprzez zastosowanie poprawki temperaturowej, obniżającej wartość obliczeniowej temperatury powietrza zewnętrznego. Wartość tej poprawki zależy od kąta pochylenia stropodachu i od własności emisyjnych jego powierzchni zewnętrznej oraz od stopnia zanieczyszczenia atmosfery i od stopnia zachmurzenia nieba na danym obszarze. Dla stropodachów pełnych, zlokalizowanych we Wrocławiu, o kącie pochylenia $\beta \leq 30^\circ$ i współczynniku emisyjności powierzchni zewnętrznej $\varepsilon = 0,9$ wartość tej poprawki wynosi -4°C .

PISMIENNICTWO

1. Albright L.D., Scott N.R.: An analysis of steady periodic building temperature variations in warm weather - part I: a mathematical model. Transactions of the ASAE, Vol. 17, 1974, s. 88-92.
2. Andersen K.T.: Condensation problems in insulated metal roof decking. IX CIGR Congres, Michigan State university, East Lansing, Michigan, July 8 + 12, 1979.
3. Ashton D.F.: Tests to measure the thermal properties of the external fabric of the six test houses. The Electricity Cauncil Research Centre, Capenhurst Chester CH1 6ES, ECRC/N/24, Job No 461, May, 1974.
4. Atlas klimatyczny Polski. IMGW, Warszawa 1973.
5. Bac S., Rojek M.: Meteorologia i klimatologia. PWN, Warszawa 1979.
6. Badot J.: Calculation of heating requirement by using recuperation factor to solar radiation. Second International CIB Symposium on Energy Conservation in the Built Environment, Copenhaga 1979.
7. Basnett P.: Thermal modelling of constructional elements used in the E.C.R.S. test houses. The Electricity Council Research Centre. Capenhurst Chester CH1 6ES, ECRS/R605, Job No 461, April, 1973.
8. Battan L.J.: Pogoda. PWN, Warszawa, 1979.
9. Będkowski S., Czarnowski K., Sliwowski L., Żymalski Cz.: Fizyka budowli. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.

10. Brinkworth B.J.: Energia słoneczna w służbie człowieka. PWN, Warszawa 1979.
11. Brown G., Isfält E.: Irradiation from sun and sky in Sweden on clear days. Tables and Charts, Royal Institute of Technology, Department of Heating and Ventilating, Raport 19, Stockholm 1969.
12. Brunt D.: Notes on radiation in the atmosphere. Quart. J.R.Met. Soc. Vol. 58, 1932, s. 309-420.
13. Burch D.M.: The use of aerial infrared thermography to compare the thermal resistances of roofs. NBS Technical Note 1107, Washington, August 1979.
14. Burch D.M., Luna D.E.: Mathematical model for predicting attic ventilation rates required for preventing condensation on roof sheathing. ASHRAE Transaction, Vol. 86, Part 1, No 2568, 1980.
15. Burch D.M.: Infrared audits of roof heat loss. ASHRAE Transactions, Vol. 86, Part. 2, 1980, s. 209-226.
16. Cammerer J.S.: Izolacje ciepłochronne w przemyśle. Arkady, Warszawa 1967.
17. Cena K., Clark J.A.: Bioengineering, thermal physiology and comfort. Wrocław Technical University Press, Wrocław, Elsevir Scientific Publishing Company, Amsterdam - Oxford - New York 1980.
18. Clark J.A., Cena K.: Solar and thermal radiative heat loads in the energy balance of man. Engineering in Medicine, J. Mech. E., Vol. 5, No 3, 1976.

