

Dorota Chwieduk

**MODELOWANIE I ANALIZA POZYSKIWANIA
ORAZ KONWERSJI TERMICZNEJ ENERGII
PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W BUDYNKU**



INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK
WARSZAWA 2006

Redaktor Naczelny:
doc. dr hab. Zbigniew Kotulski

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Zbysław Pluta

Praca wpłynęła do Redakcji 14 czerwca 2006 r.

Praca habilitacyjna

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład: 100 egz. Ark. Wyd. 16,5

Oddano do druku we wrześniu 2006 roku

Druk i oprawa: Drukarnia Braci Grodzickich, Piaseczno, ul. Geodetów 47a

*Dziękuję bardzo za pomoc w przygotowaniu niniejszej pracy
pani Barbarze Bogdańskiej z Instytutu Meteorologii i
Gospodarki Wodnej, prof. Robertowi Critoph z Uniwersytetu
Warwick w Wielkiej Brytanii, a szczególnie prof. Wojciechowi
Dzieniażewskiemu z IPPT PAN za wsparcie i wyrozumiałość.*

Dedykuję moim rodzicom, mężowi i synom.

SPIS TREŚCI

Ważniejsze symbole	7
WSTĘP	9
Wprowadzenie	9
Przedmiot, cel i zakres pracy	10
1. Struktura promieniowania słonecznego i metody szacowania napromieniowania powierzchni dowolnie usytuowanej	14
1.1 Zależności geometrii sferycznej pomiędzy padającym promieniowaniem słonecznym a dowolnie usytuowaną powierzchnią	14
1.2 Dane promieniowania słonecznego i model klimatu	23
1.3 Promieniowanie słoneczne docierające do dowolnie usytuowanych powierzchni	26
1.3.1 Składowe promieniowania	26
1.3.2 Model izotropowy promieniowania	27
1.3.3 Model anizotropowy promieniowania	30
1.4 Wpływ otoczenia na dostępność promieniowania słonecznego	33
2. Analiza dostępności promieniowania słonecznego do różnie usytuowanych elementów obudowy budynku	39
2.1 Ogólne wskazania odnośnie kształtu budynku	39
2.2 Opis danych promieniowania słonecznego przyjętych do rozważań	42
2.3 Zastosowane metody analizy napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni	45
2.4 Porównanie wyników obliczeń napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni przy wykorzystaniu modelu izotropowego i anizotropowego	47
2.5 Zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku w aspekcie dostępności energii promieniowania słonecznego	54
3. Transmisja promieniowania słonecznego przez osłony przezroczyste	61
3.1 Konwersja fototermiczna	61
3.2 Bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego na budynek	63
3.3 Zjawiska optyczne występujące przy przejściu promieniowania słonecznego przez przezroczystą przegrody obudowy budynku	65
3.4 Absorpcja promieniowania słonecznego w pomieszczeniu	77
4. Równania bilansu energetycznego pomieszczenia uwzględniające promieniowanie słoneczne	79
4.1 Ogólne sformułowanie bilansu energetycznego budynku	79
4.2 Zagadnienie wymiany ciepła przez nieprzezroczyste elementy obudowy budynku	82

4.2.1	Ogólne sformułowanie zagadnienia nieustalonego przewodzenie ciepła w przegrodzie	82
4.2.2	Szczegółowe sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia procesu wymiany ciepła w nieprzezroczystej przegrodzie	85
4.3	Zagadnienie transportu energii przez okno	92
4.3.1	Rozważania ogólne	92
4.3.2	Przepływ energii przez szyby	95
4.3.3	Ogólne sformułowanie zagadnienia przepływu energii przez obrzeże szyby	100
4.3.4	Rozwiązanie zagadnienia przepływu energii przez przeszklenie przy zastosowaniu symulacji komputerowej	105
4.3.5	Przepływ ciepła przez ramę	120
4.3.6	Rozwiązanie zagadnienia przepływu ciepła przez ramę przy zastosowaniu metody bilansów elementarnych	124
4.4	Określenie współczynników wymiany ciepła i sformułowanie opisu wewnętrznych źródeł ciepła	142
4.4.1	Zakres rozważań	142
4.4.2	Współczynniki wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym	142
4.4.3	Wyznaczanie temperatury otoczenia zewnętrznego	144
4.4.4	Wewnętrzne źródło ciepła jako efekt oddziaływania promieniowania słonecznego	146
4.4.5	Współczynniki wymiany ciepła w szczelinie powietrznej między szybami okna	148
4.4.6	Współczynniki wymiany ciepła z otoczeniem wewnętrznym	151
4.5	Szczegółowy bilans cieplny dla reprezentatywnego pomieszczenia	154
5	Wpływ energii promieniowania słonecznego na bilans cieplny pomieszczeń	155
5.1	Zastosowanie opracowanego modelu matematycznego do obliczeń symulacyjnych	155
5.2	Dostępność promieniowania słonecznego padającego na zewnętrzną obudowę budynku	157
5.3	Przepływ energii przez okno	163
5.4	Zapotrzebowanie na ciepło i chłód	183
5.5	Wnioski końcowe odnośnie bilansu cieplnego budynku	205
6	Podsumowanie	210
6.1	Wnioski końcowe	210
6.2	Kierunki dalszych badań	212
	Dodatek 1	214
	Dodatek 2	235
	Dodatek 3	238
	Dodatek 4	240
	Summary	246
	Bibliografia	248

Ważniejsze Symbole

A	pole powierzchni	m^2
a	dyfuzyjność termiczna	m^2/s
C	stała w równaniach	
c	ciepło właściwe	$J/(kg\ K)$
d	wymiar liniowy: grubość	m
F	współczynnik bezwymiarowy korekcji (widoku)	
G	gęstość strumienia promieniowania słonecznego	W/m^2
H	dzienne napromieniowanie słoneczne półsferyczne	$Wh/m^2\ (J/m^2)$
h	współczynnik radiacyjnej lub konwekcyjnej wymiany ciepła	$W/(m^2\ K)$
I	godzinne napromieniowanie słoneczne	$Wh/m^2\ (J/m^2)$
L	wymiar charakterystyczny	m
l	długość	m
m	masa	kg
Nu	liczba Nusselta	
Pr	liczba Prandla	
Q	ciepło	J
\dot{Q}	strumień ciepła	W
\dot{q}	gęstość strumienia ciepła	W/m^2
R	opór cieplny właściwy	K/W
R	współczynnik korekcji promieniowania słonecznego	
r	współczynnik odbicia	
Ra	liczba Rayleigha	
Re	liczba Reynoldsa	
T	temperatura	$K\ (^{\circ}C)$
t	czas	s
V	objętość	m^3
	Symbole greckie:	
α	absorpcyjność	
β	kąt pochylenia względem poziomu	deg
γ	kąt azymutalny	deg
ε	emisyjność	
θ	kąt padania promieniowania	deg
λ	współczynnik przewodności cieplnej	$W/(mK)$
ρ	gęstość	kg/m^3
ρ	refleksyjność	
τ	transmisyjność	
ϕ	szerokość geograficzna	deg
ω	kąt godzinny słońca	deg
g	stała grawitacji:	9,81 m/s^2
σ	stała Stefana Boltzmanna:	$56.7\ 10^{-9}\ W/(m^2K^4)$

Wstęp

Wprowadzenie

Energetyka słoneczna jest względnie nową dziedziną nauki. Powstała ona w połowie XX wieku [33] i od tej pory szybko się rozwija. Jej zakres tematyczny może być traktowany szeroko [96]. Pojawiają się nowe zagadnienia coraz bardziej złożone i wymagające stosowania skomplikowanego modelowania matematycznego w celu ich rozwiązania. Podstawy energetyki słonecznej są dostępne zarówno w literaturze zagranicznej [3] - [4], [11], [20], [60], [67], [74] - [75], [98], [160], [163], [208], [220], [228], [232], jak i krajowej [57], [59], [73], [125], [133], [150], [173], [187], [213], [242]. W zakresie zagadnień aplikacyjnych słonecznej energetyki cieplnej można wyróżnić dwie podstawowe grupy tematyczne: rozwiązań instalacyjnych systemów słonecznych [111], [141] - [142], [209], [235] i słonecznych systemów pasywnych [3], [19], [65], [84], [112], [220] - [221]. W literaturze krajowej dominują zagadnienia instalacyjne [44], [46] - [50], [95], [114], [165], [168], [173], [188], [248] - [249]. Problematyka biernego wykorzystania energii promieniowania słonecznego w budynkach jako główny temat publikacji występuje rzadko [132], [139], [144], [151]. W większości przypadków problematyka ta pojawia się jako zagadnienie dodatkowe w publikacjach z zakresu budownictwa energooszczędnego [38], [51], [54], [99], [121] - [122], [133], [145], [158] - [159], [172], [194], [207]. W publikacjach tych można znaleźć rozważania odnośnie wpływu energii promieniowania słonecznego na budynek przede wszystkim w czasie sezonu grzewczego. Nie ma jednakże kompleksowego podejścia do zagadnień oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek w skali całego roku, ze szczegółowym podejściem do problematyki nieustalonych procesów transportu energii w budynku i jego otoczeniu. Zwykle rozważania są uproszczone lub dotyczą tylko wybranych elementów obudowy budynku. W związku z tym nie ma zaleceń odnośnie kształtowania obudowy budynku pod kątem oddziaływania energii promieniowania słonecznego w skali roku. Nie prowadzone są bowiem szczegółowe analizy napromieniowania i pozyskiwania energii promieniowania słonecznego przez obudowę budynku wykorzystujące rzeczywiste uśrednione wieloletnie dane promieniowania słonecznego, co wynika nie tylko z braku dostępu do takich danych, ale i z niedoceniań roli energii promieniowania słonecznego, jaką ona pełni w kształtowaniu bilansu energetycznego budynku.

Samą strukturą, bryłą, konstrukcją i usytuowaniem budynku można zmniejszyć w dużym stopniu zapotrzebowanie na energię do ogrzewania pomieszczeń w czasie sezonu grzewczego, a jednocześnie stworzyć odpowiednie warunki mikroklimatyczne w lecie. Każdy budynek w mniejszym lub większym stopniu, w sposób zaplanowany lub nie, podlega oddziaływaniu energii promieniowania słonecznego. Oddziaływanie to jest ciągle niedoceniane, zwłaszcza w krajach położonych na wyższych szerokościach geograficznych, do których należy Polska. Co więcej rola energii promieniowania słonecznego w kształtowaniu bilansu energetycznego budynków nie jest powszechnie znana. Jeśli nawet energia

promieniowania słonecznego jest uwzględniana przy tworzeniu koncepcji architektonicznej budynku i jego projektowaniu, to odbywa się to w sposób bardzo uproszczony, który nie odzwierciedla istoty i charakteru oddziaływania energii promieniowania słonecznego.

Problemy dużej energochłonności budownictwa, odpowiedzialnego za 40% zużycia energii finalnej w krajach Unii Europejskiej, doprowadziły do powstania Dyrektywy 2002/91/EC w sprawie charakterystyki energetycznej budynków [76]. Głównym celem wprowadzenia Dyrektywy jest zapewnienie efektywności energetycznej w budownictwie, a w konsekwencji ograniczenie zanieczyszczenia środowiska. Aby cel ten mógł być osiągnięty przewidziano m.in. stworzenie ogólnych ram wspólnej metodologii do obliczania tzw. zintegrowanej charakterystyki energetycznej budynków, oraz ustalenie i wprowadzenie schematów certyfikacji nowych budynków i budynków istniejących. W przypadku budynków niemieszkalnych będzie wymagane publiczne przedstawianie „świadectw charakterystyki energetycznej budynków” wraz z podaniem podstawowych parametrów wpływających na mikroklimat danego obiektu. Metodologia wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków może być zróżnicowana regionalnie. Natomiast sama charakterystyka energetyczna budynków ma być ujednoczona i określana na podstawie:

- zastosowanych rozwiązań materiałowych, w tym przede wszystkim izolacji;
- zastosowanych instalacji grzewczych, klimatyzacyjnych i wentylacyjnych, instalacji oświetleniowych;
- projektu budynku, jego usytuowania i orientacji, które powinny być powiązane z lokalnymi warunkami klimatycznymi takimi jak ekspozycja na słońce, możliwość pasywnego wykorzystania energii słonecznej oraz stosowanie zacienienia;
- wykorzystania aktywnych systemów słonecznych i innych systemów grzewczych oraz elektrycznych wykorzystujących odnawialne źródłach energii;
- możliwości produkcji energii na miejscu;
- warunków klimatu wewnętrznego.

Dyrektywa Unijna w sposób bezpośredni promuje rozwiązania związane z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego. Podkreśla znaczenie koncepcji i projektu architektonicznego – budowlanego, rolę usytuowania i orientacji budynku oraz jego otoczenia w pozyskiwaniu energii promieniowania słonecznego lub ograniczaniu jej dostępu.

Przedmiot, cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy jest zagadnienie pozyskiwania i naturalnej konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku w czasie roku. Promieniowanie słoneczne zanim dotrze do powierzchni Ziemi ulega różnego rodzaju oddziaływaniom i zostaje osłabione. Osłabione przejściem przez atmosferę ziemską

docierając do obudowy budynku może bezpośrednio przenikać do wnętrza przez przezroczyste elementy obudowy lub oddziaływać pośrednio na wnętrze wskutek pochłaniania w obudowie budynku, którą stanowią przegrody nieprzezroczyste i przezroczyste – okna. W obudowie i wnętrzu budynku zachodzą procesy konwersji fototermicznej, które wpływają na stan termiczny budynku i warunki komfortu cieplnego w pomieszczeniach.

Podstawowym celem pracy jest sformułowanie opisu matematycznego i przeanalizowanie zagadnienia zmiennego w czasie pozyskiwania i naturalnej konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku. Aby cel ten był osiągnięty należy opracować i rozwiązać zagadnienia zmiennej w czasie dostępności energii promieniowania słonecznego do różnie usytuowanych elementów obudowy budynku i dynamiki procesów zachodzących w obudowie budynku w wyniku zmieniających się w czasie warunków otoczenia. Podstawą opisu zachodzących zjawisk są równania matematyczne praw zachowania i transportu energii, wraz z warunkami brzegowymi i początkowymi. Sformułowane i opisane matematycznie zagadnienia rozwiązano przy wykorzystaniu symulacji numerycznej. W tym celu opracowano algorytmy kilku programów numerycznych, które symulują zjawiska zachodzące w poszczególnych elementach modelowego pomieszczenia budynku i ich otoczeniu. Modułowość programów stanowiąca o integralności opisu poszczególnych elementów budynku i otoczenia umożliwia analizowanie poszczególnych zagadnień oddzielnie, niezależne wprowadzenie zmian w poszczególnych programach i otrzymywanie wielowariantowych kompleksowych rozwiązań.

W celu rozwiązania zagadnienia napromieniowywania obudowy budynku promieniowaniem słonecznym sformułowano model dostępności promieniowania słonecznego dla różnie usytuowanych powierzchni, opisanych kątem azymutalnym i kątem pochylenia, w odniesieniu do uśrednionych reprezentatywnych dni poszczególnych miesięcy roku. Wykorzystano dwa modele opisu promieniowania rozproszonego: izotropowy i anizotropowy. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników napromieniowania półsferycznego i jego składowych obliczonych przy wykorzystaniu dwóch wspomnianych modeli. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń sformułowano wnioski, co do wyboru modelu opisu promieniowania w zależności od przedmiotu rozważań, a także wnioski odnośnie kształtowania obudowy budynku pod kątem dostępności promieniowania słonecznego.

W celu rozwiązania zagadnienia dynamiki procesów zachodzących w obudowie budynku w wyniku zmieniających się w czasie warunków otoczenia, ze szczególnym uwzględnieniem napromieniowywania ich promieniowaniem słonecznym sformułowano model matematyczny zjawisk zachodzących w przegrodach przezroczystych i nieprzezroczystych. W przypadku przegród przezroczystych - okien rozważono przepływ energii przez przeszklenie, obrzeże przeszklenia i ramę, uwzględniając wzajemne oddziaływanie poszczególnych elementów. Okno jest skomplikowane materiałowo i przestrzennie. Sformułowany

model matematyczny procesów transportu energii, warunki brzegowe i początkowe, są złożone. Opracowano model bilansu energetycznego modelowego pomieszczenia budynku, uwzględniając zmienność w czasie jego podstawowych składowych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń sformułowano wnioski odnośnie roli energii promieniowania słonecznego w kształtowaniu bilansu energetycznego pomieszczeń, a w konsekwencji wpływu na komfort cieplny.

W rozdziale 1 opisano metodykę szacowania napromieniowania słonecznego dowolnie usytuowanych powierzchni. Przedstawiono podstawowe parametry i wielkości geometrii sferycznej Słońca oraz zależności pomiędzy padającym promieniowaniem słonecznym a dowolnie usytuowaną powierzchnią na Ziemi. Opisano istniejące modele matematyczne służące do wyznaczania energii promieniowania słonecznego docierającego do dowolnie usytuowanych powierzchni, model izotropowy i anizotropowy promieniowania słonecznego. Rozważono wpływ otoczenia budynku na dostępność promieniowania słonecznego, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska zaciniania.

W rozdziale 2 przedstawiono model reprezentatywnego (uśrednionego) promieniowania słonecznego oparty na rzeczywistych danych pomiarowych dla Warszawy, przygotowany w IMiGW [57], który stał się podstawą do przeprowadzonych w rozprawie obliczeń napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni. Zaproponowano metodykę analizy danych napromieniowania słonecznego pod kątem ich wykorzystania do wyznaczania dostępności promieniowania słonecznego. Przeprowadzono obliczenia napromieniowania dla pełnej zmienności kąta pochylenia β i kąta azymutalnego γ dla modelu izotropowego i anizotropowego promieniowania. W Dodatku 1 zamieszczono interpretację graficzną wybranych wyników napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni. Przeprowadzono analizę porównawczą danych napromieniowania otrzymanych z obu modeli promieniowania. Sformułowano zalecenia odnośnie zakresu i celu stosowalności obu modeli promieniowania, oraz zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku w odniesieniu do warunków dostępności promieniowania słonecznego.

W rozdziale 3 opisano zagadnienie transmisji promieniowania słonecznego przez osłony przezroczyste jako jedno z podstawowych zagadnień konwersji fototermicznej energii promieniowania słonecznego. Skoncentrowano się na bezpośrednim oddziaływaniu promieniowania słonecznego na budynek, w szczególności na zjawiskach optycznych występujących przy przejściu promieniowania słonecznego przez przezroczystą przegrodę obudowy budynku.

W rozdziale 4 sformułowano bilans energetyczny dowolnego modelowego pomieszczenia budynku. Opracowano model matematyczny procesów zachodzących w danym pomieszczeniu budynku, jego obudowie i otoczeniu. Transport energii przez przegrody zewnętrzne obudowy budynku rozważono oddzielnie dla przegród przezroczystych i nieprzezroczystych z uwzględnieniem oddziaływania energii promieniowania słonecznego. Szczególną uwagę zwrócono na przepływ energii

przez okno, jako ten element obudowy, który w największym stopniu ulega oddziaływaniu energii promieniowania słonecznego. Nieustalony przepływ ciepła przez przegrody nieprzezroczyste zamodelowano w układzie jednowymiarowym. W przypadku okna zastosowano uproszczony model jednowymiarowy dla części centralnej przeszklenia, quasi trójwymiarowy dla obrzeża przeszklenia i ramy. Sformułowano warunki początkowe i brzegowe. Zagadnienie rozwiązano przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych. Określono poszczególne strumienie energii dopływające lub odpływające z wnętrza pomieszczenia w danym czasie, będące elementami bilansu energetycznego budynku. Uwzględniono zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych przy założeniu istnienia rekuperacji ciepła. Wyznaczono zapotrzebowanie na ciepło/chłód dostarczane przez urządzenia grzewczo/klimatyzacyjne, które pokrywa straty/zyski związane z transportem energii przez nieprzezroczyste i przezroczyste przegrody budowlane, w tym zyski wynikające z bezpośredniego oddziaływania promieniowania słonecznego (jeśli występują), a także zapotrzebowanie na ciepło/chłód do celów wentylacyjnych, w taki sposób aby utrzymać stałą w czasie i przestrzeni temperaturę wewnętrzną w rozważanym pomieszczeniu. Zastosowano symulację komputerową zjawisk zachodzących w budynku i jego otoczeniu dla wybranych przykładów pomieszczeń budynku w celu udokumentowania konieczności uwzględniania promieniowania słonecznego przy formułowaniu bilansu energetycznego budynku, przy tworzeniu jego koncepcji i projektowaniu. Do symulacji komputerowej wykorzystano oprogramowanie MATLAB. Wyniki przedstawiono w sposób graficzny w rozdziale 5 i częściowo w Dodatku 4.