19. Clark J.A., Cena K.: Monitoring the house environment.
W książce: Environmental Aspects of Housing for Animal Production. Butlerworths, London 1981.
20. Coldicutt A.B.: A simple method for predicting annual energy requirements for heating buildings. Second International CIB Symposium on Energy Conservation in the Built Environment, Copenhagen 1979.
21. Cole R.J.: The longwave radiative environment around buildings. Building and Environment, Vol. 11, Part 1, 1976, s. 3-13.
22. Cole R.J.: The longwave radiation incident upon the external surface of buildings. Building Services Engineer, Vol. 44, Dec. 1976, s. 195-206.
23. Cole R.J. Sturrock N.S.: The convective heat exchange at the external surface of building. Building and Environment, Vol.12, Pergamon Press 1977, s. 207-214.
24. Colliver D.G., Loewer O.J., Duncan G.A.: A simulation model for determining the energy budget of a user defined human dwelling. Transactions of the ASAE, Vol. 21, No 4, 1978, s. 754-760.
25. Cornish J.P.: Climates within roof spaces. BRE News, No 41, 1977, s. 2-4.
26. Coulson K.L.: Solar and terrestical radiation. Method and measurements. Academic Press, New York, San Francisco, London 1975.
27. Cullen W.C.: Solar heating, radiative cooling and thermal movement - their effects on built-up roofing. Technical Note 231, NBS, Washington, Dec. 1964.

28. Czarnowski K., Duc E., Kulikowski J., Müller M.: Problemy fizykochemiczne stropodachów. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Nr 10, Seria: Studia i Materiały Nr 7, "Wybrane zagadnienia ochrony budowli", Wrocław 1972, s. 9-17.
29. Czarnowski K., Kuska Z.: Izolacyjność termiczna lekkich stropodachów niewentylowanych a komfort cieplny wewnątrz w okresie lata. Wyższa Szkoła Inżynieryjna - Zielona Góra, Zeszyty Naukowe Nr 14, Budownictwo, 1973, s. 107-119.
30. Czarnowski K., Hlebionek J.: Optymalizacja otworów wentylacyjnych dwudzielnych stropodachów. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 12, Seria: Studia i Materiały Nr 9, Wybrane zagadnienia z fizyki budowli", Wrocław 1971, s. 3-18.
31. Dinwoodie J.M.W.: Properties and performance of materials used in timber flat roofs. BRE News, No 41, 1977, s. 4-5.
32. Duffie J.A., Beckmann W.A.: Solar energy thermal processes. John Wiley and Sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1974.
33. Friedly J.C.: Analiza dynamiki procesów. WNT, Warszawa 1975.
34. Fuksa M.: Wpływ deformacji termicznych żelbetowego stropodachu na odkształcenia i naprężenia w murach zewnętrznych budynku. Czasopismo Techniczne, nr 5/1960.
35. Funk J.L.: Improved polythence shielded net radiometer. Sci. Instruments, Vol. 36, 1959, s. 267-270.
36. Gagge A.P., Nishi Y.: Heat exchange between human skin surface and thermal environment. Handbook of Physiology, chapter 5, section 9, 1977, s. 69-92.

37. Gertis K.: Die thermodynamische Wirkung von Luftspalten in belüfteten Flachdächern. Betonwerk und Fertigteil - Technik 7/1978, s. 376-382.
38. Gertis K.: Die hygische Wirkung von Luftspalten in belüfteten Flachdächern. Betonwerk und Fertigteil-Technik 2/1979, s.108-114.
39. Gertis K., Erhorn H.: Infrarotwirksame Schichten zur Energieeinsparung bei Gebäuden? Gesundheits-Ingenieur, 103, No 1, 1982, s. 20-34.
40. Goldstein R.J.: Application of aerial infrared thermography to the measurement of building heat loss. ASHRAE Trans., Vol. 84, Part. 1, 1978.
41. Goldstein R.J., Ramsey J.W., Hain R.C.: Determination of building heat loss using an airborne infrared scanner - comparison of ground based and thermographic measurements. ASHRAE Trans., Vol. 86, pp. 146-165, Part II. 1979, s. 146-165.
42. Goliński J., Halupczak J., Werszko D.: Wpływ promieniowania słonecznego na nagrzewanie się wagonów kolejowych w warunkach klimatycznych Polski. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej, Nr 27, Seria: Studia i Materiały, Nr12, "Wymiana ciepła", Wrocław 1974, s. 3-24.
43. Grzeszczyk W., Nowak H., Marszałek K.: Wpływ absorpcyjnych i emisyjnych własności powierzchni przegród budowlanych na wartość współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 37, Seria: Konferencje Nr 7, "Problemy fizyki i och-

rony budowli", Wrocław 1982, s. 67-72.