W rozdziale 5 na podstawie sformułowanego modelu matematycznego zjawisk zachodzących w obudowie budynku i jego otoczeniu, i przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych opisano energetyczne zachowanie się wybranych do rozważań pomieszczeń i elementów obudowy budynku, w zmieniających się warunkach otoczenia zewnętrznego. Opracowano wnioski odnośnie wpływu energii promieniowania słonecznego na bilans cieplny pomieszczeń w odniesieniu do warunków Polski centralnej, które w sposób ogólny odnoszą się także do całego kraju.

Rozdział 6 dotyczy podsumowania wyników osiągniętych w pracy i propozycji kierunków dalszych badań w przedmiocie pracy, i w innych pokrewnych działach.

W poszczególnych rozdziałach wyszczególniono literaturę z zakresu stanu i kierunków badań problematyki rozważanej w tych rozdziałach, dokonano przeglądu publikacji najbardziej istotnych dla rozważanych zagadnień.

Nazewnictwo z zakresu energetyki słonecznej jest zgodne normą PN-EN ISO 9488 „Energia słoneczna. Terminologia” [190].

1. Struktura promieniowania słonecznego i metody szacowania napromieniowania powierzchni dowolnie usytuowanej

1.1 Zależności geometrii sferycznej pomiędzy padającym promieniowaniem słonecznym a dowolnie usytuowaną powierzchnią

Promieniowanie słoneczne jest to emisja lub przenoszenie energii w postaci fal elektromagnetycznych, natomiast energia promieniowania słonecznego jest to ilość energii przenoszona przez to promieniowanie. Promieniowanie słoneczne padające na zewnętrzną warstwę atmosfery ziemskiej jest promieniowaniem bezpośrednim. Na powierzchnię Ziemi pada promieniowanie bezpośrednie i rozproszone przez atmosferę. Promieniowanie bezpośrednie jest to promieniowanie, które dociera wzdłuż linii prostej od tarczy słonecznej do wybranego dowolnego punktu na Ziemi, będącego miejscem obserwacji. Natomiast promieniowanie rozproszone dociera z różnych kierunków. Do dowolnej pochylonej względem poziomu powierzchni dociera promieniowanie bezpośrednie, promieniowanie rozproszone przez atmosferę, jak również promieniowanie odbite od gruntu i różnych przedmiotów znajdujących się w sąsiedztwie rozważanej powierzchni. Dowolna powierzchnia na kuli ziemskiej w zależności od jej lokalizacji, usytuowania, kształtu, materiału, z którego jest wykonana i szeregu innych czynników ma różnorodne warunki do odbioru i pozyskania energii promieniowania słonecznego.

Przy analizowaniu możliwości wykorzystania energii promieniowania słonecznego interesuje nas przede wszystkim strumień energii docierającej do powierzchni wystawionej na oddziaływanie tego promieniowania, co jest związane z położeniem tej powierzchni na Ziemi i jej umiejscowienie względem Słońca. W przypadku analizy dostępności promieniowania słonecznego, położenie na kuli ziemskiej dowolnego punktu, czy zbioru punktów, którym jest rozważana powierzchnia, jest wyznaczane nie tylko poprzez współrzędne geograficzne: szerokość i długość geograficzną, ale także poprzez warunki otoczenia zewnętrznego. Położenie danej powierzchni względem Słońca jest wyznaczane przy wykorzystaniu podstawowych pojęć geometrii sferycznej związanej z ruchem Ziemi względem Słońca ([75], [98]).

Dość istotnym parametrem przy opisie ruchu i wzajemnych zależności położenia Słońca i Ziemi jest ω kąt godzinny (czasowy) Słońca. Określa się go w dowolnym punkcie na kuli ziemskiej w funkcji czasu słonecznego. Kąt godzinny ω jest kątowym odchyleniem wschodu lub zachodu Słońca od lokalnego południka w wyniku ruchu obrotowego Ziemi wokół swojej osi. Zmiana czasu o jedną godzinę odpowiada zmianie kąta godzinnego o 15^0 . Kąt godzinny jest równy zero dla godziny 12 (każda godzina odstępstwa odpowiada zmianie kąta o -15^0 przed południem, oraz o $+15^0$ po południu) i opisuje go zależność:

$$\omega = 15(t_{slon} - 12) \quad (1.1)$$

Czas słoneczny t_{slon} jest czasem słonecznym w godzinach i jest on wyznaczony przez pozorny kątowy ruch Słońca po niebie, z południem słonecznym jako punktem odniesienia o godzinie 12.00. Południe czasu słonecznego wypada w chwili, gdy pozorna droga Słońca na nieboskłonie przecina płaszczyznę lokalnego południka. Lokalny czas strefowy jest podstawową składową czasu słonecznego, ale nie odpowiada mu w sposób bezpośredni. Czas słoneczny t_{slon} w funkcji czasu strefowego t_{stref} (wyrażone w minutach) opisuje zależność:

$$t_{slon} = t_{stref} + 4(L_{st} - L_{lok}) + E \quad (1.2)$$

Czas słoneczny wyznacza się uwzględniając dwie poprawki. Jedna z nich jest stała dla danego miejsca obserwacji i jest wyrażona różnicą (w stopniach) pomiędzy miejscowym południkiem L_{lok} obserwatora i południkiem L_{st} , według którego wyznaczany jest czas strefowy (w miejscu obserwacji). Symbol E jest równaniem czasu (wartość E jest stała dla danego dnia, wyrażana jest w minutach). Równanie czasu uwzględnia ruch Ziemi wokół Słońca po orbicie eliptycznej, co wpływa na czas, w którym Słońce przecina lokalny południk miejsca obserwacji [214].

Parametrem stosowanym przy określaniu zmian sezonowych położenia Ziemi względem Słońca jest δ deklinacja słoneczna. Deklinacja słoneczna jest definiowana jako kąt zawarty pomiędzy prostą łączącą Ziemię i Słońce a płaszczyznę równika. W zależności od deklinacji zmienia się ilość strumienia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni wystawionej na działanie promieniowania. Wartość deklinacji słonecznej zmienia się w granicach:

$$-23.45^0 \text{ (22 czerwca)} \leq \delta \leq +23.45^0 \text{ (22 grudnia)}$$

Deklinacja słoneczna δ , jest to kątowe położenie Słońca w południe w stosunku do płaszczyzny równika (dodatnie dla półkuli północnej latem). Deklinacja słoneczna jest równa zero w dniach równonocy. Często jej wartość jest wyznaczana z przybliżonej formuły Coopera [62] o postaci:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1.3)$$

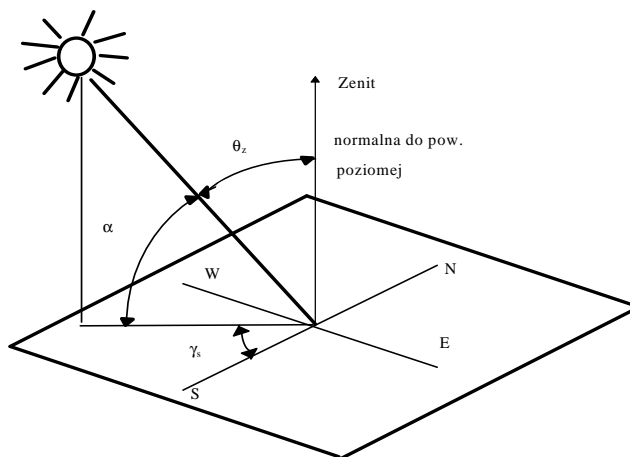
Występujący w powyższym równaniu symbol n jest numerem kolejnego dnia roku (dla pierwszego stycznia $n=1$).

Przy określaniu pozycji Słońca na niebie względem obserwatora znajdującego się na poziomej powierzchni ziemi wyznacza się następujące parametry kątowe położenia Słońca:

- kąt zenitalny - θ_s , kąt zawarty pomiędzy normalną do powierzchni poziomej Ziemi (do płaszczyzny horyzontu) a kierunkiem promieniowania bezpośredniego, czyli jest to kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą;
- kąt wzniesienia Słońca - α_s , kąt zawarty pomiędzy płaszczyznę horyzontu a linią prostą poprowadzoną w kierunku Słońca (zgodną z kierunkiem padania

promieniowania bezpośredniego), kąt ten jest dopełnieniem kąta zenitalnego (do kąta prostego).

- kąt azymutalny Słońca - γ_s , kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną przechodzącą przez Słońce i zenit obserwatora a płaszczyzną lokalnego południka, mierzony na płaszczyźnie poziomej Ziemi (kąt wyrażający odchylenie od południa rzutu poziomego kierunku rozchodzenia się promieniowania bezpośredniego) odchylenie w stronę wschodnią (od południa) jest ujemne, w stronę zachodnią jest dodatnie (na półkuli północnej).



α	kąt wzniesienia Słońca
θ_z	kąt zenitalny
γ_s	kąt azymutalny Słońca

Rys. 1.1. Podstawowe parametry opisujące położenie Słońca względem obserwatora

Powyższe podstawowe parametry kątowe opisujące położenie Słońca na niebie względem obserwatora (poziomej płaszczyzny) na powierzchni Ziemi są przedstawione na rys. 1.1.

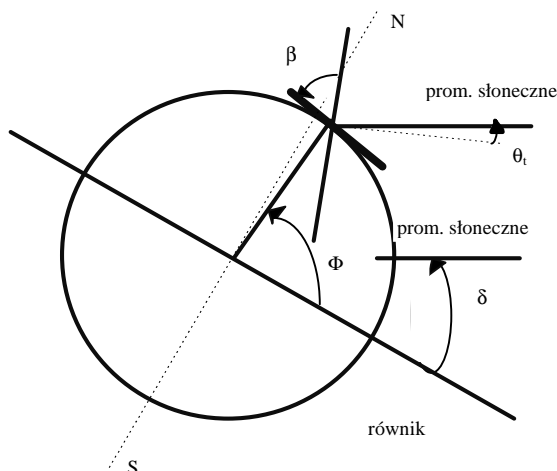
Położenie obserwatora na rozważanej powierzchni na Ziemi, opisują współrzędne geograficzne, przy czym przy określaniu dostępności promieniowania słonecznego istotna jest szerokość geograficzna - ϕ , czyli położenie kątowe danej lokalizacji względem równika (na północy dodatnie), zobrazowane na rys. 1.2.

Z reguły powierzchnie obudowy budynku, będące przedmiotem rozważań są różnie usytuowane (nachylone i zorientowane) względem poziomu. Położenie danej powierzchni na ziemi względem Słońca opisują następujące parametry:

- kąt pochylenia powierzchni względem poziomu - β , kąt zawarty pomiędzy daną powierzchnią a płaszczyzną poziomą ziemi, $0 \leq \beta \leq 180^\circ$;
- kąt azymutalny powierzchni - γ , kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną normalną do rozważanej powierzchni, na którą pada promieniowanie słoneczne, a

płaszczyzną miejscowego południka, $-180^0 \leq \gamma \leq 180^0$ (na wschód znak ujemny, na zachód znak dodatni) na południe $\gamma = 0$;

- kąt padania promieniowania na powierzchnię - θ , kąt zawarty pomiędzy kierunkiem padania promieniowania bezpośredniego na daną powierzchnię a normalną do tej powierzchni.



δ deklinacja słoneczna

β kąt pochylenia rozważanej powierzchni względem powierzchni Ziemi

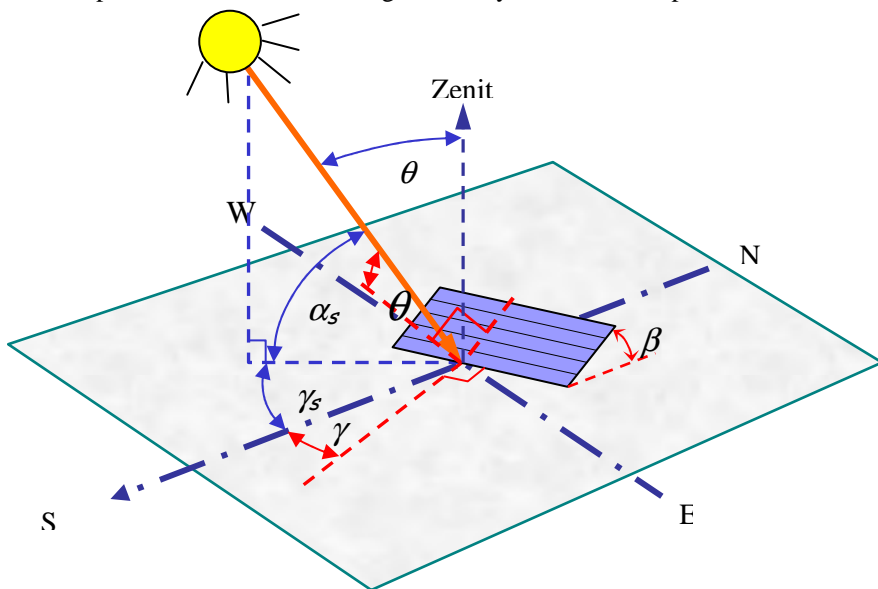
Φ szerokość geograficzna dowolnej powierzchni na kuli ziemskiej

θ kąt padania promieniowania na dowolnie usytuowaną powierzchnię względem płaszczyzny poziomej ziemi

Rys. 1.2. Przekrój przez kulę ziemską

Rysunek 1.2 przedstawia Ziemię widzianą z pewnego punktu w przestrzeni kosmicznej z zaznaczeniem pewnych charakterystycznych parametrów i miejsc na kuli ziemskiej. Natomiast rys. 1.3 obrazuje zależności geometryczne, pomiędzy padającym promieniowaniem słonecznym, a dowolnie usytuowaną powierzchnią odbierającą promieniowanie słoneczne, opisane powyżej.

Rysunek 1.3 przedstawia powierzchnię nachyloną pod kątem β do poziomej powierzchni Ziemi, zwróconą w stronę równika i odchylną od kierunku południowego o kąt azymutalny γ ; która pochłania padające na nią promieniowanie słoneczne. Na rysunku zaznaczono normalną do powierzchni poziomej Ziemi i normalną do powierzchni pochyłej pochłaniającej promieniowanie słoneczne, kąt padania promieniowania słonecznego bezpośredniego θ na powierzchnię pochyłą do poziomu oraz kąt zenitalny bezpośredniego promieniowania słonecznego θ_z .



Rys. 1.3. Podstawowe zależności pomiędzy położeniem Słońca i powierzchnią nachyloną do poziomu, na którą pada promieniowanie słoneczne

Kąt padania promieniowania słonecznego bezpośredniego θ na dowolną powierzchnię pochyloną do poziomu i dowolnie zorientowaną jest wyrażany w funkcji podstawowych parametrów kątowych położenia Słońca względem rozpatrywanej powierzchni i wg Benforda i Backa [22] przyjmuje postać:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)[\sin(\phi) \cos(\beta) - \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma)] + \cos(\delta) \left[\cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \right] \quad (1.4)$$

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \sin(\beta) \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (1.5)$$

W pewnych określonych warunkach postać równania (1.4) upraszcza się, co zostało przeanalizowane poniżej. Jeżeli powierzchnia pochłaniająca jest skierowana na południe lub na północ, to kąt azymutalny powierzchni γ wynosi 0° lub 180° . Oznacza to, że w równaniu (1.4) ostatni człon nie występuje. Dla powierzchni zwróconej w stronę południową kąt azymutalny $\gamma = 0^\circ$ i rozważane równanie przyjmuje postać:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)[\sin(\phi) \cos(\beta) - \cos(\phi) \sin(\beta)] + \cos(\delta)[\cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\omega)] = \sin(\delta)[\sin(\phi - \beta)] + \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\phi - \beta) \quad (1.6)$$

Dla powierzchni zwróconej w stronę północną kąt $\gamma = 180^\circ$ i rozważane równanie ma postać:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \sin(\delta)[\sin(\phi)\cos(\beta) + \cos(\phi)\sin(\beta)] + \\ &+ \cos(\delta)[\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega) - \sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\omega)] = \\ &= \sin(\delta)[\sin(\phi + \beta)] + \cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\phi + \beta) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Jeżeli powierzchnia pochłaniająca jest pionowa (ściany budynków), to kąt β wynosi 90° i równanie (1.4) przybiera postać:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \\ &= \sin(\delta)\cos(\phi)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\sin(\phi)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(\gamma)\sin(\omega) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Jeżeli dodatkowo powierzchnia ta jest zwrócona dokładnie w jednym z czterech podstawowych kierunków stron świata to równanie (1.4) otrzymuje postać:

– w przypadku powierzchni pionowej skierowanej na południe ($\beta=90^\circ$, $\gamma=0^\circ$)

$$\cos(\theta) = -\sin(\delta)\cos(\phi) + \cos(\delta)\sin(\phi)\cos(\omega) \quad (1.9)$$

– w przypadku powierzchni pionowej skierowanej na północ ($\beta=90^\circ$ i $\gamma=180^\circ$):

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\cos(\phi) - \cos(\delta)\sin(\phi)\cos(\omega) \quad (1.10)$$

– w przypadku powierzchni pionowej skierowanej na wschód ($\beta=90^\circ$ i $\gamma=-90^\circ$):

$$\cos(\theta) = -\cos(\delta)\sin(\omega) \quad (1.11)$$

– w przypadku powierzchni pionowej skierowanej na zachód ($\beta=90^\circ$ i $\gamma=+90^\circ$)

$$\cos(\theta) = \cos(\delta)\sin(\omega) \quad (1.12)$$

Szczególnym przypadkiem jest przykład płaszczyzny poziomej, $\beta=0$, bowiem wtedy kąt padania promieniowania bezpośredniego θ jest kątem zenitalnym θ_z . W ciągu dnia, gdy Słońce jest nad horyzontem kąt ten musi zawierać się w granicach od 0° do 90° . Równanie (1.4) przyjmuje teraz postać:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (1.13)$$

Kąt godzinny ω_{wsch} wschodu Słońca na powierzchnię poziomą można obliczyć korzystając z równania (1.13). W momencie wschodu (i zachodu) Słońca zenitalny kąt θ_z padania promieniowania (bezpośredniego) jest kątem prostym, w związku z tym wyrażenie po lewej stronie jest równe zero i rozwiązane równanie można przekształcić do takiej postaci, aby wyznaczyć żądany kąt godzinny wschodu lub zachodu Słońca. Kąt ten po przekształceniach będzie spełniał zależność:

$$\cos \omega_{wsch} = -tg(\phi)tg(\delta) \quad (1.14)$$

Kąt azymutalny Słońca może mieć wartości w zakresie: $-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$. Dla szerokości geograficznych pomiędzy zwrotnikiem Raka i kołem podbiegunowym (od 23.45° a 66.45° szerokości geograficznej północnej) dla czasu trwania dnia

słonecznego (od wschodu do zachodu Słońca) mniejszego od 12 godzin, kąt azymutalny Słońca γ_s zawiera się w granicach $-90^0 \leq \gamma_s \leq +90^0$. Jeśli dzień słoneczny trwa dłużej niż 12 godzin oznacza to, że Słońce wschodzi i zachodzi na północ od linii wschód – zachód (dla szerokości geograficznej północnej), co w konsekwencji prowadzi do:

$$\begin{aligned} \gamma_s \leq -90^0 & \text{ wcześnie rano} \\ \gamma_s \geq +90^0 & \text{ późno po południu} \end{aligned}$$

Przy wyznaczaniu kąta azymutalnego Słońca γ_s , należy stwierdzić, w której ćwiartce nieboskłonu znajduje się Słońce i można skorzystać z formuły Brauna i Mitchela [35], która opisuje azymut Słońca w funkcji γ_s' tzw. pseudo azymutu Słońca (dla pierwszego i czwartego kwadrantu), zgodnie z którą:

$$\gamma_s = C_1 C_2 \gamma_s' + C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) 180 \quad (1.15)$$

$$\text{przy czym} \quad \sin \gamma_s' = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (1.16)$$

lub:

$$\text{tg} \gamma_s' = \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cos \omega - \cos \phi \text{tg} \delta} \quad (1.16')$$

Występujące w równaniu (1.14) stałe współczynniki są równe +1 lub -1 w następujących przypadkach:

$$C_1 = \begin{cases} +1 & \text{gdy } |\omega| < \omega_{wz} \\ -1 & \text{gdy } |\omega| \geq \omega_{wz} \end{cases} \quad (1.17)$$

$$C_2 = \begin{cases} +1 & \text{gdy } \phi(\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{gdy } \phi(\phi - \delta) < 0 \end{cases} \quad (1.18)$$

$$C_3 = \begin{cases} +1 & \text{gdy } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{gdy } \omega < 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

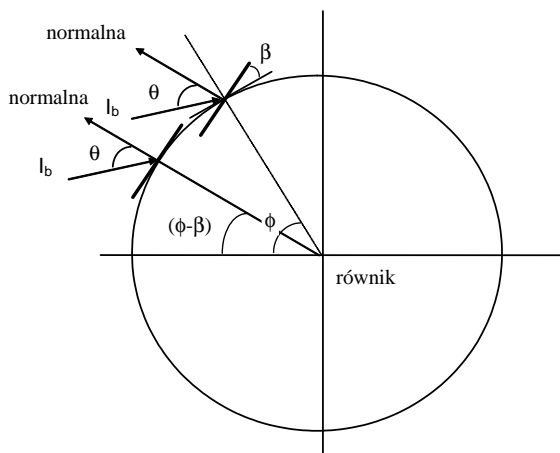
Symbol ω_{wz} oznacza kąt godzinny, dla którego Słońce przyjmuje pozycję dokładnie na wschodzie lub zachodzie, czyli $\gamma_s = -/+90^0$. Kąt godzinny ω_{wz} oblicza się z zależności:

$$\cos \omega_{wz} = \frac{\operatorname{tg}(\delta)}{\operatorname{tg}(\phi)} \quad (1.20)$$

W przypadku powierzchni pochylonej pod kątem β zorientowanej w kierunku południowym można zauważyć (rys. 1.4), że pochylenie rozważanej powierzchni pod kątem β daje takie same zależności katowe, jak w przypadku padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą znajdującą się na (fikcyjnej) szerokości geograficznej odpowiadającej $(\phi - \beta)$. Przyjęcie powyższego oznacza sprowadzenie równania (1.13) do postaci następującej:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\phi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\phi - \beta) \cos(\omega) \quad (1.21)$$

Postać ta jest wykorzystywana m.in. przy tworzeniu diagramów drogi Słońca [154], [161].