44. Grzeszczyk W., Nowak H., Marszałek K., Cena K.: Skorygowana temperatura powietrza jako wskaźnik termiczny przegród budowlanych. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Raport Serii PRE 16/1982.
45. Grzeszczyk W., Marszałek K., Nowak H., Śliwińska E., Cena K.: Skorygowana temperatura powietrza w procesie wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie przegród budowlanych. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Nr 37, Seria: Konferencje, Nr 7, Problemy fizyki i ochrony budowli", Wrocław 1982, s. 26-33.
46. Grzeszczyk W.: Proces nieustalanej wymiany ciepła w przegrodach budowlanych z uwzględnieniem skorygowanej temperatury powietrza zewnętrznego. Praca doktorska w przygotowaniu. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.
47. Høglund B.J., Mitalas G.P., Stephenson D.G.: Surface temperatures and heat fluxes for flat roofs. Journal Building Science, Vol. 2, No 1, January 1967, s. 29-36.
48. Houghteen F.C., Blackshaw J.L., Pough E.M., McDermontt P.: Heat transmission as influenced by heat capacity and solar radiation. ASHVE Transactions, Vol. 38, 1932, s. 131.
49. Hrgian A.H.: Fizika atmosfery. Tom 1 i 2. Leningrad, "Gidrometeoizdat", 1978.
50. Idso S.B., Jackson R.D.: Thermal radiation from the atmosphere. J.Geophys. Res. Vol. 74, 1969, s. 5397-5403.
51. Ito N., Kimura K., Oka J.: A Field experiment study on the

- convective heat transfer coefficient on exterior surface of a building. ASHRAE Semi-Annual Meeting, New Orleans, LA, 1972.
52. Jerszow A.W., Sołdatow E.A., Kyzanow A.B.: Letnij temperaturnyj režim prinuditelno-wentilirujemoj krysz. Stroitelstwo i Architektura Uzbekistana, No 7, 1967.
53. Jones J.W., Hendrix B.J.: Residential energy requirements and opportunities for energy conservation. ASHRAE Trans. Vol. 82, Part. 1, 1976, s. 417-433.
54. Jones W.P.: Klimatyzacja, Arkady, Warszawa 1981.
55. Jury E.J.: Przekształcenie Z i jego zastosowania. WNT, Warszawa 1970.
56. Külin R., Kneubühl F.: Die Verminderung des Warmeverbrauchs von Gebäuden durch Infrarot - Verspiegelung von Fenstern, Fassaden und Dacharn. Gesundheits-Ingenieur 98, H.9, 1977, s. 244-251.
57. Kimura K. Stephenson D.G.: Solar radiation on claudy days. ASHRAE Trans. Vol. 75, Part. 1, 1969, s. 227-234.
58. Kimura K.: Scientific basis of air conditioning. Applied Science Publishers, LTD 1977.
59. Kneubühl F.K., Zürcher Ch., Thiebaud F., Finger G.: Thermal radiation and building envelopes. Second International CIB Symposium on Energy Conservation in the Built Environment, Copenhagen, 1979.
60. Kneubühl F.K., Finger G., Thiebaud F., Zürcher Ch., Sagelsdorff R., Frank Th.: Energy saving by reduction of the thermal radiation from building envelopes. The International Congress on Building Energy Management, May 12-16, 1980, Portugal.