Rys. 1.4. Zależności geometryczne pomiędzy kątami: szerokości geograficznej ϕ , padania promieniowania bezpośredniego θ i pochylenia β płaszczyzny względem poziomu.

Równanie (1.21) pozwala określić kąt θ padania promieniowania słonecznego (bezpośredniego) na płaszczyznę pochyloną pod kątem β do poziomu skierowaną na południe i zlokalizowaną na szerokości geograficznej ϕ północnej. W szczególnym przypadku, dla czasu południa słonecznego, kąt padania promieniowania słonecznego na rozważaną powierzchnię, na półkuli północnej, wynosi:

$$\theta_{\text{południe}} = |\phi - \delta - \beta| \quad (1.22)$$

Jeżeli rozważana powierzchnia jest pozioma, wtedy kąt $\beta = 0$, a kąt padania promieniowania staje się kątem zenitalnym, który dla półkuli północnej odpowiada:

$$\theta_{z,\text{południe}} = |\phi - \delta| \quad (1.22')$$

W celu uzyskania jak najlepszych warunków nasłonecznienia należy dążyć do takiego usytuowania rozważanej powierzchni, aby kierunek padania (wiązki) promieniowania bezpośredniego pokrywał się z kierunkiem normalnej do tej powierzchni. Oznacza to, że kąt padania promieniowania bezpośredniego θ będzie wynosił 0. Korzystając z równania (1.22) otrzymamy dla rozważanej powierzchni zorientowanej na południe najbardziej wskazany kąt jej pochylenia β , który będzie równy różnicy kąta szerokości geograficznej ϕ i kąta deklinacji δ :

$$\beta_{\text{południe}} = \phi - \delta \quad (1.23)$$

W analizach dostępności promieniowania słonecznego istotnym parametrem jest długość dnia słonecznego T_d , czyli czas zawarty między godziną wschodu i zachodu słońca. Parametr ten oblicza się uwzględniając kąt godzinny wschodu (lub zachodu) Słońca, opisany równaniem (20). Biorąc pod uwagę, że godziny wschodu i zachodu słońca są symetryczne względem południa astronomicznego, długość dnia słonecznego T_d wynosi:

$$T_d = \frac{2}{15} \text{arc cos}[-\text{tg}(\phi)\text{tg}(\delta)] \quad (1.24)$$

Określenie zależności kątowych pomiędzy kierunkiem padania promieniowania słonecznego a usytuowaniem i lokalizacją powierzchni odbierającej to promieniowanie jest niezbędne przy wyznaczaniu wartości strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego do dowolnej powierzchni w danym czasie.

Natężenie (gęstość strumienia energii) promieniowania słonecznego (bezpośredniego) docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery zmienia się wraz ze zmianą odległości Ziemi od Słońca. Zmienność tego natężenia w ciągu roku jest opisana [64], [75] następującą zależnością:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1.25)$$

gdzie:

- G_{on} jest gęstością strumienia promieniowania mierzonego na płaszczyźnie normalnej do kierunku promieniowania w n -tym dniu roku;
- $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ jest stałą słoneczną, która jest średnią roczną gęstością strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery.

Natomiast w przypadku dowolnie usytuowanej płaszczyzny na zewnątrz atmosfery, natężenie promieniowania słonecznego jest również funkcją kąta θ padania promieniowania, czyli:

$$G_p = G_{on} \cos \theta = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta \quad (1.25')$$

W szczególnym przypadku, natężenie promieniowania na płaszczyznę równoległą do powierzchni Ziemi w danym punkcie, to znaczy na odpowiadającą danemu punktowi powierzchnię poziomą, jest funkcją kąta θ_z zenitalnego, opisanego równaniem (1.13), co dla danej chwili czasu t można zapisać jako:

$$G_o(t) = G_{sc}(t) \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n(t)}{365} \right) \cdot (\sin(\delta(t)) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta(t)) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega(t))) \quad (1.25'')$$

Dokonując całkowania powyższego równania w odpowiednim przedziale czasu można określić napromieniowanie rozważanej powierzchni w tym czasie.

Napromieniowanie najczęściej odnosi się do jednej godziny lub jednego dnia. W meteorologii stosuje się też określenia suma godzinna i suma dzienna gęstości promieniowania. Suma godzinna jest otrzymywana ze scałkowania natężenia promieniowania po przedziale czasu równym jednej godzinie. Suma dzienna jest otrzymywana ze scałkowania natężenia promieniowania po przedziale czasu wyznaczonym przez moment wschodu i zachodu Słońca. Podstawowymi danymi otrzymywanymi ze stacji meteorologicznych są godzinne sumy promieniowania całkowitego i rozproszonego.

1.2 Dane promieniowania słonecznego i model klimatu

Natężenie promieniowania słonecznego, tak jak inne parametry pogodowe, podlega pewnym regularnym deterministycznym zmianom związanym z położeniem geograficznym, ruchem Ziemi wokół Słońca i wokół własnej osi, ale jednocześnie będąc parametrem klimatycznym charakteryzują się dużą stochastycznością. Ten stochastyczny charakter zmian powoduje, że do analiz warunków napromieniowywania dowolnych powierzchni, w tym powierzchni obudowy budynku, niezbędne są dane rzeczywiste promieniowania przygotowane w sposób względnie uporządkowany poprzez zastosowanie odpowiedniej metodyki ich opisu.

Promieniowanie słoneczne docierające na poziomą powierzchnię ziemi niesie ze sobą określoną wartość energetyczną. Pomiar i badania promieniowania słonecznego prowadzone są przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Stacje aktynometryczne prowadzą pomiary promieniowania całkowitego i rozproszonego. Część stacji dysponuje seriami pomiarowymi ponad 25-letnimi, uznawanymi za reprezentatywne dla opracowań klimatologicznych, a także dla analiz z zakresu energetyki słonecznej. Stacje meteorologiczne dokonują także pomiarów usłonecznienia, czyli liczby godzin słonecznych występujących w danym okresie czasu [28], [29]. W latach 1970 - 1978 Instytut Meteorologii i Gospodarki

Wodnej publikował Roczniki Promieniowania Słonecznego. W rocznikach tych były opracowane dane promieniowania zebrane przez podstawowe stacje aktynometryczne i kilka pomocniczych. Dane te dotyczyły promieniowania całkowitego, rozproszonego, odbitego, padającego na powierzchnię prostopadłą do kierunku promieni słonecznych i bilansu promieniowania. Dane przedstawiane były w postaci stabelaryzowanej jako sumy godzinne, półdienne, dzienne, dekadowe, miesięczne i roczne dla danego roku kalendarzowego. Obecnie dane tego typu nie są ogólnie dostępne.

W literaturze, oprócz wspomnianych publikacji IMGW, ukazywały się także inne opracowania. Paszyński w Atlasie Klimatycznym [15] przedstawił średnie miesięczne i roczne składniki bilansu promieniowania z lat 1951 - 1960. Rojek [17] opublikował obliczone wartości promieniowania całkowitego z lat 1951 - 1970 w postaci sum miesięcznych, półrocznych i rocznych, na podstawie danych z 66 stacji. W tym okresie ukazywały się także inne publikacje zawierające dane promieniowania słonecznego i metody ich opracowań [196] – [197]. W ramach Programu PR-8 (Programu Rządowego – 8) w latach 80-tych, w ramach tematu prowadzonego przez Kotowskiego pt. „Optymalizacja konstrukcji słonecznych podgrzewaczy powietrza w polskich warunkach klimatycznych” opracowano w formie graficznej rozkład napromieniowania roczny i dobowy dla 14 regionów. W ramach innego tematu tego programu pt. „Struktura promieniowania słonecznego w czasie, jej zmiany w różnych miejscowościach” prowadzonego przez Jaskólskiego [119] opracowano uśrednione sumy godzinne promieniowania słonecznego całkowitego i rozproszonego dla uśrednionych dni kolejnych miesięcy roku na podstawie danych 20 letnich, za okres 1960 - 1979. Od czasu zakończenia programów rządowych (PR-8) nie publikowano szczegółowych danych sum godzinnych promieniowania słonecznego i jego składowych. Pewne uśrednione dane dotyczące promieniowania znajdują się w normie PN-B-02025 [189]. Są to dane promieniowania całkowitego z 17 stacji aktynometrycznych uśrednione za okres 10 lat, podane w postaci sum miesięcznych.

Promieniowanie słoneczne, jego pomiary i modele klimatu są przedmiotem szeregu publikacji [11], [13], [36], [43], [45], [58], [64], [75], [89], [95], [98], [134] - [138], [148] - [149], [153] - [155], [164], [178], [182] - [184], [193], [201] - [202], [204], [236]. W związku z różną dostępnością danych klimatycznych, w zależności od ich liczby, dokładności i formy, opracowywane są różne modele klimatu. Wiele stosowanych modeli klimatu stosuje model tzw. typowego roku, miesiąca, czy dnia bez uwzględniania anomalii pogodowych. Modele te wykorzystują różne metody uśredniania danych pogodowych. Czasami stosuje się model średniego dnia danego miesiąca, który otrzymuje się z uśrednienia danych wieloletnich. Im dłuższy okres uśrednienia tym dany model jest bardziej dokładny i uniwersalny. Przy czym dla potrzeb analizy warunków napromieniowania powierzchni zaprojektowanych do odbioru energii promieniowania słonecznego obliczenia wykorzystujące jedynie średnie dzienne są niewystarczające, a przez to niemiernodajne. Należy korzystać z

uśrednionych danych godzinnych dla danego dnia, może to być typowy (uśredniony) dzień miesiąca.

Klein do analizy warunków nasłonecznienia zaproponował wykorzystywanie tzw. średniego dnia miesiąca. Jako najbardziej reprezentatywne dla poszczególnych miesięcy w dowolnym roku kalendarzowym wybrał on następujące dni: 17.01; 16.02; 16.03; 15.04; 15.05; 11.06; 17.07; 16.08; 15.09; 15.10; 14.11; 10.12. Przy wyborze tych dni kierował się przede wszystkim wartościami deklinacji słonecznej. Klein stworzył model „typowego” roku składającego się ze średnich dni miesięcy, przy czym tym średnim dniom miesięcy przypisał w odpowiedni sposób [75] uśrednione wartości promieniowania. Wielu badaczy w różnych krajach zaczerpnęło z modelu „typowej pogody” Kleina metodykę przyjmowania dni średnich miesiąca (wg dni o średniej deklinacji).

Tworzeniem modeli typowej (standardowej) pogody wykorzystywanych min. do obliczeń symulacyjnych procesów zachodzących w różnych odbiornikach i systemach słonecznych zajmowali się też inni uczeni, Anderson [4], Lund [155], Miguel i Bilbao [164]. Stochastyczny model pogody dla celów energetyki słonecznej stworzył Sfeir [210]. Prowadzono również badania przy wykorzystaniu metod statystyki matematycznej do opracowywania modelu klimatu przy bardzo dużej liczbie zmiennych meteorologicznych. Model typowej pogody dla warunków krajowych zaproponował Pomierny [193]. Kossecka i Bzowska przeprowadziły analizę probabilistyczną danych pogodowych [39] - [40]. Zajmowały się stworzeniem stochastycznego modelu klimatu Polski, podobnie jak Panek, Turlejski [178], a w ostatnim okresie Kossecka, Gawin i Więckowska [89], [137], [236].

Opracowaniem charakterystyk aktynometrycznych, uśrednianiem rzeczywistych sum promieniowania słonecznego dla zastosowań w energetyce słonecznej zajmował się Podogrodzki i Bogdańska z zespołem [31] - [32]. Opracowane dane do tej pory są stosowane w wielu analizach z zakresu energetyki słonecznej. W ramach współpracy z Bogdańską z IMGiW został stworzony model uśrednionego reprezentatywnego roku [56], który opisano w rozdziale 2.

Należy zaznaczyć, że zmierzone rzeczywiste wartości promieniowania są najlepszym źródłem informacji odnośnie warunków nasłonecznienia. Jednakże w przypadku ich braku wykorzystuje się różnego rodzaju zależności empiryczne. Oddziaływanie atmosfery na procesy rozpraszania i absorpcji promieniowania zmienia się w czasie, w zależności od warunków atmosferycznych (naturalnych i związanych z działalnością człowieka) i zmian masy optycznej powietrza. Dążąc do prowadzenia obliczeń napromieniowania w pewnych standardowych warunkach odniesienia Hottel [75] opracował model obliczeniowy dotyczący standardowych (typowych) warunków tzw. „czystego” nieba, dla promieniowania bezpośredniego w warunkach „czystej” atmosfery dla czterech typów klimatu.

W przypadku braku wartości składowych pomiarowych promieniowania docierającego do poziomej powierzchni na Ziemi można korzystać z zależności

korelacyjnych określających te wartości w sposób szacunkowy przy wykorzystaniu tzw. indeksu przejrzystości atmosfery. W tych szacunkowych metodach wyznacza się zależności pomiędzy promieniowaniem dyfuzyjnym i promieniowaniem całkowitym na płaszczyznę poziomą, a indeksem przejrzystości atmosfery [75] – [76]. Badaniami nad sformułowaniem odpowiednich korelacji dla warunków krajowych zajmowały się Kossecka i Bzowska [135]. Sformułowaly one zależność funkcyjną w postaci dwuodcinkowego równania regresji, z której można oszacować promieniowanie dyfuzyjne dla kilku miast Polski, będąc w posiadaniu jedynie danych sum miesięcznych promieniowania całkowitego.

1.3 Promieniowanie słoneczne docierające do dowolnie usytuowanych powierzchni

1.3.1 Składowe promieniowania

Pólsferyczne promieniowanie słoneczne dociera na dowolnie usytuowaną powierzchnię z całej półkuli niebosłonu, czyli z kąta bryłowego równego 2π sr. Pólsferyczne promieniowanie słoneczne odbierane przez poziomą powierzchnię nazywane jest promieniowaniem całkowitym. Promieniowanie to składa się z promieniowania bezpośredniego, tj. promieniowania docierającego z małego kąta bryłowego wychodzącego z tarczy słonecznej, i z promieniowania rozproszonego przez atmosferę ziemską. Natomiast pólsferyczne promieniowanie słoneczne docierające na powierzchnię nachyloną do poziomu składa się z promieniowania bezpośredniego, rozproszonego i dodatkowo z promieniowania odbitego od otoczenia w sąsiedztwie rozważanej powierzchni. Zgodnie z terminologią normy PN-EN ISO 9488 [190] promieniowanie dyfuzyjne jest to „promieniowanie słoneczne pólsferyczne minus promieniowanie słoneczne bezpośrednie”, czyli dla powierzchni poziomej promieniowanie dyfuzyjne jest równoważne promieniowaniu rozproszonemu, a dla powierzchni pochylonej względem poziomu promieniowaniu rozproszonemu i odbitemu.

Kierunek padania promieniowania bezpośredniego na powierzchnię pochyloną jest zgodny z kierunkiem wiązki tego promieniowania. Określanie kierunku padania promieniowania rozproszonego jest złożone. Promieniowanie rozproszone składa się z trzech składowych [75]:

- promieniowania rozproszonego izotropowego, docierającego równomiernie ze wszystkich stron niebosłonu (pólsfery);
- promieniowania rozproszonego okołosłonecznego, wynikającego z rozpraszania promieniowania słonecznego w atmosferze tuż wokół kierunku padania promieniowania bezpośredniego; przyjmuje się że jest ono skupione w fikcyjnej przestrzeni stożka (z wierzchołkiem w centrum Ziemi), którego wysokość odpowiada kierunkowi rozchodzenia się promieniowania bezpośredniego;
- promieniowania jaśniejącego horyzontu, koncentrującego się blisko horyzontu, występującego szczególnie wyraźnie przy czystym niebie.

Napromieniowanie jest to energia promieniowania padającego na powierzchnię jednostkową, otrzymana poprzez scałkowanie natężenia promieniowania w określonym przedziale czasu, np. w jednej godzinie lub dniu.

Zapis matematyczny napromieniowania godzinnego I_c z uwzględnieniem poszczególnych składowych promieniowania słonecznego docierającego do dowolnie pochylonej i zorientowanej powierzchni ma ogólną postać [75]:

$$I_c = I_{p,b} + I_{p,d,izo} + I_{p,d,oks} + I_{p,d,hz} + I_{p,o} \quad (1.26)$$

Poszczególne symbole odnoszą się do powierzchni pochylonej (dolny indeks p) i oznaczają:

$I_{p,b}$	napromieniowanie godzinne bezpośrednie
$I_{p,d,izo}$	napromieniowanie godzinne rozproszone izotropowe
$I_{p,d,oks}$	napromieniowanie godzinne rozproszone okołosłoneczne
$I_{p,d,hz}$	napromieniowanie godzinne rozproszone jaśniejącego horyzontu
$I_{p,o}$	napromieniowanie godzinne odbite

Natomiast w odniesieniu do jednego dnia napromieniowanie (napromieniowanie dzienne oznaczane jest jako H) rozważanej dowolnej powierzchni opisuje zależność:

$$H = \int_{wsch}^{zach} (I_{p,b}(t) + I_{p,d,izo}(t) + I_{p,d,oks}(t) + I_{p,d,hz}(t) + I_{p,o}(t)) dt \quad (1.27)$$

Istnieje szereg różnego rodzaju modeli matematycznych, o różnym stopniu skomplikowania, pozwalających wyznaczyć napromieniowanie na pochyloną powierzchnię. Różnice pomiędzy tymi modelami dotyczą przede wszystkim założeń, co do istoty promieniowania rozproszonego.

1.3.2 Model izotropowy promieniowania

W najstarszych modelach promieniowania słonecznego padającego na dowolnie usytuowane powierzchnie [109], [115] zakładano, że dominującym promieniowaniem w promieniowaniu całkowitym półsferycznym jest promieniowanie bezpośrednie, a promieniowanie dyfuzyjne koncentruje się w obszarze kierunku padania promieniowania bezpośredniego. W obliczeniach nie rozróżniano poszczególnych składowych promieniowania i przy określaniu promieniowania półsferycznego uwzględniano promieniowanie całkowite na powierzchnię poziomą korygowane współczynnikiem odnoszącym się jedynie do promieniowania bezpośredniego.

W 1942 roku Hottel i Woertz [110] sformułowali model promieniowania półsferycznego docierającego do powierzchni pochylonej zakładając, że promieniowanie rozproszone ma charakter izotropowy. Nie uwzględniali oni jednakże żadnego współczynnika korekcji dla tego promieniowania. Dla dowolnie pochylonej powierzchni rozpatrywali jedynie promieniowanie rozproszone

docierające na powierzchnię poziomą. Korekcję promieniowania stosowali jedynie dla promieniowania bezpośredniego.