61. Kołtun M.M.: Selektiwnyje opiczeskije powierchnosti preobrazowatieliej sołnecznoj energii. Izdatielstwo "Nauka", Moskwa 1979.
62. Kopcewicz T.: Fizyka atmosfery. PWN, Warszawa 1956.
63. Kosiba A.: Klimat Wrocławia w 1965 r. i jego anomalie.
W książce: Prace Obserwatorium Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego, Nr 20, PWN, Warszawa-Wrocław, 1979, s. 17-100.
64. Kusuda T.: Procedure employed by the ASHRAE task group for the determination of heating and cooling loads for building energy analysis. ASHRAE, Trans, Vol. 82, Part. 1, 1976, s. 305-314.
65. Kusuda T.: Fundamentals of building heat transfer. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 82, No 2, 1977, s. 96-106.
66. Kuzanow A.B., Sołdatow E.A.: Zimnyje tepłofiziceskije isledowanija prinuditielno wentilirujemoj krysz. Stroitielstwo i Architektura Uzbekistana No 10, 1965.
67. Lawrence G.R.: Detection of heat loss from buildings through aerial thermography: applications and methodology. Proceedings of the Fourth Canadian Symposium on Remote Sensing, Quebec City, May 1977, s. 220-226.
68. Loudon A.G.: Summertime temperatures in building. Building Research Station, Current Papers, CP 47/1968.
69. Mackey C.O., Wright L.T.: Periodic heat flow-homogenous walls and roofs. ASHVE Trans. T.L. 1944.

70. Mackey C.O., Wright L.T.: Periodic heat flow through composite wall or roofs. ASHVE Trans. Vol. 52, 1946.
71. Malicki M.: Obliczanie zysków ciepła od nasłonecznienia przez przegrody przezroczyste i nieprzezroczyste. PWN, Warszawa 1965.
72. Malicki M.: Wentylacja i klimatyzacja. PWN, Warszawa 1981.
73. Marszałek K.: Termograficzna analiza własności termoizolacyjnych przegród budowlanych. Praca doktorska, Instytut Budownictwa, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
74. McIntyre J.S., Birch D.P.: Considerations in the design of timber flat roofs. BRE News, Building Research Establishment 40/1078.
75. Mehta D.P., Woods J.E.: An experimental validation of a rational model for dynamic responses of buildings. ASHRAE Trans. Vol. 86, Part. 2, 1980, s. 487-518.
76. Michalczyk J., Nowak H.: Względny pomiar lokalnych właściwości cieplnych przegród budowlanych za pomocą urządzenia termowizyjnego. Inżynieria i Budownictwo, 3/1980, s. 98-101.
77. Mielnicki J.S.: Uwagi o obliczaniu zysków ciepła od nasłonecznienia przez jednowarstwowe przegrody nieprzezroczyste. COW 6/1970, s. 172-179.
78. Mielnicki J.S., Żydonowicz W.: Obliczanie ścian wielowarstwowych za pomocą analizy macierzowej w przypadku okresowych zmian temperatury, COW 10-11/1970, s. 297-305.
79. Mielnicki J.S., Żydonowicz W.: Przepływ ciepła przez przegrody w stanach przejściowych. Seria: Nowa technika w Inżynierii

- Sanitarnej, Nr 12, "Ogrzewanie i Wentylacja", Arkady, 1980, s. 129-190.
80. Mielnicki J.S., Żydanowicz W.: Przepływ ciepła przez przegrody w ustalonych stanach periodycznych. Seria: Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej, Nr 12, Ogrzewanie i Wentylacja, Arkady, 1980.
81. Molga M.: Meteorologia rolnicza. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1980.
82. Monteith J.R.L.: Fizyka środowiska biologicznego. PWN, Warszawa 1977.
83. Nowak H.: Bilans promieniowania cieplnego stropodachów. W pracy: Marszałek K., Nowak H., Stępniewski W.: Metody badań termograficznych. Etap I. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Raport serii SPR, Nr 73/80, s. 8-41.
84. Nowicki J.: Promieniowanie słoneczne jako źródło energii. Arkady, Warszawa 1980.
85. Odelski J.E.: Ob optimalnom teplovastnostnom režimie ventilirujennyh sovmeščennyh pokrytii. Izviestia Vyższych Učebnych Zaviedienii, Stroitelstwo i Architektura, Nr 12, 1965, s. 120-126.
86. Osiowski J.: Zarys rachunku operatorowego. WNT, Warszawa 1981.
87. Owczarek Z.: Nowy rodzaj stropodachów. Przegląd budowlany Nr 11/1976, s. 499-501.
88. Paljak J., Petterson B.: Thermography of buildings. Raport T-14. The National Swedish Institute for Building Research, Stockholm 1972.

89. Paltridge G.W., Platt G.M.R.: Radiative processes in meteorology and climatology. Developments in atmospheric, Science 5. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford - New York 1976.
90. Parmelee G.V., Huebscher R.G.: Forced convection heat transfer coefficients along a flat surface. ASHVE Trans. May 1946.
91. Parmelee G.V., Aubele W.W.: Radiant energy emission of atmosphere and ground. ASHRAE Trans. Vol. 58, 1952, s. 85-106.
92. Parmelee G.V.: Irradiation of vertical and horizontal surfaces by diffuse solar radiation from cloudless skies. ASHRAE Trans. Vol. 60, 1954, s. 341-358.
93. Pawelski M.J., Mitchell J.W., Beckman W.A.: Transfer functions for combined walls and pitched roofs. ASHRAE Trans. Vol. 85, Part, II, 1979, s. 307-318.
94. Pichowkin W.A.: Pokrytia i krowli promyślnych zdanij na Sewiere. Leningrad Strojizdat, Leningradskoje Otdielenie, 1978.
95. Pieniążek Z.: Niszczenie stropodachów pełnych w zakładach przemysłowych o zwiększonej wilgotności względnej powietrza. Inżynieria i Budownictwo, nr 11/1966, s. 452-455.
96. Pipes L.A.: Matrix analysis of heat transfer problems. Journal of the Franklin Institute, Vol. 263, No 3, March 1957, s. 195-206.
97. Płoński W.: Badanie warunków cieplno-wilgotnościowych w stropdachach o różnej konstrukcji. ITB, Warszawa 1970.
98. Płoński W., Pogorzelski J.A.: Fizyka budowli. Zasady projektowania w zakresie cieplno-wilgotnościowym. Arkady, Warszawa 1979.

99. Pobierowskaja L.N., Fiedorowa M.P.: Izmienčiwost dñewnyh summ summarnoj radiacji dla nakłonných powierchnostiej.
W książce: "Radiacjonnyje prociesy w atmosferie i na ziemnoj powierchnosti". Leningrad, Gidrometeoizdat 1979, s. 151-154.
100. Pogorzelski J.A.: Główne problemy niestacjonarnego przewodzenia ciepła w przegrodach budowlanych. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa PWr, Nr 9, Seria: Monografie, Nr 3, Wrocław 1973.
101. Pogorzelski J.A.: Fizyka cieplna budowli. PWN, Warszawa 1976.
102. Radomski Cz.: Agrometeorologia. PWN, Warszawa 1980.
103. Reagan J.A., Acklam D.M.: Solar reffectivity of common building materials and its influence on the roof heat gein of typical southwestern USA residences. Energy and Building, Vol. 2, 1979, s. 237-248.
104. Roach W.T.: Measurements of atmospheric radiation and the heat balance at the ground at Kew, May 1953 - May 1954. Air Ministry. Met.Res.Comm. M.R.P. 936, 1955.
105. Robinson N.: Solar radiation. Elsevier Publishing Company, Amsterdam - London - New York 1966.
106. Rodrigues C.M., Cole R.J., O'Sullivan R.E.: Computerised thermal design models. Buildings Services Engineer, Vol. 46, May 1978, s. 19-27.
107. Rossiter W.J., Mathey R.G.: Effect of insulation on the surface temperature of roof membranes. National Burean of Standards, Washington, Center for Building Technology, Raport NBSIR 76-987, February 1976.