Pierwszą metodę obliczania promieniowania pólśferycznego na powierzchnię nachyloną, uwzględniającą korekcję dla wszystkich składowych promieniowania, opracowali w 1963 roku Liu i Jordan [153]. Przyjęli oni model izotropowy dla promieniowania rozproszonego. Nie uwzględniali promieniowania rozproszonego horyzontu i okołosłonecznego. Zgodnie z teorią Liu - Jordana godzinne napromieniowanie słoneczne I_c docierające na powierzchnię pochyloną pod kątem β do poziomu składa się z trzech składowych promieniowania: bezpośredniego, rozproszonego i odbitego od otoczenia i opisuje je równanie o postaci:

$$I_c(t) = I_b(t)R_b(t) + I_d(t)R_d + (I_b(t) + I_d(t))\rho_o R_o \quad (1.28)$$

gdzie poza wcześniej opisanymi symbolami nowe oznaczają:

ρ_o - refleksyjność podłoża czyli bezwymiarowy współczynnik odbicia;

R_b - współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego;

R_d - współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego;

R_o - współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego.

Współczynniki korekcyjne promieniowania rozproszonego i odbitego są jedynie funkcjami kąta β pochylenia płaszczyzny (względem poziomu), na którą pada promieniowanie słoneczne. Współczynniki wyznacza się z następujących równań:

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (1.29)$$

$$R_o = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (1.30)$$

Współczynnik korekcji promieniowania bezpośredniego R_b przedstawia zależność pomiędzy natężeniem $G_{p,b}$ promieniowania bezpośredniego padającego na powierzchnię pochyloną a natężeniem G_b promieniowania bezpośredniego padającego na płaszczyznę poziomą. Najczęściej stosowaną metodą wyznaczania współczynnika korekcji promieniowania bezpośredniego jest metoda Hottela - Woertza [110], zgodnie z którą R_b wynosi:

$$R_b(t) = \frac{G_{p,b}(t)}{G_b(t)} = \frac{\cos(\theta(t))}{\cos(\theta_z(t))} \quad (1.31)$$

gdzie:

θ kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego, mierzony pomiędzy kierunkiem promieniowania, a normalną do rozważanej powierzchni, w ogólnym przypadku wyznaczany z równania (1.4) lub (1.5), w szczególnych przypadkach z kolejnych równań (1.6) - (1.12).

θ_z kąt zenitalny, kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego, mierzony pomiędzy kierunkiem promieniowania, a normalną do powierzchni poziomej wyznaczany z równania (1.13).

Na podstawie równania (1.31) można stwierdzić, że najkorzystniejsze warunki napromieniowania istnieją, gdy kąt padania promieniowania równa się 0, czyli promieniowanie bezpośrednie dociera z kierunku normalnej do płaszczyzny danej powierzchni. Uwzględniając zależności na kąt zenitalny i kąt padania promieniowania słonecznego na pochyloną powierzchnię opisane odpowiednio równaniami (1.13) i (1.4), otrzymuje się ogólną postać na współczynnik R_b korekcji promieniowania bezpośredniego padającego na powierzchnię pochyloną pod kątem β względem poziomu i o orientacji γ , w następującej postaci:

$$R_b(t) = \frac{\sin(\delta(t))[\sin(\phi)\cos(\beta) - \cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)]}{\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))} + \frac{\cos(\delta(t))[\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega(t)) + \sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega(t)) + \sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega(t))]}{\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))} \quad (1.32)$$

Zgodnie z powyższym równaniem współczynnik korekcji promieniowania bezpośredniego jest funkcją położenia powierzchni, (na którą pada bezpośrednie promieniowanie słoneczne), która jest opisana stałymi w czasie parametrami: szerokością geograficzną ϕ , kątem pochylenia β i kątem azymutalnym γ , a także funkcją zmiennych w czasie parametrów opisujących wzajemne położenie rozważanej powierzchni i Słońca, czyli deklinacji słonecznej δ i kąta godzinowego ω , co można zapisać:

$$R_b(t) = f(\phi, \beta, \gamma, \delta(t), \omega(t))$$

W szczególnym przypadku dla powierzchni zwróconej w stronę południową (typowe zorientowanie powierzchni czołowych odbiorników energii promieniowania słonecznego w rozwiązaniach instalacyjnych i rozwiązaniach pasywnych obudowy budynku), czyli dla kąta azymutalnego powierzchni $\gamma = 0$, współczynnik R_b dla półkuli północnej będzie miał (najczęściej spotykaną w piśmiennictwie z zakresu energetyki słonecznej) postać:

$$R_b(t) = \frac{\cos(\phi - \beta)\cos(\delta(t))\cos(\omega(t)) + \sin(\phi - \beta)\sin(\delta(t))}{\cos(\phi)\cos(\delta(t))\cos(\omega(t)) + \sin(\phi)\sin(\delta(t))} \quad (1.33)$$

Dość szczególnym przypadkiem jest wyznaczanie wartości współczynnika korekcji dla promieniowania bezpośredniego, w południe dla płaszczyzny zwróconej w stronę południową. W tym przypadku równanie (1.31) opisujące współczynnik korekcji promieniowania bezpośredniego, korzystając z równania (1.21) i (1.22) (dla półkuli północnej), ma postać:

$$R_b(t) = \frac{\cos|\phi - \delta(t) - \beta|}{\cos|\phi - \delta|} \quad (1.34)$$

Oprócz powyższej metody obliczeniowej wyznaczania współczynnika korekcji dla promieniowania bezpośredniego Hottel i Woertz opracowali również metodę graficzną, w której przedstawili zależność cosinusów kątów zenitalnego i padania promieniowania słonecznego w funkcji szerokości geograficznej i parametru odpowiadającego różnicy pomiędzy szerokością geograficzną i kątem pochylenia rozpatrywanej płaszczyzny (zamieszczone np. w [75]).

1.3.3 Model anizotropowy promieniowania

Uważa się (np. [75], [98], [232]), że stosowanie modelu izotropowego promieniowania rozproszonego w przypadku czystego nieba prowadzi do niedoszacowania promieniowania półsferycznego docierającego do dowolnie pochylonej płaszczyzny, a uzyskany obraz napromieniowania nie jest pełen, bowiem w modelu izotropowym nie jest uwzględniany stopień zachmurzenia. W ostatnich latach trwały więc prace nad stworzeniem modelu anizotropowego.

W 1980 roku Hay i Davies [102] formułując swój model obliczeniowy promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni pochylonej uwzględnili okołosłoneczne promieniowanie rozproszone (przyjmując ten sam kierunek rozchodzenia się tego promieniowania jak promieniowanie bezpośrednie). W latach 90-tych Reindl (z grupą naukowców) skorzystali z modelu Haya i Daviesa, do którego dodali promieniowanie rozproszone jaśniejszego horyzontu, zgodnie z wcześniejszą teorią (1979) Kluchera [134]. W ten sposób powstał model HDKR [202]. Nazwa tego modelu pochodzi od pierwszych liter nazwisk badaczy, którzy przyczynili się do jego powstania. Zgodnie z modelem Haya i Daviesa [102] promieniowanie rozproszone składa się z izotropowego promieniowania rozproszonego i promieniowania rozproszonego okołosłonecznego, co można zapisać w postaci ogólnej w odniesieniu do godzinowego napromieniowania jako:

$$I_{p,d} = I_{p,d,izo} + I_{p,d,oks} \quad (1.35)$$

Natomiast przy zapisie bardziej szczegółowym, uwzględniającym A_i tzw. indeks anizotropowości promieniowania dyfuzyjnego, zgodnie z Hayem i Daviesem, równanie (1.35) ma postać:

$$I_{p,d} = \left\{ \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] - A_i \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + A_i R_b \right\} I_d = \left\{ (1 - A_i) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + A_i R_b \right\} I_d \quad (1.36)$$

Indeks anizotropowości A_i promieniowania rozproszonego jest funkcją transmisyjności (przezroczystości) atmosfery dla promieniowania bezpośredniego, co matematycznie zapisuje się jako:

$$A_i(t) = \frac{I_b(t)}{I_o(t)} \quad (1.37)$$

W powyższym równaniu indeks „o” odnosi się do promieniowania na zewnętrznej warstwie atmosfery. Uwzględniając rozważania przedstawione w rozdziale 1.1 oraz równanie (1.25'), napromieniowanie godzinne I_o (tzw. pozaziemskie) odpowiada:

$$I_o(t) = I_{sc}(t) \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n(t)}{365}\right) \cdot (\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))) \quad (1.38)$$

Napromieniowanie I_{sc} wyznacza się ze scałkowania natężenia promieniowania słonecznego docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery, czyli stałej słonecznej G_{sc} , po przedziale czasu równym jednej godzinie. W powyższym modelu w przypadku czystego nieba wartości indeksu A_i są wysokie. Oznacza to, że w promieniowaniu rozproszonym dominuje promieniowanie okołosłoneczne. Przy dużym zachmurzeniu, jeżeli nie ma promieniowania bezpośredniego, to A_i jest równe zero i występuje jedynie izotropowe promieniowanie rozproszone atmosfery. Napromieniowanie półsferyczne godzinne powierzchni pochylonej względem poziomu, zgodnie z powyższym jest opisywane równaniem:

$$I_c(t) = (I_b(t) + I_d(t)A_i(t))R_b(t) + I_d(t)(1 - A_i(t)) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + I_o(t)\rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.39)$$

Teoria powyższa nie uwzględnia jednak promieniowania rozproszonego jaśniejącego horyzontu. Reidl tworząc bardziej udoskonalony model promieniowania uwzględnił współczynnik korekcji promieniowania dyfuzyjnego horyzontu zaproponowany przez Tempasa i Coulsona [223] opisany równaniem:

$$R_{d,hz} = 1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad (1.40)$$

Zgodnie z przebiegiem funkcji $\sin^3 x$ dla małych i średnich pochyłeń wpływ składowej świecącego horyzontu jest niewielki. Wzór (1.40) został zmodyfikowany później przez Kluchera [134] poprzez wprowadzenie wskaźnika f uwzględniającego stopień zachmurzenia. Ostatecznie współczynnik korekcji promieniowania dyfuzyjnego jaśniejącego horyzontu ma postać:

$$R_{d,hz} = 1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right)$$

Dzięki wprowadzeniu wskaźnika f rozważane równania nie odnoszą się już tylko do przypadku czystego nieba. Współczynnik f wyznacza się w następujący sposób:

$$f(t) = \sqrt{\frac{I_b(t)}{I(t)}} \quad (1.41)$$

przy czym $I(t) = I_d(t) + I_b(t)$

Uwzględniając promieniowanie jaśniejącego horyzontu, przy różnym stopniu zachmurzenia nieba, otrzymuje się zależność na godzinne napromieniowanie półsferyczne powierzchni pochylonej, wg modelu HDKR, o końcowej postaci:

$$\begin{aligned} I_c(t) = & \quad (1.42) \\ = & (I_b(t) + I_d(t)A_i(t))R_b(t) + I_d(t)(1 - A_i(t)) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \left[1 + f(t) \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + \\ & + I(t)\rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \end{aligned}$$

Inną metodą obliczeniową uwzględniającą anizotropowość promieniowania rozproszonego jest model podany w 1988 roku przez Pereza i współpracującego z nim zespołu badaczy [182] - [184]. Zgodnie z tą metodą napromieniowanie rozproszone powierzchni pochylonej względem poziomu jest opisane równaniem:

$$I_{p,d}(t) = I_d(t) \left\{ (1 - F_{1i}(t)) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + F_1(t) \frac{a}{b} + F_2(t) \sin(\beta) \right\} \quad (1.43)$$

występujące we wzorze poszczególne symbole oznaczają

F_1 współczynnik korekcji promieniowania dyfuzyjnego okołosłonecznego

F_2 współczynnik korekcji promieniowania dyfuzyjnego świecącego horyzontu

a współczynnik, który odpowiada kątowi padania promieniowania w obszarze (stożka) promieniowania okołosłonecznego

b współczynnik, który odpowiada kątowi zenitalnemu w obszarze (stożka) promieniowania okołosłonecznego

W analizie instalacji słonecznych przyjmuje się [75], że wielkość a/b odpowiada współczynnikowi korekcji promieniowania bezpośredniego R_b . Z kolei współczynniki F_1 i F_2 są parametrami opisującymi stan nieba, wyznaczony przez trzy podstawowe parametry: kąt zenitalny, wskaźnik czystości nieba i wskaźnik jasności nieba. Stwierdzono [128], że model anizotropowy HDKR powinien być stosowany do analiz dostępności energii promieniowania słonecznego w krajach położonych na wyższych szerokościach geograficznych, o przeważającym udziale promieniowania rozproszonego w promieniowaniu półsferycznym, a więc dla Polski.

Powszechnie w analizach energetyki słonecznej stosuje się model izotropowy wg Liu - Jordana. Uważa się, że model ten daje względnie dobre wyniki bowiem niedoszacowanie promieniowania rozproszonego w analizach instalacji słonecznych działa tylko „na plus” rozwiązań instalacyjnych i wykorzystania energii słonecznej

do celów użytkowych. W literaturze nie można znaleźć wyników analizy porównawczej zastosowania obu modeli promieniowania do obliczeń napromieniowywania różnie usytuowanych powierzchni, dlatego też to zagadnienie stało się przedmiotem rozważań w niniejszej pracy. Przeprowadzone obliczenia i analiza otrzymanych wyników mają wykazać, czy stosowanie modelu izotropowego promieniowania słonecznego jest rzeczywiście wystarczające do właściwego oszacowania dostępności energii promieniowania słonecznego, szczególnie w przypadku analiz z zakresu energetyki słonecznej budynków, co zostało opisane w następnym rozdziale.

1.4 Wpływ otoczenia na dostępność promieniowania słonecznego

Analizując dostępność promieniowania słonecznego należy zwrócić uwagę na kilka czynników związanych z otoczeniem i lokalizacją powierzchni, na którą pada promieniowanie słoneczne. W otoczeniu rozważanej powierzchni mogą znajdować się różnego rodzaju naturalne i sztuczne obiekty. Mogą one powodować, że dostęp promieniowania słonecznego będzie utrudniony, lub wystąpią dodatkowe zyski. Dwoma podstawowymi czynnikami, związanymi z otoczeniem i wpływającymi na dostępność promieniowania słonecznego, są zacienienie i odbicie.

Zacienienie, opisywane z różnym stopniem szczegółowości w literaturze [2] - [3], [20], [52], [75], [112], [127], [140], [174], [198], [220] - [221], [224], [246], jest dość powszechnym zjawiskiem ograniczającym w sposób przypadkowy, lub zaplanowany, dostęp promieniowania słonecznego do powierzchni wystawionej na działanie promieniowania słonecznego. Zacienienie rozważanej powierzchni lub jej fragmentu może być:

- całkowite w odniesieniu do promieniowania bezpośredniego i częściowe dla promieniowania dyfuzyjnego, jeżeli przeszkoda utrudniająca dostęp promieniowania słonecznego jest nieprzezroczysta;
- częściowe dla promieniowania bezpośredniego i dyfuzyjnego, jeżeli przeszkoda charakteryzuje się określoną transmisyjnością, dla promieniowania słonecznego.

Ponadto można wyróżnić dwa podstawowe typy zacienienia:

- zacienienie naturalne, wynikające z miejsca lokalizacji, które jest związane z istnieniem drzew, roślin, obiektów budowlanych, ukształtowaniem i rodzajem terenu;
- zacienienie sztuczne, wynikające z odpowiedniego zaprojektowania otoczenia, w przypadku budynku, otoczenie to jest związane z elementami architektury budynku i specjalnymi elementami tworzącymi jego bezpośrednie sąsiedztwo (np. projekt zieleni).

Zjawisko odbicia, będące tematem rozważań i publikacji [75], [131], [226] rzadziej niż zacienienie, wywołane zaplanowanym lub niezaplanowanym sąsiedztwem obiektów, czy przedmiotów o określonej reflektancji (współczynniku odbicia) może

w określonych warunkach powodować dodatkowe zyski wynikające ze wzrostu udziału promieniowania odbitego (od tych przedmiotów) w całkowitym strumieniu energii promieniowania docierającego do rozważanej powierzchni. Oprócz odbicia od obiektów znajdujących się na powierzchni ziemi ma miejsce odbicie od naturalnego podłoża, w tym od samego gruntu i jego pokrycia, oraz od wód powierzchniowych, o ile takie znajdują się w danym miejscu.

Dowolny obiekt może być zacieniany w sposób naturalny przez inne obiekty znajdujące się w jego sąsiedztwie. Lokalizacja narzuca pewne warunki otoczenia, w którym budynek będzie funkcjonował. Jednakże szczegółowe usytuowanie danego obiektu powinno być analizowane m.in. ze względu na jego zacienienie i zmiany zacienienia w czasie, w krótkim okresie, tj. w ciągu dnia, oraz w długim przedziale, tj. w poszczególnych miesiącach roku. Jeżeli istnieje taka potrzeba otoczenie obiektu może być odpowiednio modyfikowane w celu zapewnienia większego zacienienia lub zwiększenia dostępności promieniowania słonecznego.

Kształty obiektów zacieniających elementy obudowy budynku mogą być nieregularne, mogą też zmieniać się w dowolnej chwili czasu (np. drzewa poruszające się pod wpływem wiatru). Jednocześnie niektóre z zacieniających obiektów mogą być całkowicie nieprzezroczyste dla promieniowania słonecznego (np. sąsiednie budynki), inne charakteryzują się określoną transmisyjnością (np. roślinność). W literaturze [20], [108], [169], [170] można znaleźć informacje dotyczące transmisyjności różnych gatunków drzew i roślin, w zależności od ich wielkości, opisanej np. wysokością i rozpiętością korony, a także w zależności od miejsca na drzewie, tj. wzdłuż osi korony i na obrzeżu korony.

Projektując zagospodarowanie przestrzeni wokół budynku można ograniczać w sposób zaplanowany dostępność promieniowania słonecznego sadząc w odpowiedni sposób odpowiednie drzewa. Drzewa iglaste stwarzają takie samo zacienienie przez cały rok. Drzewa liściaste umożliwiają w czasie jesienno - zimowym po opadnięciu liści, zwiększenie dostępu promieniowania słonecznego do obudowy. Projekt zieleni odgrywa istotną rolę przy planowaniu otoczenia budynku. Odmienny projekt tworzy się przy konieczności zapewnienia jak najlepszych warunków nasłonecznienia przez cały czas, inny dążąc do stworzenia całorocznego, lub tylko sezonowego zacienienia [2], [3], [20].

Zagadnieniami transmisyjności różnych gatunków drzew zajmowali się min. Holzberlein [108], Montgomery [169], Motloch [170]. Wyniki ich badań dowodzą, że drzewa pozbawione w zimie liści przepuszczają średnio (dla całego drzewa) 50 - 70% padającego na nie promieniowania. Balcomb [20] stworzył model oceny zacienienia powodowanego przez rząd drzew znajdujący się przed zacienianym obiektem. Burns [20] stwierdził, że w krajach o trudniejszych warunkach klimatycznych, budynki wyposażone w systemy pasywne nie powinny być zasłaniane od strony południowej przez żadne drzewa. Ograniczają one bowiem dostęp promieniowania słonecznego w tak znacznym stopniu (30 -50%), że przy niskich wartościach strumienia promieniowania w czasie zimy funkcjonowanie

systemów pasywnych staje się nie efektywne. Natomiast równoczesne sadzenie drzew od strony wschodniej i zachodniej daje pozytywne skutki stwarzając właściwe zacienienie w lecie, nie ograniczając jednocześnie dostępu promieniowania słonecznego w zimie. Zacienienie dawane przez drzewa zależy nie tylko od gatunku drzew i ich wieku, a w konsekwencji wielkości, ale także od sposobu ich sadzenia (gęstości) i oczywiście miejsca na kuli ziemskiej, te same gatunki w różnych strefach geograficznych inaczej rosną, jednakże wyniki badań tego typu nie są jeszcze dostępne.

Elementy obudowy budynku w sposób zaplanowany lub nie powodują zacienianie przegród zewnętrznych, przede wszystkim okien i innych przezroczystych fragmentów elewacji budynku. Do elementów specjalnie zaprojektowanych jako zacieniające należą okapy i inne występy nad oknami i na ścianach bocznych. Zacienienie jest także powodowane istnieniem loggii i balkonów. W literaturze można znaleźć różną metodykę określania zacienienia wywołanego przez elementy obudowy budynku [20], [75], [123], [174] - [175], [230], a także przez wszystkie elementy obudowy i otoczenia [140], [181], [198], [229].