108. Rowley F.B., Algren A.B., Blackshaw J.L.: Effects of air velocities on surface coefficients. ASHVE Trans. Vol 36, 1930, s. 123-131.
109. Rowley F.B., Algren A.B., Blackshaw J.L.: Surface conductances as affected by air velocity, temperature and character of surface. ASHVE Trans., Vol. 36, 1930, s. 501-508.
110. Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła. WNT, Warszawa 1982.
111. Sayigh A.A.M.: Solar energy engineering. Academic Press, New York, San Francisco, London 1977.
112. Schild E., Oswald R., Rogier D., Schweikert H., Schnapauff V.: Słabe miejsca w budynkach. Zapobieganie błędom w projektowaniu i wykonawstwie. Tom I. Dachy płaskie, tarasy, balkony. Arkady, Warszawa 1982.
113. Sitko W., Wyrwa S.: O pewnym przypadku ocieplonego stropodachu. Przegląd Budowlany nr 1/1969, s. 38-40.
114. Siviour J.B.: Construction, instrumentation and heat loss data of the ECRC experimental houses. The electricity Council Research Centre, Copenhurst CH1 6ES, ECRC/N839, Job No 461, August 1975.
115. Siviour J.B.: Designs for low energy houses. The Electricity Council Research Centre, Copenhurst CH1 6ES, ECRC/M922, Job No 075, March 1976.
116. Sodha M.S., Koushik S.C., Tiwari G.N., Goyal I.C., Malik M.A.S. Optimum distribution of insulation inside and outside the roof. Building and Environment, Vol. 14, 1979, s. 47-52.

117. Sonderegger R.C.: Dynamic models of house heating based on equivalent thermal parameters. Th.D. Thesis, Aerospace and Mech.Sci.Dep. Princeton University, Sept. 1977.
118. Sowell E.F.: The use and limitations of ASHRAE solar algorithms in solar energy utilization studies. ASHRAE Trans. Vol. 84, Part 2, 1978, s. 77-92.
119. Speil J.: Zachmurzenie we Wrocławiu w latach 1964 i 1965. W książce: Prace Obserwatorium Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego, Nr 20, PWN, Warszawa-Wrocław, 1979, s. 243-258.
120. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa 1979.
121. Stephenson D.G., Mitalas G.P.: Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs. ASHRAE Trans. Vol. 77, Part. 2, 1971, s. 177-196.
122. Stępniewski W.: Ilościowa analiza obrazów termograficznych w diagnostyce budowlanej. Praca doktorska, Instytut Budownictwa, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
123. Swinbank W.C.: Long-wave radiation from clear skies. Quart. J.R. Met. Soc. Vol. 89, 1963, s. 339-348.
124. Szarejko W.: Zawilgocenie stropodachów. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej Nr 23, Budownictwo V, PWN-Wrocław 1958, s. 85-92.
125. Szkwarek J.: Uwagi na temat uszkodzeń budynków wywołanych odkształceniami termicznymi stropodachów. Badanie przyczyn i zapobieganie awariom konstrukcji budowlanych. III Sympozjum, Szczecin, grudzień 1977.

126. Unsworth M.H., Monteith J.L.: Longwave radiation of the ground: I. Angular distribution of incoming radiation. Quart. J.R. Met. Soc. Vol. 101, 1975, s. 13-24.
127. Unsworth M.H.: Longwave radiation at the ground: II. Geometry of interception by slopes solids and obstructed planes. Quart. J.R. Met. Soc. Vol. 101, 1975, s. 25-34.
128. Van Der Bruggen R.J.A.: Energy consumption for heating and cooling in relation to building design. Ph.D.Thesis, Eindhoven University of Technology, Sept. 1978.
129. Wasilewski W.: Straty ciepła przez przenikanie do gruntu. COW 4/1971, s. 110-115.
130. Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.
131. Zawada E.: Wybrane zagadnienia statycznych i dynamicznych właściwości cieplnych przegród budowlanych. COW, Nr 10, 1980, s. 286-293.

ROZDZIELNIK

Promotor.....1 egz.
Recenzenci.....2 egz.
Biblioteka Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocł.....1 egz.
Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej.....1 egz.
ZB-7.....1 egz.
Autor.....2 egz.