Do określenia zacienienia mogą być wykorzystywane tzw. diagramy drogi Słońca. Diagramy drogi Słońca opisujące pozycję Słońca na pozornym nieboskłonie zostały po raz pierwszy wprowadzone przez Olgyay i Olgyay [174], [175]. Do rozpowszechnienia stosowania diagramów drogi Słońca przyczynił się Mazria [161]. On też stworzył metodykę ich stosowania przy wyznaczaniu zacienienia promieniowania bezpośredniego dla dowolnej powierzchni zwróconej w stronę południową. Przy tworzeniu diagramu drogi Słońca wykorzystuje się zależności geometrii sferycznej opisujące położenie Słońca na nieboskłonie względem obserwatora. Jednocześnie możliwe jest skojarzenie tych zależności z konkretnymi wartościami natężenia promieniowania słonecznego, a w konsekwencji określenie dostępności promieniowania słonecznego dla rozważanych powierzchni obudowy. Dzięki uwzględnieniu modelu sferycznego trójwymiarowego i poprzez odpowiednie przetransformowanie go w układ płaski możliwe jest bezpośrednie wyznaczanie kształtu i wymiarów zacienienia.

Pozycja Słońca na niebie, względem obserwatora, jest zdeterminowana przez kąt α wzniesienia Słońca i kąt γ_s azymutalny Słońca. Kąty mogą być wyznaczone korzystając z równań zawartych w punkcie 1.1 tego rozdziału. Kąt α wzniesienia Słońca jest dopełnieniem kąta θ_z zenitalnego Słońca do kąta prostego, co można zapisać jako:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (1.44)$$

Wstawiając do równania (1.13) zamiast kąta θ_z zenitalnego, odpowiadający mu kąt wzniesienia Słońca α (uwzględniając odpowiedni wzór redukcyjny) otrzymujemy po przekształceniach zależność na kąt wzniesienia Słońca o postaci:

$$\sin(\alpha) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (1.45)$$

czyli w odniesieniu do dowolnego czasu t :

$$\alpha(t) = \arcsin(\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))) \quad (1.45')$$

Kąt wzniesienia Słońca jest zmienny w czasie. W południe czasu słonecznego kąt godzinny słońca jest równy zero $\omega = 0$ i równanie (1.45') upraszcza się do postaci:

$$\alpha(t) = \arcsin(\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)) \quad (1.45'')$$

Kąt wzniesienia Słońca osiąga maksimum w południe astronomiczne. Dla powierzchni poziomej ziemi, dla danej lokalizacji, określonej szerokością geograficzną (ϕ), w dowolnym dniu, dla którego przypisana jest określona wartość deklinacji (δ), czyli kątowne położenie Słońca w południe opisane równaniem (1.3), kąt α wzniesienia Słońca dla półkuli północnej, korzystając z równania (1.22) może być określony równaniem o postaci:

$$\alpha_{\text{południe}} = 90^\circ - \theta_{z,\text{południe}} = 90^\circ - |\phi - \delta| \quad (1.46)$$

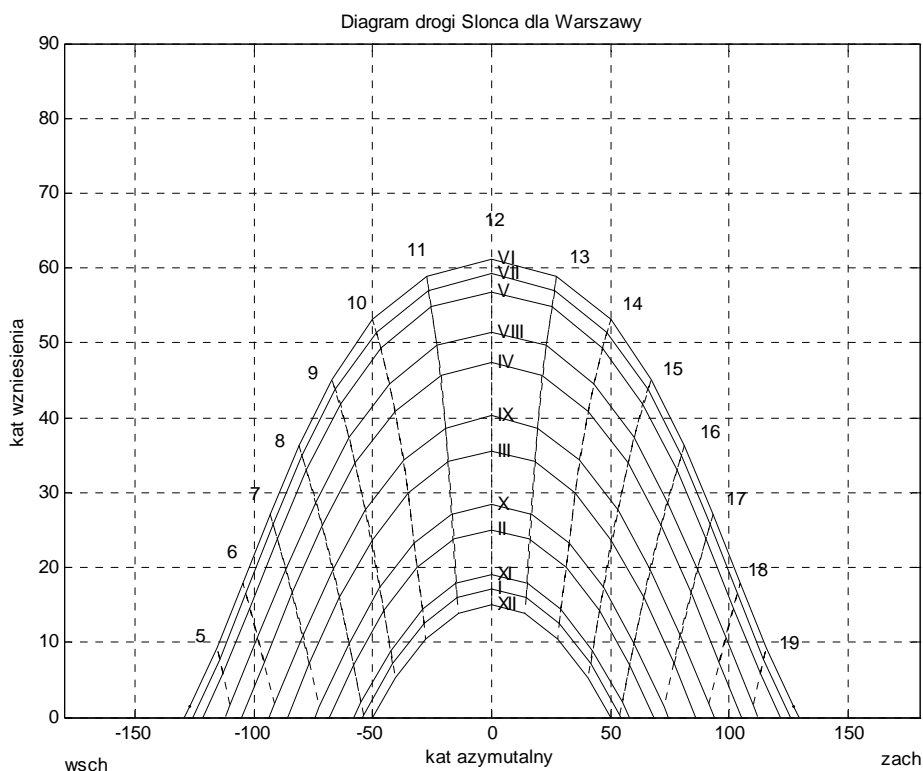
Zależność powyższa jest przydatna przy określaniu kąta zacienienia dla specjalnie projektowanych (w celu zacienienia) elementów architektonicznych budynku.

Kąt azymutalny Słońca można wyznaczać korzystając z zależności (1.15) - (1.20) i otrzymując po przekształceniach:

$$\cos(\gamma_s) = (\sin(\alpha)\sin(\phi) - \sin(\delta)) / (\cos(\alpha)\cos(\phi)) \quad (1.47)$$

Dwa powyżej opisane parametry (α) i (γ_s) określają pozycję Słońca na nieboskłonie, tworzącym pozorną powierzchnię półsferyczną nad obserwatorem. Każdy z diagramów drogi Słońca sporządzany jest dla odrębnej szerokości geograficznej dla południa astronomicznego.

Na rysunku 1.5 jest zamieszczony diagram drogi Słońca sporządzony dla Warszawy. Na osi rzędnych przedstawiany jest kąt (α) wzniesienia Słońca, natomiast na osi odciętych oznaczony jest kąt (γ_s) azymutalny Słońca. Na wykresie w środku osi odciętych zaznaczony jest kierunek południowy. Na diagramach oznacza się linie krzywe reprezentujące trajektorię Słońca w poszczególnych typowych dniach kolejnych miesięcy. Począwszy od górnej krzywej dla czerwca kolejne krzywe odpowiadają poszczególnym wyszczególnionym miesiącom, ostatnia dolna krzywa grudniowi. Linie przerywane przecinające poszczególne trajektorie Słońca są krzywymi godzinnymi, odnoszonymi się do poszczególnych godzin dnia od wschodu (po lewej stronie diagramu kąt wzniesienia jest równy 0) do zachodu Słońca (po prawej stronie kąt wzniesienia jest równy 0). Południe atmosferyczne odpowiada pionowej linii prostej przechodzącej przez środek wykresu. Droga Słońca po nieboskłonie odpowiada przejściu od lewej do prawej strony wykresu.



Rys.1.5. Diagram drogi słońca dla Warszawy

Dzięki diagramowi pozycji Słońca dla danej lokalizacji (szerokości geograficznej) można odczytać dla wybranego dnia o określonej godzinie wartości kąta wzniesienia Słońca i kąta azymutalnego Słońca, co jest bardzo przydatne przy projektowaniu budynków i instalacji słonecznych. Podstawową zaletą diagramów pozycji Słońca jest możliwość określania zacienienia dla powierzchni, odniesionych do elementu punktowego, wystawionych na działanie promieniowania słonecznego. Zacienienie może być wywołane naturalnym ukształtowaniem terenu (np. pobliskie wzgórza), sąsiednimi budynkami, jak i specjalnie zaprojektowanymi elementami architektury budynku (np. okapami) służącymi do wywołania sztucznego zacienienia. Sposób korzystania z diagramów Słońca w celu wyznaczania zacienienia danej powierzchni, czyli określenia (ograniczenia) dostępności promieniowania bezpośredniego w związku z istnieniem naturalnego ukształtowania terenu, obiektów naziemnych i elementów architektonicznych oceniających dany obiekt od góry został przedstawiony w publikacjach [20], [52], [75].

Promieniowanie słoneczne (bezpośrednie i rozproszone) docierając do powierzchni ziemi ulega odbiciu, jeżeli po drodze napotyka różnego rodzaju przedmioty, w zależności od ich własności refleksyjnych, w mniejszym lub większym stopniu

odbija się również od nich. Stosunek promieniowania odbitego od powierzchni ziemi do promieniowania na nią padającego jest określany jako współczynnik odbicia (nazwa albedo powinna być stosowana tylko w odniesieniu do współczynnika odbicia zewnętrznych warstw atmosfery [190]. W literaturze [20], [160] można znaleźć, wartości współczynnika odbicia dla promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię ziemi przy różnym rodzaju jej pokrycia. Współczynniki te wahają się od 0,05 do wartości bliskich jedności. W większości analiz z zakresu energetyki słonecznej przyjmuje się średnią wartość współczynnika odbicia na poziomie 0,2 [38], [58], [75].

Oprócz rodzaju podłoża (jego refleksyjności), od którego odbija się promieniowanie słoneczne, wpływ na wartość strumienia energii promieniowania odbitego ma pochylenie powierzchni, na którą pada promieniowanie słoneczne. W przypadku modelu izotropowego promieniowania zgodnie z równaniem (1.30) współczynnik korekcyjny R_o dla promieniowania odbitego osiąga maksimum dla powierzchni pionowej. Im mniejsze pochylenie powierzchni tym udział promieniowania odbitego w promieniowaniu całkowitym jest mniejszy.

Istnieje możliwość wprowadzenia w otoczenie budynku specjalnych elementów o powierzchniach mających silne własności refleksyjne. Mogą to być np. umieszczone na południowej ścianie budynku pod odpowiednim kątem, w stosunku do powierzchni pochłaniających promieniowanie słoneczne, powierzchnie metalowe - odbłyśniki, o dużym współczynniku odbicia, zwiększające efekt napromieniowania powierzchni pochłaniającej wzrostem udziału składowej odbitej promieniowania.

2. Analiza dostępności promieniowania słonecznego do różnie usytuowanych elementów obudowy budynku

2. 1 Ogólne wskazania odnośnie kształtu budynku

Dobrze zaprojektowany budynek powinien zachowywać się w zimie jak kolektor słoneczny i magazyn pozyskanej energii promieniowania słonecznego, a także jak swoista pułapka ciepła. Jednocześnie powinien wykazywać się zdolnością do funkcjonowania w cyklu rewersyjnym, czyli w lecie powinien być kolektorem i magazynem chłodu. W ciągu dnia w zimie budynek powinien być „otwarty” na oddziaływanie promieniowania słonecznego, w nocy powinien się „zamykać”, aby zachowywać pozyskane ciepło dzięki ograniczeniu w jak największym stopniu strat ciepła do otoczenia. Z kolei latem w czasie dnia budynek powinien być „zamknięty”, aby ograniczyć dostęp promieniowania słonecznego, natomiast nocą powinien się „otwierać”, aby umożliwić chłodzenie wnętrza. Dobrze zaprojektowany i wykonany budynek powinien mieć warunki klimatu wewnętrznego praktycznie niezmiennie w czasie, niezależne od pory roku i dnia [1], [3], [20], [175], [220] - [221]. Sytuacja taka może zaistnieć, jeżeli zostanie uwzględniony szereg czynników związanych z koncepcją architektoniczną, zastosowanymi materiałami budowlanymi, rozwiązaniami technologicznymi, instalacyjnymi i lokalizacją budynku. W tym rozdziale rozważano jeden z czynników związanych z koncepcją obudowy budynku, a mianowicie wpływ zorientowania i pochyleń elementów obudowy na dostępność promieniowania słonecznego. Fasada główna budynku powinna być odpowiednio zorientowana, ekspozycyjna na napromieniowanie słoneczne w zimie i wyposażona w elementy zapewniające zacienienie w lecie, połacie dachu powinny być odpowiednio pochylone i zorientowane.

Zagadnieniami związanymi z wpływem oddziaływania promieniowania słonecznego na obudowę budynku zajmował się już w latach 30-tych XX wieku H.N. Wright, który sformułował pierwsze zalecenia projektowe, co do kształtowania obudowy budynku dla lokalizacji Nowego Jorku uwzględniając tamtejsze warunki napromieniowania [3]. Według Wrighta budynki powinny mieć główną fasadę zwróconą w zakresie kąta azymutalnego od 0° do $+45^{\circ}$ (od kierunku południowego do południowo – zachodniego). Od tej strony powinny znajdować się pomieszczenia o charakterze mieszkalnym i duże przeszklone powierzchnie obudowy. Liczba okien i pomieszczeń mieszkalnych powinna być znacznie ograniczona w zakresie kątów azymutalnych od $+90^{\circ}$ do $+135^{\circ}$ (od zachodu do północnego – zachodu). Taka koncepcja obudowy budynku miała stworzyć dobre warunki pozyskiwania promieniowania słonecznego w zimie i naturalnego chłodzenia budynku w lecie. Wright twierdził, że napromieniowanie południowej pionowej fasady budynku jest prawie pięciokrotnie większe w zimie niż w lecie; a północno – zachodniej prawie sześć razy. Późniejsi badacze skorygowali zalecenia Wrighta, m.in. zaproponowali zorientowanie głównej przeszklonej fasady budynku w stronę południową, z możliwością jej odchylenia o 30° w kierunku wschodnim bądź zachodnim [3].

Olgyay, jeden z czołowych badaczy wpływu klimatu na budynek, przeciwstawił się uniwersalnemu zaleceniom Wrighta odnośnie orientacji budynku (które powstały tylko na podstawie analiz dla Nowego Jorku) i wykazywał istotny wpływ zarówno szerokości geograficznej, jak i innych lokalnych warunków lokalizacji budynku na dostępność promieniowania słonecznego [174] - [175]. Podkreślał on wpływ nie tylko zorientowania budynku, ale i jego wymiarów na ilość pozyskiwanej energii słonecznej. Olgyay twierdził, że dla lokalizacji powyżej 40°N szerokości geograficznej południowa pionowa fasada budynku otrzymuje prawie dwukrotnie więcej napromieniowania w zimie niż w lecie, wschodnia i zachodnia dwu i półkrotnie więcej w lecie niż w zimie. Kwadratowy kształt podstawy budynku nie jest wskazany, choć powierzchnie boczne takiego budynku są lepiej napromieniowywane, niż powierzchnie boczne (o tym samym całkowitym polu powierzchni) budynku o podstawie prostokąta o dłuższych bokach wzdłuż osi północ - południe. Dla zapewnienia oszczędności w zużyciu energii do celów grzewczych i klimatyzacyjnych, tj. dobrego nasłonecznienia w zimie i właściwych warunków mikroklimatycznych w lecie, należy budynki „rozciągać” wzdłuż osi wschód – zachód. W późniejszych latach Olgyay zajął się zjawiskiem zacienienia obudowy budynku i opracował diagramy drogi Słońca na pozornym nieboskłonie.

Istotny wpływ zorientowania i kształtu budynku na jego bilans energetyczny został uwzględniony już w 1967 w poradniku ASHRAE [11]. Zaznaczono (potwierdzając badania wcześniejsze Olygay), że najbardziej właściwe, ze względu na bilans energetyczny budynku, jest zorientowanie głównej fasady w kierunku południowym i rozciągnięcie budynku wzdłuż osi wschód – zachód. Jako najmniej korzystne sklasyfikowano nadanie kształtu budynku o podstawie kwadratu, o orientacji ścian północno - wschodniej, północno - zachodniej, południowo - wschodniej i południowo - zachodniej. Prowadzone w USA w latach 60–80 tych analizy [1], [3], [19], [69], [245] warunków napromieniowania obudowy budynków wynikały przede wszystkim z ich przegrzewania w okresie letnim, w związku z nadmiernym napromieniowaniem słonecznym. W tym okresie w Europie nie uwzględniano praktycznie oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek. Przede wszystkim koncentrowano się na zmniejszeniu zapotrzebowania na ciepło w czasie sezonu grzewczego, poprzez poprawienie izolacyjności przegród zewnętrznych.

Badania nad możliwością wykorzystania energii promieniowania słonecznego w sposób pasywny do ogrzewania pomieszczeń, dzięki odpowiedniej orientacji, strukturze i kształtowi obudowy budynku, rozwinęły się na przełomie lat 80-90 tych. Prace nad wykorzystaniem rozwiązań pasywnych do ogrzewania budynku prowadzone w USA [3], [20], [75], [217], [230] i w Europie [93], [103], [120], [177] w większości przypadków ograniczały się do sezonu grzewczego. Przenieszone bezpośrednio koncepcje rozwiązań pasywnych z krajów niższych szerokości geograficznych do krajów wyższych szerokości, bez ich adaptacji do nowych warunków klimatycznych, doprowadziły do szeregu nietrafnych realizacji [227], [233]. Co prawda miało to i pozytywne skutki, bowiem przyczyniło się do kompleksowego spojrzenia na budynek jako obiekt energetyczny specjalnie

zaprojektowany do współistnienia z otoczeniem w konkretnych warunkach klimatycznych i lokalnych, dla którego ważne jest wykorzystanie zysków słonecznych w zimie i ich ograniczenie w lecie [5], [10], [23], [37], [42], [80] - [81], [84], [112], [143], [180], [204], [222], [224], [231]. Zaczęły pojawiać się nowe kształty budynków z wyeksponowaną zaokrągloną w stronę południową fasadą lub o przekroju budynku zbliżonym do trapezu o dłuższej podstawie zwróconej na południe [41], [70], [124], [199], [215], [233]. W kraju tematyka dostępności promieniowania słonecznego dla budynku dla całego roku została podjęta tylko w nielicznych pracach [55] - [56], [176], [185]. Z reguły zakres rozważań ogranicza się do sezonu grzewczego.

Obecnie nie ma w kraju zaleceń projektowych odnośnie kształtowania bryły budynku i jego helioaktywnych i heliopasywnych elementów. Normy polskie wyznaczają standardowy, normowy sposób obliczania zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków. Do obowiązujących w tym zakresie należy norma z lipca 2001 roku PN-B-02025 [189]. Zgodnie z normą przy obliczaniu zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń uwzględnia się zyski ciepła słonecznego przez okna w każdym kolejnym miesiącu sezonu grzewczego. Norma podaje sposób liczenia tych zysków, ale tylko dla kolejnych miesięcy sezonu grzewczego. W załączniku do normy zawarte są dane miesięcznego półsferycznego napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni. Dane te są uśrednione za okres tylko dziesięciu lat. Taki okres czasu nie jest wystarczający do tworzenia danych uśrednionych w przypadku dysponowania danymi stochastycznymi, jakimi są parametry pogodowe. Co więcej, dane normowe nie odzwierciedlają dynamiki zmian napromieniowania, dotyczą bowiem tylko średnich miesięcznych wartości promieniowania półsferycznego, nie uwzględniają rozkładu promieniowania w czasie dnia i zmienności poszczególnych składowych promieniowania, co jest niezbędne w analizie procesów zachodzących w obudowie budynku w wyniku oddziaływania energii promieniowania słonecznego. Na podstawie danych normowych projektant nie może ocenić, czy dążąc do zwiększenia zysków cieplnych z promieniowania słonecznego w zimie, nie spowoduje przegrzewania części pomieszczeń szczególnie wystawionych na operację słoneczną w miesiącach letnich. Nie znając rozkładu promieniowania w ciągu dnia nie wie jak zaplanować elementy struktury budynku i otoczenia, aby zacięniały przeszklone powierzchnie o odpowiednich porach dnia i roku.

Przy projektowaniu budynków i szacowaniu zapotrzebowania na energię należy spodziewać się coraz częstszego występowania nowego składnika bilansowego, a mianowicie zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych. Czynnikiem determinującym wielkość tej energii jest, poza temperaturą powietrza zewnętrznego, poziom napromieniowania powierzchni obudowy budynku, przede wszystkim tych, które są szczególnie wyeksponowane na oddziaływanie promieniowania słonecznego. Odpowiednim projektem bryły zewnętrznej można nie tylko zapewnić zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło do celów grzewczych, ale także doprowadzić do takich warunków mikroklimatycznych, aby chłodzenie w czasie lata nie było wymagane.

2.2 Opis danych promieniowania słonecznego przyjętych do rozważań

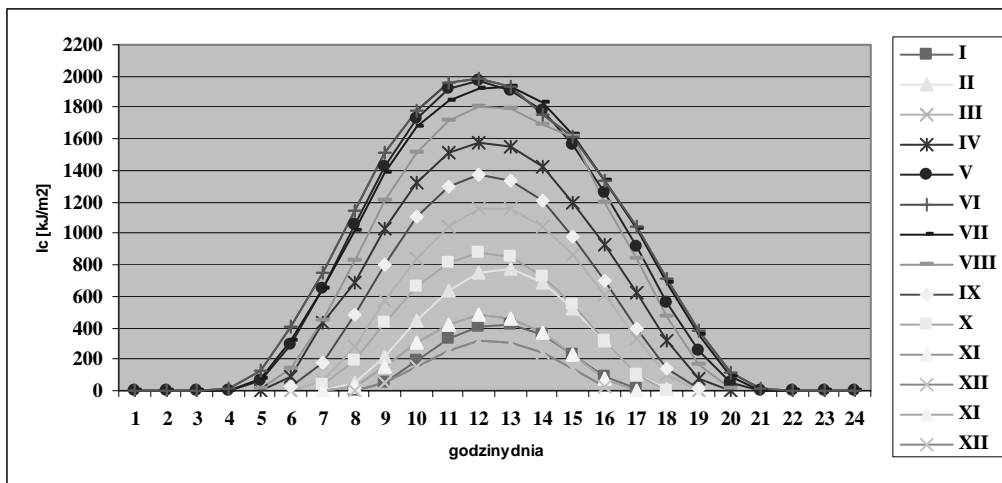
W związku z brakiem powszechnie dostępnych danych promieniowania słonecznego dla potrzeb badań napromieniowania powierzchni różnie usytuowanych (względem słońca i powierzchni ziemi), w wyniku współpracy autorki z Bogdańską z IMiGW, powstał model promieniowania słonecznego w reprezentatywnym uśrednionym roku [56].

Przy dostępie do rzeczywistych pomiarowych danych promieniowania słonecznego, ze względu na ich stochastyczny charakter, chcąc uzyskać właściwy obraz napromieniowania (pewną powtarzalność warunków nasłonecznienia), konieczne jest korzystanie z danych wieloletnich, najlepiej kilkudziesięcioletnich [30] - [31]. Jednakże, przy ogromnej liczbie danych pomiarowych zebranych w okresie kilkudziesięciu lat nie jest możliwe korzystanie z nich w sposób bezpośredni. Dane te muszą być odpowiednio przetworzone i opracowane dla potrzeb danej analizy. Najczęściej uśredniania się je. W rozważaniach dotyczących dostępności promieniowania zachodzi konieczność analizowania danych z dokładnością do godzinnych sum promieniowania, w odniesieniu nie tylko do promieniowania całkowitego, ale także jego poszczególnych składowych. Dane godzinne promieniowania odzwierciedlają zmienność w czasie warunków napromieniowania powierzchni obudowy budynku.

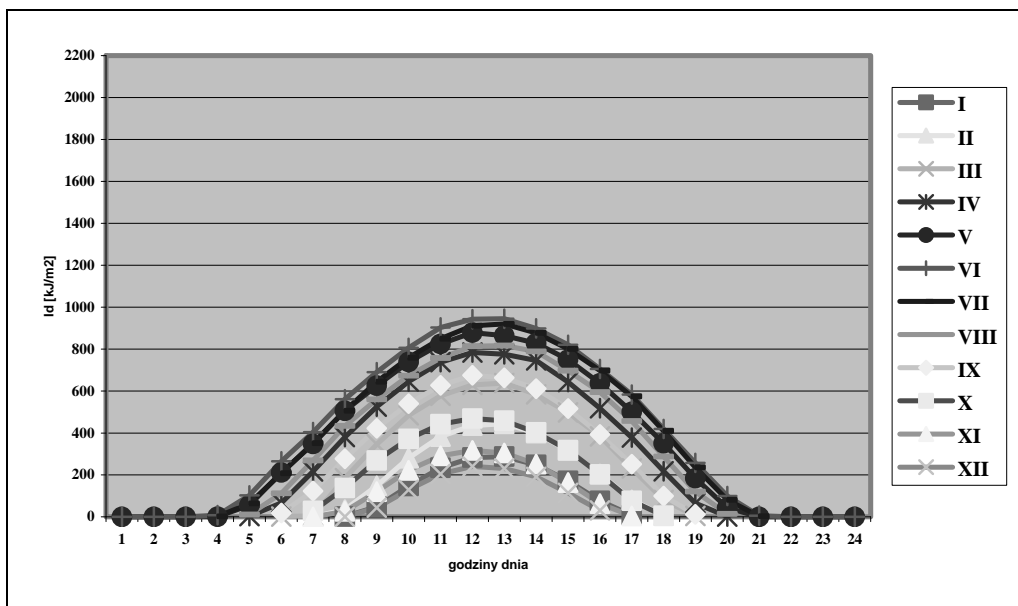
Wykorzystane, do badań będących przedmiotem niniejszej rozprawy, dane promieniowania odnoszą się do czasu słonecznego i przedstawiają reprezentatywne dla obszaru Polski Centralnej wielkości promieniowania całkowitego i rozproszonego na płaszczyznę poziomą, otrzymane w wyniku uśredniania zmierzonych rzeczywistych wartości [56]. Wykorzystane dane zostały otrzymane po uśrednieniu (arytmetycznym) rzeczywistych danych pomiarowych gęstości sum godzinnych promieniowania całkowitego i rozproszonego dla stacji aktynometrycznej na Bielanych w Warszawie. Do uśredniania wykorzystano dane 30 letnie z okresu lat 1971 - 2000. Najpierw zostały uśrednione sumy godzinne promieniowania całkowitego i rozproszonego dla poszczególnych dni w danym miesiącu każdego roku. W ten sposób otrzymano średnie wartości sum godzinnych dla uśrednionego dnia każdego miesiąca w każdym roku z 30 lat objętych uśrednianiem. Następnie dla danych ze wszystkich kolejnych 30 lat, stworzono model uśrednionych sum godzinnych średniego dnia każdego z miesięcy uśrednionego roku (uśrednionego za okres 30 lat). W ten sposób powstał model reprezentatywnego (uśrednionego) promieniowania słonecznego oparty na rzeczywistych danych pomiarowych dla Warszawy. Model ten stał się podstawą do przeprowadzonych w rozprawie obliczeń napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni.

Dla warunków polskich charakterystyczna jest znaczna zmienność napromieniowania w krótkich przedziałach czasu, odpowiadająca zmianom w ciągu jednej doby. Sytuację tę w sposób zbiorczy dla wszystkich uśrednionych dni w kolejnych miesiącach uśrednionego reprezentatywnego roku ilustrują rys. 2.1.a i

2.1.b, sporządzone odpowiednio dla promieniowania całkowitego i rozproszonego padającego na płaszczyznę poziomą w kolejnych godzinach dnia (wg czasu słonecznego) kolejnych miesięcy roku.



Rys. 2.1a. Rozkład uśrednionych gęstości sum godzinnych promieniowania całkowitego w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy dla Warszawy



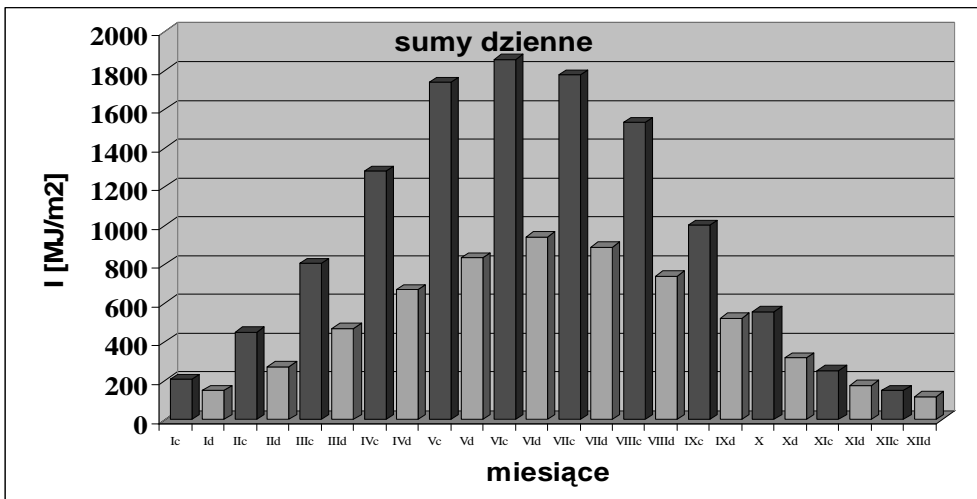
Rys. 2.1b. Rozkład uśrednionych gęstości sum godzinnych promieniowania rozproszonego w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy dla Warszawy

Należy zaznaczyć, że sumy godzinne promieniowania są funkcją schodkową (dyskretna). Jednakże ze względu na dużą liczbę danych, często o bardzo zbliżonych wartościach, dla przejrzystości obrazu na rysunkach, sumy godzinne zostały przedstawione jako punkty połączone linią ciągłą o zróżnicowanej kolorystyce (każdy miesiąc ma inny kolor).

Rysunki 2.1a i 2.1b obrazują także zróżnicowanie w napromieniowywaniu powierzchni poziomej w dłuższym okresie czasu, tj. w całym roku. Największe wartości sum godzinnych w skali dnia występują od godziny 11-tej do 14-tej, natomiast w skali roku w czerwcu, lipcu i sierpniu. Najmniejsze napromieniowanie ma miejsce w grudniu, styczniu i listopadzie. Kąt nachylenia krzywej, łączącej punkty kolejnych sum godzinnych w danym dniu miesiąca, do osi czasu ilustruje szybkość zmian napromieniowania (w określonych przedziałach czasowych).

Analizując wykresy, zamieszczone na rys. 2.1a i 2.1b, należy zwrócić uwagę na duże zróżnicowanie czasu nasłonecznienia w poszczególnych miesiącach. Promieniowanie słoneczne najkrócej oświetla ziemię w naszym kraju w listopadzie, grudniu i styczniu, czas operacji słonecznej wynosi w tym okresie średnio dziennie 8 godzin (najkrótsze dni). Najdłużej Słońce świeci w maju, czerwcu i lipcu, 16 godzin (najkrótsze noce).

Inną dość istotną cechą promieniowania słonecznego jest duży udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym, co jest szczególnie wyraźne w grudniu, a także w listopadzie i styczniu. Promieniowanie rozproszone dominuje również wyraźnie tuż po wschodzie słońca i przed jego zachodem, i to niezależnie od pory roku.



Rys. 2.2. Rozkład gęstości sum dziennych promieniowania całkowitego i rozproszonego na płaszczyznę poziomą w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy roku w Warszawie

Rysunek 2.2 przedstawia rozkład sum dziennych promieniowania całkowitego i rozproszonego na płaszczyznę poziomą w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy roku. Rysunek ten obrazuje charakterystyczną dla warunków polskich znaczną zmienność nasłonecznienia na przełomie roku. Widoczne jest duże zróżnicowanie pomiędzy promieniowaniem w okresie późnej jesieni i zimy (szczególnie od listopada do końca stycznia), a późną wiosną i latem (szczególnie od maja do końca sierpnia).

Przedstawione w tym punkcie rozdziału dane dotyczą wartości promieniowania na powierzchni poziomej w określonym czasie i są podstawą do obliczeń wartości napromieniowania powierzchni pochylonych do poziomu pod dowolnym kątem i dowolnie zorientowanych względem stron świata w rozważanym czasie, co jest tematem analizy kolejnych punktów tego rozdziału. Należy zaznaczyć, że w analizach dostępności promieniowania do obudowy budynku, rozważaniom powinien być poddany przedział czasu odpowiadający całemu rokowi, bowiem budynek jest wystawiony na oddziaływanie promieniowania słonecznego cały czas, a więc znajomość napromieniowania we wszystkich porach roku jest istotna dla właściwego zaprojektowania obudowy i struktury budynku.

2.3 Zastosowane metody analizy napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni

Analiza warunków dostępności promieniowania słonecznego docierającego do dowolnie zorientowanej i pochylonej powierzchni została przeprowadzona przy wykorzystaniu symulacji komputerowej. Podstawowymi danymi wejściowymi wykorzystywanymi do obliczania wartości napromieniowania dla różnie usytuowanych powierzchni są uśrednione gęstości sum godzinnych promieniowania całkowitego i rozproszonego w uśrednionych dniach poszczególnych miesięcy roku, otrzymane według metodyki uśredniania opisanej w poprzednim punkcie tego rozdziału. Do obliczeń wykorzystano dwa modele promieniowania słonecznego: izotropowy Liu-Jordana i anizotropowy HDKR.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że w zależności od celu i przedmiotu badań z zakresu energetyki słonecznej budynku wymagane są dane wyjściowe napromieniowania w różnej postaci opisanej poniżej.

- W szczegółowych badaniach oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek, prowadzonych przy wykorzystaniu symulacji komputerowej, dane powinny być w postaci gęstości sum godzinnych promieniowania słonecznego półsferycznego, z uwzględnieniem poszczególnych jego składowych, tj. promieniowania bezpośredniego, rozproszonego i odbitego, w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy roku. Rozważaniom należy poddawać cały rok, a nie tylko sezon grzewczy, znajomość warunków nasłonecznienia we wszystkich

porach roku jest istotna dla właściwego zaprojektowania obudowy i ustroju budynku.

- W pracach projektowych bryły budynku pod kątem zastosowania odpowiednich elementów zacieniających: okapów, występów, wykuszy, loggii i balkonów; lokalizacji pomieszczeń o różnych funkcjach; usytuowania budynku względem otoczenia zewnętrznego, z uwzględnieniem projektu zieleni, celowe jest wykorzystywanie, wspólnie z diagramami drogi Słońca, danych w postaci gęstości sum godzinnych promieniowania słonecznego półsferycznego, z uwzględnieniem poszczególnych jego składowych, w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy roku (podobnie jak powyżej).
- Przy tworzeniu ogólnej koncepcji bryły budynku i jego elementów, w tym określaniu usytuowania i kształtu budynku, lokalizacji poszczególnych przegród zewnętrznych, w tym okien, a także w celu określenia celowości zastosowania danego rozwiązania pasywnego, dane mogą być w postaci gęstości sum dziennych (miesięcznych) promieniowania słonecznego półsferycznego, z uwzględnieniem poszczególnych jego składowych, w uśrednionych kolejnych miesiącach reprezentatywnego roku.
- W rozważaniach koncepcyjnych sezonowo wykorzystywanych obiektów budowlanych, dane mogą być w postaci gęstości sum sezonowych promieniowania słonecznego półsferycznego, z uwzględnieniem poszczególnych jego składowych, dla wybranego przedziału czasu w skali reprezentatywnego roku.

Przeprowadzono obliczenia napromieniowania dla pełnej zmienności kąta pochylenia β i kąta azymutalnego γ (z dokładnością co 1°). Korzystając z równań (1.1) – (1.19) i dla modelu izotropowego promieniowania z równań (1.28) – (1.32) lub dla modelu anizotropowego z (1.32), (1.37) – (1.38), (1.41) – (1.42), oraz przyjmując jako dane odniesienia uśrednione dla poszczególnych miesięcy gęstości sum godzinnych promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego na płaszczyznę poziomą, przeprowadzono obliczenia dla dowolnie pochylnych i zorientowanych płaszczyzn. Otrzymane wyniki obliczeń odnoszą się do dowolnej płaszczyzny, na którą pada promieniowanie słoneczne. Płaszczyzną taką może być płaska powierzchnia struktury zewnętrznej budynku, np. ściana zewnętrzna, okno, dach, lub powierzchnia elementu instalacyjnego specjalnie zaprojektowanego do odbioru energii promieniowania słonecznego. Analizując dostępność promieniowania słonecznego dla różnie usytuowanych powierzchni obudowy budynku rozważono:

- zmiany uśrednionego napromieniowania półsferycznego dziennego, miesięcznego, sezonowego i rocznego w funkcji: kątów azymutalnych, kątów pochylenia w kolejnych miesiącach uśrednionego reprezentatywnego roku, lub w funkcji czasu odpowiadającego kolejnym miesiącom uśrednionego roku;
- zmiany uśrednionego napromieniowania z uwzględnieniem poszczególnych jego składowych w postaci sum godzinnych i dziennych dla powierzchni o

- różnych wybranych kątach pochylenia i kątach azymutalnych, w wybranych miesiącach uśrednionego reprezentatywnego roku;
- zmiany uśrednionego dziennego napromieniowania półsferycznego w postaci izorad w funkcji: kątów azymutalnych i kątów pochylenia w kolejnych miesiącach uśrednionego reprezentatywnego roku.

W Dodatku 1 zamieszczono interpretację graficzną wybranych wyników napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały także przedstawione w publikacjach [53], [55] - [56].

Ciekawą formą graficzną interpretacji danych napromieniowania jest pokazywanie ich w postaci izorad -izolinii sum promieniowania słonecznego, tj. krzywych naniesionych na mapę, wskazujących miejsca o takim samym napromieniowaniu w danym przedziale czasu. Korzystanie z danych napromieniowania w postaci warstwicznej umożliwia odczyt napromieniowania dowolnie usytuowanej powierzchni w określonym czasie, pozwalając na dopasowywanie usytuowania tej powierzchni do funkcji jaką ma spełniać. Izorady spotykane w literaturze, z reguły dotyczą danych pomiarowych [98], rzadko są wynikiem obróbki numerycznej danych obliczeniowych napromieniowania, wynika to z konieczności stosowania indywidualnej metody grupowania danych obliczeniowych (dla poszczególnych zbiorów danych napromieniowania i dla zadanego stopnia szczegółowości analizy).

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń symulacyjnych dokonano porównania danych otrzymanych z obu modeli promieniowania słonecznego, izotropowego i anizotropowego, co przedstawiono w następnym punkcie tego rozdziału. Z kolei w punkcie 2.5 sformułowano zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku w odniesieniu do warunków dostępności promieniowania słonecznego.

2.4 Porównanie wyników obliczeń napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni przy wykorzystaniu modelu izotropowego i anizotropowego

Poniżej porównano, obliczone przy wykorzystaniu dwu modeli promieniowania izotropowego i anizotropowego, wielkości napromieniowania godzinowego, dziennego (zsumowane wartości godzinowe) i rocznego (zsumowane sumy dzienne w poszczególnych miesiącach i jako sumy miesięczne dodane do siebie). Otrzymane wielkości napromieniowania pozwalają wysnuć wnioski ogólne i bardziej szczegółowe, co do zakresu stosowalności danego modelu promieniowania.

Analiza porównawcza zmian uśrednionego półsferycznego rocznego napromieniowania w funkcji kąta azymutalnego i pochylenia powierzchni otrzymanych z obu modeli potwierdza znane ogólne stwierdzenia o niedoszacowaniu napromieniowania rozproszonego w modelu izotropowym, co dokumentuje tabela 2.1. W tabeli tej zestawiono uzyskane dane odnośnie maksymalnego rocznego napromieniowania S_{cmax} powierzchni o różnym kącie pochylenia β , przypisując im odpowiednie „najlepsze” kąty azymutalny γ

począwszy od najbardziej do najmniej napromieniowywanych powierzchni. W nawiasach po prawej stronie tabeli zamieszczono różnice pomiędzy napromieniowaniem tak samo usytuowanej powierzchni, obliczone na podstawie dwóch modeli promieniowania.

Tabela 2.1. Maksymalne roczne napromieniowanie słoneczne powierzchni o różnym pochyleniu i odpowiadającym mu kącie azymutalnym wg dwóch modeli promieniowania

Wg. modelu anizotropowego			Wg. modelu izotropowego		
$\beta [^\circ]$	$\gamma [^\circ]$	$S_{ccmax} [MJ/(m^2 \text{ rok})]$	$\beta [^\circ]$	$\gamma [^\circ]$	$S_{ccmax} [MJ m^{-2} \text{ rok}^{-1}]$
40	+15	4140	30	+15	3900 (200)
45	+15	4120	40	+15	3870 (270)
30	+15	4100	20	+15	3870 (130)
50	+15	4080	45	+15	3850 (270)
20	+15	4000	50	+15	3800 (280)
60	+20	3900	10	+20	3750 (50)
10	+20	3800	60	+20	3600 (300)
70	+25	3740	70	+25	3400 (340)
80	+25	3450	80	+25	3100 (350)
90	+30	3100	90	+30	2740 (360)

Przeprowadzając obliczenia napromieniowania przy wykorzystaniu obu modeli okazuje się, że w modelu anizotropowym w ciągu roku najlepiej napromieniowywana jest powierzchnia o kątach $\beta=40^\circ$ i $\gamma=+15^\circ$, natomiast w izotropowym powierzchnia o kątach $\beta=30^\circ$ i $\gamma=+15^\circ$. Różnica w napromieniowywaniu tych powierzchni wynosi 270 MJ/(m² rok). Dla rozwiązania helioaktywnego obudowy budynku jednorodzinnego przy instalacji małogabarytowej, rzędu 10 m² powierzchni kolektorów słonecznych, jest to nieduża różnica. Natomiast dla rozwiązania helioaktywnego wielkogabarytowego w budynku wielorodzinnym, czy też użyteczności publicznej, jest już znaczna i przy 1000 m² powierzchni kolektorów słonecznych wynosi odpowiednio 270 GJ/(rok).

W przypadku najgorzej napromieniowywanych powierzchni (północnej, północno – wschodniej i północno – zachodniej), które nie są wyszczególnione w tabeli 2.1, wartości uzyskiwane z modelu izotropowego są wyższe (poza powierzchniami pionowymi, dla których występuje zgodność między dwoma modelami).

Wnioski dotyczące średniego rocznego napromieniowania powierzchni różnie pochyłonych i różnie zorientowanych są jednakże bardzo ogólne i powinny być wykorzystywane jedynie w długoterminowych analizach helioaktywnych elementów budynku, bowiem dla rozwiązań pasywnych dane roczne nie odzwierciedlają rzeczywistej natury promieniowania słonecznego.

Kolejne rozważania dotyczące porównania wyników obliczeń przy wykorzystaniu obu modeli dotyczyły zmian uśrednionego półsferycznego dziennego

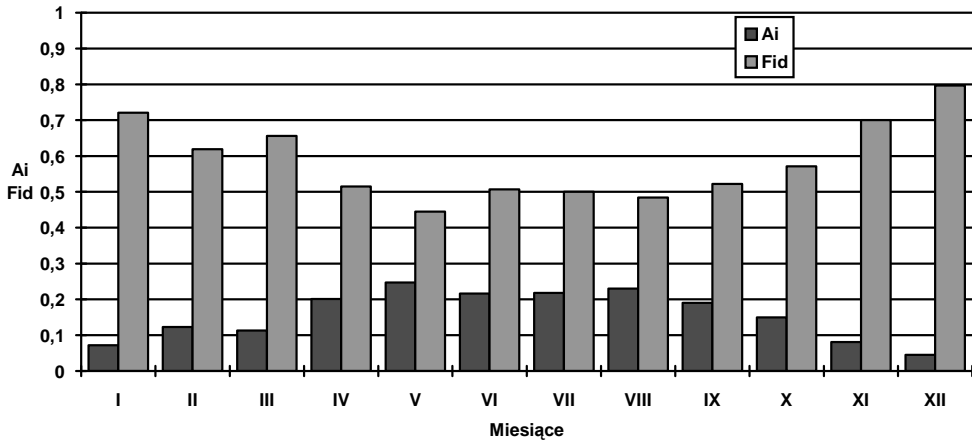
napromieniowania w funkcji pochylenia i orientacji powierzchni w kolejnych miesiącach roku. Uzyskane wnioski mają nadal charakter ogólny i są potwierdzeniem głównych spostrzeżeń z porównania rocznych wartości napromieniowania. Stwierdzono, bowiem że:

- model anizotropowy daje z reguły wyższe wartości napromieniowania przy tym samym usytuowaniu powierzchni (co do orientacji i pochylenia), choć występują przypadki sytuacji odwrotnej (np. powierzchnia północna);
- ze wzrostem pochylenia powierzchni rośnie różnica pomiędzy wielkościami napromieniowania otrzymanymi z modelu anizotropowego i izotropowego (wartości napromieniowania w modelu anizotropowym są większe);
- w modelu anizotropowym występuje większa zmienność w napromieniowaniu różnie usytuowanych powierzchni, niż w modelu izotropowym, co oznacza większy wpływ usytuowania powierzchni na dostępność promieniowania słonecznego;
- dążąc do zwiększenia napromieniowania wg modelu anizotropowego powinno stosować się większe pochylenie powierzchni niż wynika to z modelu izotropowego.

Bardziej szczegółowe wnioski można wyprowadzić analizując zmiany uśrednionego dziennego napromieniowania z uwzględnieniem poszczególnych składowych w kolejnych miesiącach roku. Wielkość powstałych różnic w napromieniowaniu jest różna dla poszczególnych orientacji powierzchni i w poszczególnych miesiącach. Biorąc pod uwagę poszczególne orientacje powierzchni największe zróżnicowanie poziomu napromieniowania obliczone na podstawie dwóch rozważanych modeli, występuje dla powierzchni południowej i południowo - zachodniej, czyli dla tych które są najlepiej napromieniowywane, następnie dla południowo - wschodniej i zachodniej. Zjawisko to jest związane z uwzględnianiem w modelu anizotropowym składowej okołosłonecznej promieniowania rozproszonego, na którą wpływa m.in. współczynnik A_i anizotropowości.

Na rysunku 2.3 przedstawiono zmiany w kolejnych miesiącach roku wartości uśrednionego dziennego indeksu A_i anizotropowości i udziału F_{ld} promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym dla Warszawy. Indeks anizotropowości osiąga największe wartości w maju i sierpniu. W tych też miesiącach, jak wykazały obliczenia, występuje największe zróżnicowanie w wielkościach napromieniowania powierzchni (poza powierzchnią północną) obliczanych według dwóch różnych modeli. Rozkład przestrzenny promieniowania rozproszonego ma w tych miesiącach charakter zdecydowanie anizotropowy, większe strumienie promieniowania docierają z kierunku rozchodzenia się promieniowania bezpośredniego. Przy dużych pochyleniach dodatkowo rośnie udział drugiej składowej anizotropowej promieniowania rozproszonego jaśniejszego horyzontu. Maj i sierpień (w naszych warunkach klimatycznych), jako istotny okres czasu w analizach pasywnych rozwiązań struktury budynku, powinny więc być poddawane szczegółowym rozważaniom, ze względu na mogące się pojawiać w tym czasie zjawisko przegrzewania pomieszczeń. Najniższe wartości współczynnika A_i

(poniżej 0,1) występują w grudniu, następnie w styczniu i listopadzie. Im mniejszy jest wskaźnik anizotropowości tym więcej promieniowania rozproszonego dociera w sposób izotropowy. Dlatego też w miesiącu grudniu dla małych pochyłości dane napromieniowania otrzymane przy wykorzystaniu dwóch modeli promieniowania są praktycznie takie same, a przy większych pochyleniach różnią się nieznacznie.



Rys. 2.3. Uśrednione dzienne wartości A_i indeksu anizotropowości i współczynnika F_{id} udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym w kolejnych miesiącach roku dla Warszawy

Otrzymane wyniki można podsumować w następujący sposób:

- model izotropowy można stosować w przypadku:
 - małych pochyłości powierzchni względem poziomu;
 - małych wartości wskaźnika anizotropowości (poniżej 0,1), występujących w naszych warunkach geograficznych i klimatycznych w grudniu, styczniu i listopadzie;
 - powierzchni zorientowanych w stronę północną, a także północno - wschodnią i północno - zachodnią, niezależnie od ich pochylenia i pory roku;
- model anizotropowy należy stosować w przypadku:
 - dużych pochyłości;
 - względnie dużych wartości wskaźnika anizotropowości, tj. od lutego do października;
 - powierzchni zorientowanych w stronę południową, zachodnią i wschodnią (w zakresie kątów azymutalnych od -90^0 do $+90^0$), niezależnie od ich pochylenia i pory roku.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń można stwierdzić, że w analizach energetyki słonecznej budynku należy stosować model anizotropowy. Obudowę budynku tworzą bowiem przede wszystkim pionowe przegrody zewnętrzne i elementy połączenia

dachu, które zgodnie z wynikami przeprowadzonych obliczeń powinny być pochylone (nie poziome).

Najbardziej szczegółowe wnioski odnośnie różnic pomiędzy dwoma rozważanymi modelami można sformułować na podstawie analizy porównawczej zmian uśrednionego godzinnego napromieniowania słonecznego z uwzględnieniem jego składowych w uśrednionych dniach kolejnych miesięcy roku. Charakterystyczne jest zróżnicowanie zgodności /rozbieżności wyników dla poszczególnych pór dnia, w zależności od orientacji powierzchni. Występujące różnice oznaczają zarówno wzrost, jak i spadek sum godzinnych składowej rozproszonej według modelu anizotropowego w porównaniu z izotropowym i potwierdzają anizotropowy charakter tej składowej promieniowania. Przeprowadzając analizę porównawczą otrzymanych wyników przy zastosowaniu dwóch modeli obliczeniowych można wysnuć następujące szczegółowe wnioski, które stanowią potwierdzenie i rozszerzenie wniosków sformułowanych wcześniej:

- największe różnice pomiędzy dwoma modelami występują dla powierzchni pionowych, przy ich napromieniowaniu wpływ składowej izotropowej jest najmniejszy, natomiast istotną rolę odgrywa składowa anizotropowa jaśniejszego horyzontu;
- charakterystyczny jest zauważalny wpływ składowej okołosłonecznej promieniowania rozproszonego na wielkość całkowitą promieniowania rozproszonego w godzinach, kiedy promieniowanie bezpośrednie dociera do danej powierzchni, czyli jeżeli dana powierzchnia „widzi” słońce, to wtedy rośnie udział składowej okołosłonecznej. Wzrost jest tym większy im większy jest współczynnik anizotropowości. Dla powierzchni południowo - wschodniej i wschodniej w godzinach przedpołudniowych, kiedy to (ze względu na ich orientację) dostępność promieniowania bezpośredniego jest najlepsza, napromieniowanie rozproszone jest wyższe w modelu anizotropowym, natomiast w godzinach popołudniowych sytuacja jest odwrotna. W przypadku powierzchni południowo - zachodniej i zachodniej sytuacja jest analogiczna, przy czym występuje ona o innej porze dnia, tzn. w godzinach przedpołudniowych napromieniowanie rozproszone jest niższe w modelu anizotropowym, a w godzinach popołudniowych wyższe. Występujące zjawisko jest istotne przy odpowiednim projektowaniu bryły budynku. Dostępność w czasie anizotropowego promieniowania rozproszonego jest związana z dostępnością w czasie promieniowania bezpośredniego, w związku z tym w porze letniej o określonych, najbardziej „uciążliwych” godzinach dnia „nadmiarowi” promieniowania bezpośredniego towarzyszy „nadmiar” promieniowania rozproszonego okołosłonecznego (nie przewidziany w takim stopniu w modelu izotropowym). Różnice w odpowiednich godzinach mogą być na poziomie kilkunastu procent w odniesieniu do promieniowania całkowitego. Odpowiednio zaprojektowane zacieniające elementy bryły budynku, lub elementy naturalne środowiska zacieniające dany obiekt lub jego elementy; są więc istotne zarówno dla

ograniczenia promieniowania bezpośredniego, jak i rozproszonego okołosłonecznego;

- charakter anizotropowości promieniowania rozproszonego obrazują min. różnice występujące w napromieniowaniu powierzchni północnej. Przykładowo w czerwcu, gdy współczynnik anizotropowości jest względnie duży i dana powierzchnia „widzi” promieniowanie bezpośrednie, rośnie udział składowej okołosłonecznej. Nawet przy małych pochyleniach, gdy powierzchnia północna „widzi” promieniowanie bezpośrednie przez cały dzień wartości sum godzinnych promieniowania rozproszonego są wyższe niż w modelu izotropowym. Ze wzrostem pochylenia czas dostępności promieniowania bezpośredniego skraca się. Przy pochyleniu 60° płaszczyzna północna „widzi” jeszcze słońce przez cały dzień, ale przez większą część dnia (nawet w godzinach południowych) poziom napromieniowania bezpośredniego jest mały (kąty padania promieniowania są bardzo duże). W efekcie przy względnie dużym wskaźniku anizotropowości, ale małych wartościach napromieniowania bezpośredniego, model anizotropowy daje niższe wartości niż model izotropowy. W przypadku powierzchni pionowej północnej rano i wieczorem, gdy powierzchnia „widzi” słońce, składowa okołosłoneczna i jaśniejszego horyzontu powodują, że sumy godzinne są zauważalnie wyższe niż w modelu izotropowym, natomiast przez pozostałą większą część dnia, gdy promieniowanie bezpośrednie nie dociera do rozważanej powierzchni, poziom napromieniowania jest zbliżony w obu modelach. Natomiast w zimie do pionowej powierzchni północnej przez cały dzień dociera jedynie promieniowanie rozproszone i współczynnik anizotropowości jest mały. Dla małych i średnich pochyłeń (do 45°) model izotropowy daje nieznacznie wyższe wartości napromieniowania, dla pochyłeń większych poziom napromieniowania jest porównywalny, dopiero dla powierzchni pionowych model anizotropowy daje nieznacznie wyższe wartości promieniowania rozproszonego;
- powierzchnia północna jest najdłużej napromieniowywana promieniowaniem bezpośrednim w miesiącach letnich przy małych i średnich pochyleniach (do 60°), kiedy to powierzchnia północna „widzi” słońce. W pozostałej części roku najdłużej napromieniowywana promieniowaniem bezpośrednim w ciągu dnia jest powierzchnia południowa, dla niej też najdłużej w ciągu dnia (liczba godzin) występują różnice pomiędzy dwoma modelami w wartościach sum promieniowania rozproszonego.

Ostatecznie podsumowując rozważania dotyczące porównania wyników obliczeń napromieniowania otrzymanych przy zastosowaniu dwu modeli promieniowania rozproszonego można sformułować następujące wnioski:

- powszechne stwierdzenie, że model anizotropowy podnosi wartość promieniowania rozproszonego jest zbyt ogólne, bowiem z reguły dotyczy to wartości zsumowanych dla dłuższego okresu czasu równego co najmniej jednemu dniu. W analizach dostępności promieniowania słonecznego rozważania prowadzi się z krokiem czasowym równym jednej godzinie i jak opisano to powyżej, w szczegółowej analizie, w ciągu dnia mogą występować przedziały czasu

obejmujące kilka godzin, kiedy poziom napromieniowania otrzymany w modelu izotropowym jest wyższy niż w anizotropowym;

- stosowanie modelu anizotropowego promieniowania rozproszonego jest konieczne dla: warunków napromieniowania charakteryzujących się dużym udziałem promieniowania bezpośredniego (powyżej 50%) w promieniowaniu docierającym do danej powierzchni, gdy występują duże wartości wskaźnika anizotropowości (powyżej 0,2), gdy pochylenie względem poziomu danej powierzchni jest duże (większe od szerokości geograficznej miejsca lokalizacji powierzchni), a przede wszystkim dla powierzchni pionowych.

Ogólne zalecenia, co do wyboru jednego z dwóch modeli promieniowania w danych rozważaniach, można sformułować następująco:

- jeśli przedmiotem analizy jest funkcjonowanie aktywnego systemu słonecznego do niewielkich obciążeń grzewczych można korzystać z modelu izotropowego;
- jeśli przedmiotem analizy jest wstępne oszacowanie warunków dostępności promieniowania słonecznego i ogólna koncepcja budynku można korzystać z modelu izotropowego;
- jeśli przedmiotem analizy jest funkcjonowanie systemów aktywnych w średniej i dużej skali należy stosować model anizotropowy;
- w analizach dostępności promieniowania słonecznego docierającego do obudowy budynku, w projektowaniu obudowy budynku, w tym w projektowaniu systemów pasywnych budynku należy stosować model anizotropowy;
- jeżeli przedmiotem analizy jest zacienienie obudowy budynku należy korzystać z modelu anizotropowego.

Budynki stanowią przegrody zewnętrzne pionowe i pochylone powierzchnie połączy dachu. (Powierzchnie o małych kątach pochylenia, a szczególnie poziome dachy nie są zalecane do stosowania w budynkach w warunkach krajowych, ze względu na małą dostępność promieniowania słonecznego w zimie i nadmiar promieniowania w lecie). Otrzymane w wyniku obliczeń symulacyjnych przy wykorzystaniu modelu anizotropowego wartości napromieniowania są wyższe niż przy modelu izotropowym, przy czym dla powierzchni pochylonych pod małym kątem różnice są niewielkie, ale rosną wraz z pochyleniem dochodząc do kilkunastu procent przy powierzchni pionowej. Większe zyski słoneczne docierające do obudowy budynku i inne zalecenia co do preferowanych pochylenia powierzchni stanowiących połączenia dachową, mają wpływ na koncepcję architektoniczną budynku. Co więcej niedoszacowanie zysków słonecznych w okresie wiosenno - letnim może doprowadzić do niewłaściwego sformułowania bilansu cieplnego budynku, w następstwie do niewłaściwego projektu architektoniczno - budowlanego, a w konsekwencji do przegrzewania pomieszczeń. Model izotropowy zdecydowanie nie powinien być stosowany do analiz i projektowania rozwiązań z zakresu nowoczesnego budownictwa niskoenergetycznego.

2.5 Zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku w aspekcie dostępności energii promieniowania słonecznego

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń napromieniowywania w dowolnym przedziale czasu różnie usytuowanych powierzchni sformułowano wnioski odnośnie kształtowania obudowy budynku w kontekście jego nasłonecznienia.

Warunki nasłonecznienia charakteryzują się dużą zmiennością napromieniowania zarówno w krótkim, dziennym, jak i w długim, rocznym przedziale czasu. Dzięki analizie rozkładów napromieniowania we wszystkich miesiącach reprezentatywnego roku dokonano podziału warunków nasłonecznienia na trzy okresy, odpowiadające w pewnym przybliżeniu porom roku:

- okres najlepszej dostępności promieniowania słonecznego: wiosenno - letni, tj. IV - VIII;
- okres przejściowy pomiędzy okresem najlepszej i najgorszej dostępności: zimowo – wiosenny: II - III; letnio – jesienny IX i X; analogia występuje pomiędzy II i X, III i IX;
- okres najgorszej dostępności promieniowania słonecznego: zimowy: XI - I.

W okresie najlepszej dostępności promieniowania słonecznego najbardziej nasłonecznione są powierzchnie o małym pochyleniu ($\beta=15^{\circ}$), bliskie poziomym i zorientowaniu w kierunku południowo – zachodnim (o kącie azymutalnym $\gamma=+45^{\circ}$). W miesiącu czerwcu, w którym występują najlepsze warunki nasłonecznienia w skali roku, średnie dzienne napromieniowanie osiąga poziom 19 MJ/(m² dzień). Ze wzrostem pochylenia (względem poziomu) napromieniowanie maleje, osiągając najmniejsze wartości dla powierzchni pionowych. Dla kierunku południowego $\gamma=0^{\circ}$ średnie dzienne półsferyczne napromieniowanie powierzchni pionowej osiąga poziom 10,5 MJ/(m² dzień), czyli jest prawie dwukrotnie mniejsze niż dla najlepiej eksponowanych powierzchni. Powierzchnie południowe o dużych pochyleniach, a szczególnie pionowe są w lecie względnie równomiernie napromieniowywane w ciągu dnia i ich dzienne półsferyczne napromieniowanie jest znacznie mniejsze niż powierzchni wschodnich, a szczególnie zachodnich. Powierzchnie zachodnie obudowy budynku są najbardziej napromieniowywane w czasie całego lata.

W czerwcu, a także w innych miesiącach okresu najlepszej dostępności promieniowania słonecznego, charakterystyczne są wysokie wartości składowej bezpośredniej napromieniowania półsferycznego. Wzrost pochylenia powoduje stopniowe pogorszenie warunków dostępności energii promieniowania słonecznego, spadek składowej bezpośredniej, ale jednocześnie występuje wzrost składowej promieniowania odbitego i rozproszonej jaśniejszego horyzontu. Największe wartości sum godzinnych promieniowania całkowitego występują w czerwcu w godzinach południowych, kiedy to przy małych pochyleniu oraz orientacji południowej i południowo-zachodniej ($\gamma=0^{\circ}$, $\gamma=+45^{\circ}$) napromieniowanie godzinne jest powyżej 2 MJ/m², przy czym promieniowanie bezpośrednie jest rzędu 1,2 MJ/m², stanowiąc 60% promieniowania półsferycznego. Przy wzroście kąta

pochylenia powierzchni maleje nie tylko poziom napromieniowania, ale i czas dostępu promieniowania bezpośredniego w odpowiednich porach dnia. Uwzględniając czas nasłonecznienia promieniowaniem bezpośrednim, jak również poziom napromieniowania, aby zmniejszyć dostępność promieniowania słonecznego w lecie, a przede wszystkim ograniczyć poziom promieniowania bezpośredniego, o wiele lepiej jest więc główną fasadę budynku zwracać w stronę wschodnią (to dotyczy przede wszystkim budynków wykorzystywanych sezonowo w lecie) lub południowo - wschodnią, a nie na zachód lub południowy - zachód.

W okresie najgorszej dostępności promieniowania słonecznego w zimie najlepiej nasłonecznione są powierzchnie o dużych pochyleniach, większych co najmniej o 10° od lokalnej szerokości geograficznej i zwrócone na południe. Dla Warszawy pochylenie to wynosi 65° . W grudniu, miesiącu o najgorszych warunkach nasłonecznienia, dla „najlepiej” usytuowanej powierzchni ($\beta = 65^{\circ}$, $\gamma = 0^{\circ}$) średnie dzienne półsferyczne napromieniowanie wynosi około $2,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$. Napromieniowanie dzienne powierzchni pionowej południowej wynosi w tym okresie około $1,9 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ dzień})$, czyli jest przeszło pięciokrotnie niższe niż w czerwcu. Natomiast w grudniu napromieniowanie powierzchni poziomej wynosi zaledwie $1,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ dzień})$. Zmiany napromieniowania są czułe zarówno na pochylenie, jak i na orientację, przy czym występuje wyraźna preferencja dla kierunku południowego i kątów azymutalnych bliskich zeru, ze względu na zwiększenie zysków słonecznych.

W grudniu, a także w innych miesiącach okresu najgorszej dostępności promieniowania słonecznego, występuje bardzo mały poziom napromieniowania i mała jest liczba godzin słonecznych (dziennych), która w grudniu wynosi około 8 godzin na dobę. Promieniowanie bezpośrednie w tym miesiącu występuje przez 6 godzin na dobę, ale czas ten w zależności od usytuowania powierzchni odpowiednio skraca się. W najbardziej korzystnych warunkach usytuowania powierzchni odbierającej promieniowanie słoneczne, tj. przy pochyleniu rzędu $\beta=60^{\circ}$ i orientacji południowej, w godzinach południowych godzinne napromieniowanie półsferyczne osiąga poziom $0,5 \text{ MJ}/\text{m}^2$, w tym godzinne napromieniowanie bezpośrednie wynosi około $0,3 \text{ MJ}/\text{m}^2$ (co stanowi 60% promieniowania półsferycznego). W zimie bardzo istotne jest odpowiednie pochylanie względem poziomu powierzchni odbierającej promieniowanie w celu zwiększenia udziału promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu półsferycznym. W przypadku większych pochyłeń, począwszy od $\beta=60^{\circ}$ rośnie udział składowej rozproszonej promieniowania jaśniejącego horyzontu i promieniowania odbitego, maleje udział składowej izotropowej promieniowania rozproszonego. Dla powierzchni pionowej, przy typowym podłożu otoczenia ($\rho=0,2$), udział promieniowania odbitego dochodzi do kilkunastu procent. Rola powierzchni refleksyjnych w sposób zaplanowany wprowadzanych w otoczenie budynku jest istotna dla zwiększania dostępności promieniowania słonecznego w okresie zimy.

Zimą zarówno elementy aktywne, jak i pasywne związane z główną fasadą budynku powinny być umiejscowione od strony południowej. Budynek nie powinien być w ogóle zacieniany, można stosować powierzchnie odbijające w otoczeniu budynku (np. w postaci stawu, basenu) lub zainstalowanych na budynku (np. w postaci odbłyśników przy instalacjach kolektorowych).

W okresie przejściowym wiosennym i jesiennym poziom napromieniowania półsferycznego i jego składowej bezpośredniej, zwłaszcza przy korzystnie usytuowanych powierzchniach, jest względnie wysoki. Największe wartości godzinnego napromieniowania półsferycznego występują w południe, kiedy to przy korzystnych warunkach pochylenia ($\beta=45^\circ$) i orientacji południowej, wynoszą około $1,7 \text{ MJ/m}^2$, przy czym godzinne napromieniowanie bezpośrednie może dochodzić do $1,1 \text{ MJ/m}^2$, stanowiąc 65% promieniowania półsferycznego. Dalszy wzrost pochylenia do $\beta=60^\circ$, a tym bardziej do $\beta=90^\circ$ powoduje stopniowe pogorszenie warunków dostępności energii promieniowania słonecznego (choć dla tych pochyłeń wzrasta składowa promieniowania odbitego i składowa promieniowania rozproszonego jaśniejszego horyzontu, to nie rekompensują one spadku promieniowania bezpośredniego i rozproszonego izotropowego).

Powierzchnie wschodnie i zachodnie nie są napromieniowywane promieniowaniem bezpośrednim odpowiednio przed zachodem i po wschodzie Słońca. Ze wzrostem pochylenia wydłuża się okres braku dostępu promieniowania bezpośredniego. Zmniejszeniu ulega, w porównaniu z okresem letnim, dzienna liczba godzin słonecznych (dla porównania w czerwcu wynosi 16, a we wrześniu 12 godzin). Znajomość rozkładu promieniowania bezpośredniego jest bardzo ważna, zwłaszcza gdy jego udział jest względnie wysoki rzędu 65%, tak jak ma to miejsce we wrześniu. Powierzchnie południowe i południowo - zachodnie, a następnie południowo - wschodnie są najlepiej nasłonecznione. Poziom napromieniowania nie jest tak wysoki jak latem, jednakże przy projektowaniu fasady budynku należy uwzględnić możliwość stosowania zacienienia powierzchni najbardziej wystawionych na oddziaływanie promieniowania słonecznego. Główną fasadę budynku wykorzystywanego tylko w porze przejściowej należałoby zwracać w stronę południowo - wschodnią. Natomiast dążąc do zwiększenia zysków słonecznych należy wykorzystywać powierzchnie południowe, o kącie pochylenia niższym o kilka stopni od lokalnej szerokości geograficznej.

Tabela 2.2. Średnie dzienne napromieniowanie H_c [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ dzień})$] powierzchni pionowych o charakterystycznej orientacji w czerwcu, grudniu i marcu

Orientacja	pd	pd-zach	zach	pn-zach	pn	pn-wsch	wsch	pd-wsch
miesiąc	H_c MJ/ (m^2 dzień)							
VI	10	10,5	11,5	8	7	7,5	10	10
XII	2	1,5	1	1	1	1	1	1,5
III	8	7,5	5,5	3	3	3	4,5	6,5

W odniesieniu do poszczególnych okresów dostępności promieniowania słonecznego przypisano im pewne wspólne zalecenia odnośnie pochylenia i zorientowania obudowy budynku. Są one następujące:

- dla okresu najlepszej dostępności promieniowania słonecznego – letniego:
 - stosowanie jak największych pochyłeń $\beta \rightarrow 90^0$, bezwzględnie należy unikać powierzchni poziomych i o małych kątach pochylenia;
 - główna fasada powinna być zorientowana w zakresie kątów azymutalnych: $-90^0 \leq \gamma \leq 0^0$; należy unikać orientacji w kierunku zachodnim, szczególnie w zakresie $+30^0 \leq \gamma \leq +90^0$, konieczne jest zacienianie (dla $0^0 \leq \gamma \leq +90^0$);
- dla okresu przejściowego o umiarkowanym poziomie napromieniowania:
 - główna fasada powinna być zwrócona w stronę południową ($\gamma \rightarrow 0^0$),
 - powierzchnie obudowy powinny być pochylone pod kątem $\beta \geq 40^0$, należy unikać stosowania powierzchni poziomych i o małych kątach pochylenia;
- dla okresu najgorszej dostępności promieniowania słonecznego - zimowego, ze względu na bardzo niski poziom napromieniowania:
 - preferowane jest stosowanie orientacji południowej, z możliwym nieznacznym odchyleniem na wschód i zachód, nie może występować zacienienie budynku;
 - należy stosować duże pochylenia powierzchni: $50^0 < \beta < + 70^0$; zalecane 60^0 .

Budynek może być projektowany pod kątem jego sezonowego wykorzystania, przy czym sezonowość jest zależna od okresu użytkowania danego obiektu budowlanego. Najczęściej sezon odpowiada okresowi pory ciepłej: wiosenno - letniej, która z reguły trwa od maja do końca września (5 miesięcy), co odpowiada okresowi funkcjonowania letnich ośrodków wypoczynkowych oraz wykorzystania letnich domów rekreacyjnych. Jednakże, dla niektórych obiektów sezonowość oznacza wykorzystanie przez 10 miesięcy w ciągu roku, wyłączając okres wakacyjny tj. okres najlepszej dostępności promieniowania słonecznego. Do takich budynków należą przede wszystkim szkoły i inne obiekty z nimi skojarzone.

Powyżej sformułowane zalecenia mogą być odniesione w sposób bezpośredni do obiektów wykorzystywanych sezonowo, do których należą wspomniane domy letniskowe i inne obiekty wypoczynkowe wykorzystywane w czasie lata. Ze względu na duże napromieniowanie budynki wykorzystywane okresowo w sezonie letnim nie mogą być wyposażone w standardowe rozwiązania pasywne ułatwiające pozyskiwanie energii promieniowania słonecznego, a wręcz odwrotnie muszą posiadać elementy ograniczające dostęp promieniowania. Główna fasada budynku nie powinna być zwrócona na południe i zachód, tj. w zakresie kątów azymutalnych od 0^0 do $+90^0$. Należy od tej strony budynek zacieniać, zarówno elementami samej struktury budynku (okapy, wykusze), jak i naturalnymi elementami otoczenia (zieleń). Fasada budynku powinna być zwrócona w stronę wschodnią, ewentualnie południowo – wschodnią, połacie dachu powinny być pochylone pod dużym kątem, w celu uniknięcia ich przegrzewania.

W przypadku budynków szkolnych, niewykorzystywanych pora letnią, główna fasada budynku powinna być zwrócona w stronę południową, połacie dachu powinny być pochylone pod kątem rzędu 50° . Elementy zacieniające obudowy budynku powinny być ograniczone do ich wykorzystania w czerwcu, ewentualnie w maju i wrześniu. Najlepsze warunki do odbioru energii promieniowania słonecznego (dla rozwiązań instalacyjnych) mają powierzchnie pochylone pod kątem od 30° do 40° , o kącie azymutalnym w zakresie od -45° do $+45^{\circ}$.

Opisane wcześniej sezonowe zalecenia pozwalają sformułować także podstawowe wskazania w kontekście dostępności promieniowania słonecznego do obudowy budynku w ciągu całego roku. Stosowanie płaszczyzn poziomych, np. dachów, czy przeszklonych poziomych powierzchni atrium, nie jest zalecane w budownictwie w warunkach krajowych. Powierzchnie poziome i o niewielkich kątach pochylenia są szczególnie mocno napromieniowywane w lecie, kiedy nie jest to pożądane, natomiast w niewielkim stopniu w okresie zimy. Połacie dachu powinny być pochylone w zakresie kątów od 40° do 60° , co w okresie zimy zwiększa dostępność energii promieniowania słonecznego, a w lecie ogranicza. Główna fasada budynku powinna być zwrócona na południe i od tej strony powinny znajdować się rozwiązania pasywne struktury budynku, przegrody pionowe lub pochylone pod kątem w zakresie od 45° do 60° . W lecie duże pochylenie powierzchni względem poziomu zmniejsza dostępność promieniowania słonecznego, w czerwcu nawet dwukrotnie w porównaniu z powierzchnią poziomą. Dla większych pochyleń, a szczególnie dla powierzchni pionowych, występuje charakterystyczne wyrównanie poziomu napromieniowania w ciągu dnia w cieplej porze roku, tj. od kwietnia do końca września.

Od września do końca marca południowa fasada budynku powinna być „otwarta na oddziaływanie promieniowania słonecznego”, poza tym okresem powinna być zacieniana. Powierzchnie pionowe zachodnie są bardziej narażone na przegrzewanie w okresie letnim niż powierzchnie południowe i powinny być szczególnie zacieniane poprzez elementy struktury budynku i otoczenia zewnętrznego. Dowolnie pochylona powierzchnia ukierunkowana w stronę zachodnią jest zdecydowanie lepiej napromieniowywana niż powierzchnia wschodnia o tym samym pochyleniu, podobnie płaszczyzna południowo - zachodnia w porównaniu z południowo - wschodnią.

Analiza zmian średniego rocznego napromieniowania powierzchni różnie pochylonych i różnie zorientowanych odnosi się praktycznie do helioaktywnych elementów struktury budynku, czyli do kolektorów słonecznych i modułów ogniw fotowoltaicznych. Zastosowanie aktywnych systemów słonecznych narzuca, w przypadku nowych budynków, konieczność odpowiedniego zaprojektowania połączenia dachu lub innych przegród budowlanych, na których elementy te będą usadowione. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy systemy aktywne stanowią tzw. elementy zintegrowane z obudową budynku, co jest coraz bardziej powszechne. Aktywne elementy budynku zaprojektowane do całorocznego pozyskiwania energii

promieniowania słonecznego, np. kolektory słoneczne, powinny mieć pochylenie i zorientowanie odpowiadające usytuowaniu powierzchni najbardziej napromieniowywanej w miesiącach wiosenno - letnich. W nowoprojektowanych budynkach istnieje dowolność w kształtowaniu bryły budynku i można ją tak zaprojektować, aby były spełnione wszystkie wymagania odnośnie odpowiedniego usytuowania poszczególnych powierzchni. Należy też zaznaczyć, że oprócz względów czysto energetycznych ważne są względy estetyczne i funkcjonalne, możliwa jest więc pewna dowolność. Ze względu na zyski energetyczne w skali roku wskazane jest umieszczanie elementów helioaktywnych w pozycji opisanej kątem pochylenia i kątem azymutalnym równymi odpowiednio $\beta=40^\circ$ i $\gamma=+15^\circ$. Natomiast w przypadku budynku wyposażonego zarówno w elementy helioaktywne, jak i heliopasywne, zalecenia odnośnie usytuowania poszczególnych powierzchni obudowy budynku muszą być swoistym kompromisem pomiędzy wskazaniem dla helioaktywnych i heliopasywnych rozwiązań, często sprzecznych ze sobą.

Jeżeli lokalizacja działki narzuca np. usytuowanie budynku z dłuższą ścianą zwróconą na wschód lub zachód, to główna fasada z elementami pasywnych systemów słonecznych powinna być od strony wschodniej (lepiej od południowo – wschodniej), natomiast elementy rozwiązań instalacyjnych, np. kolektory słoneczne, mogą być zlokalizowane na pochylonym dachu od strony zachodniej. Wskazania odnośnie kształtowania obudowy budynku o określonym zorientowaniu fasady głównej (wymuszonym np. lokalizacją budynku, czy działki), łącznie z najbardziej zalecanym zorientowaniem południowym, pod kątem odpowiedniego pochylania helioaktywnych i heliopasywnych elementów obudowy budynku, w zależności od okresu czasu, w jakim budynek jest wykorzystywany, zostały przedstawione w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Zalecenia odnośnie pochylania β elementów połąci dachu lub innych elementów obudowy budynku o określonej orientacji γ

Elementy Helioaktywne							
γ	wsch	pd-wsch	pd	pd-zach	zach	pn	okres użytkowania
β	10^0	40^0	40^0	40^0	10^0	10^0	cały rok
β	10^0	20^0	30^0	30^0	10^0	10^0	lato
β	10^0	40^0	45^0	45^0	10^0	10^0	szkoła
Elementy Helioapasywne							
γ	wsch	pd-wsch	pd	pd-zach	zach	pn	okres użytkowania
β	45^0	45^0-60^0	$90^0/45^0-60^0$	45^0-60^0	45^0	30^0	cały rok
β	$>60^0$	$>60^0$	$90^0/>60^0$	$>60^0$	$>60^0$	$>60^0$	lato
β	45^0	45^0-60^0	$90^0/45^0-60^0$	45^0-60^0	45^0	30^0	szkoła

Wyszczególnione w tabeli 2.3 wskazania odnośnie elementów helioaktywnych oznaczają wskazania, co do najlepszego pochylenia przy danej orientacji, pod kątem zwiększenia zysków z promieniowania słonecznego. W odniesieniu do elementów heliopasywnych zapis $>60^0$, występujący w przypadku budynku użytkowanego

latem, oznacza, że poza powierzchniami pionowymi fasady, powierzchnie dachu powinny być strome lub zwrócone w stronę północną.

Zgodnie z otrzymanymi wynikami najlepsze warunki nasłonecznienia w ciągu roku ma powierzchnia pochylona pod kątem 40° , następnie 45° i 30° , w zakresie kątów azymutalnych od -15° do $+45^{\circ}$. Zalecane zorientowanie powierzchni odpowiada kątowi $+15^{\circ}$. Powierzchnie pochylone pod kątem 40° i zorientowane w stronę południową z odchyleniem $+15^{\circ}$ odbierają rocznie około $4140 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{rok})$. Dające największe zyski w skali roku pochylenie powierzchni pod kątem 40° nieznacznie odbiega od pochyłeń zalecanych do stosowania uogólnioną formułą Duffiego i Beckmana [75], wg której zalecane pochylenie powierzchni pozyskujących promieniowanie słoneczne dla Warszawy jest w granicach od 42° do 62° .

Jak już wspomniano w punkcie 2.1 tego rozdziału norma krajowa [189] podaje sposób obliczania zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń z uwzględnieniem zysków z promieniowania słonecznego w kolejnych miesiącach sezonu grzewczego. Podane dane napromieniowania są uśrednionymi za okres dziesięciu lat sumami miesięcznymi promieniowania (bez poszczególnych składowych), dla wybranych regionów kraju. Dane te są zbyt ogólne dla analiz dostępności energii promieniowania słonecznego dla różnie usytuowanych powierzchni, ale jako jedyne dostępne i zalecane do stosowania w obliczeniach projektowych budynków zostały porównane z danymi napromieniowania otrzymanymi w wyniku przeprowadzonych obliczeń i opisanymi powyżej. Wyniki przeprowadzonej analizy porównawczej przedstawiono w Dodatku 2. Jednoznacznie stwierdzono, że zamieszczone w normie dane napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni są niewłaściwe i ich wykorzystanie do tworzenia koncepcji i projektowania budynków, szczególnie budynków niskoenergetycznych, może prowadzić do wielu błędów, a w konsekwencji do wzrostu energochłonności budynku, poprzez nieplanowany wzrost zapotrzebowania na energię do ogrzewania pomieszczeń w zimie i na klimatyzację w lecie.

3. Transmisja promieniowania słonecznego przez przezroczyste przegrody

3.1 Konwersja fototermiczna

Energia promieniowania słonecznego może podlegać w sposób naturalny samoczynnym procesom konwersji, lub też może być przetwarzana w odpowiednią postać energii użytkowej, zgodnie z planowym działaniem człowieka. W wyniku bezpośredniego oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek zachodzi konwersja fototermiczna polegająca na przemianie energii promieniowania słonecznego w ciepło. Podstawy zagadnień konwersji fototermicznej zostały sformułowane w latach 50-tych XX wieku [34] i stworzyły podwaliny pod rozwój nowej dyscypliny naukowej, jaką jest ciepła energetyka słoneczna.

W czasie konwersji fototermicznej energia promieniowania słonecznego jest przekazywana wskutek różnych procesów do ciała odbierającego ciepło. W heliopasywnych elementach obudowy budynku procesy te zachodzą w sposób naturalny zgodnie z zasadami fizyki budowli, pozyskiwanie i przepływ ciepła są samoczynne. W elementach helioaktywnych, tj. urządzeniach instalacji słonecznych, przepływ ciepła jest wymuszony działaniem urządzeń mechanicznych: pomp w systemach cieczowych lub wentylatorów w systemach powietrznych.

Jako fala elektromagnetyczna promieniowanie słoneczne podlega tym samym zjawiskom jak wszystkie fale elektromagnetyczne (odbiciu, załamaniu, pochłonięciu, polaryzacji, itd). Promieniowanie padając na dowolne ciało może być od niego odbite, pochłonięte w nim i/lub przepuszczone przez to ciało na zewnątrz. Udział każdego z tych procesów zależy od rodzaju ciała, własności jego powierzchni, drogi jaką przebywa promieniowanie w tym ciele, długości fali i kąta padania promieniowania.

Promieniowanie słoneczne docierając do dowolnego elementu obudowy budynku pada na jego przegrody zewnętrzne, które mogą być nieprzezroczyste (ściany) lub przezroczyste (okna) i oddzielają wnętrze budynku od oddziaływania otoczenia.

Promieniowanie słoneczne docierające do nieprzezroczystych ścian zewnętrznych ulega odbiciu od przegrody i pochłonięciu w jej warstwie zewnętrznej. Zjawisko absorpcji promieniowania polega na zamianie energii fal na inne rodzaje energii w wyniku oddziaływania z ośrodkiem lub ciałami, w których fala się rozchodzi lub które znajdują się na drodze rozchodzenia się fali. Przy rozważaniach dotyczących konwersji fototermicznej analizie poddawane są zjawiska, które prowadzą do zamiany energii promieniowania słonecznego na ciepło. W wyniku pochłonięcia promieniowania słonecznego w warstwie zewnętrznej przegrody wzrasta jej temperatura, część pozyskanego ciepła jest oddawana do otoczenia w postaci promieniowania cieplnego, część przenika przez przegrodę przede wszystkim wskutek przewodzenia.

W przypadku, gdy promieniowanie dociera do granicy ośrodków przezroczystych o różnej gęstości (np. powietrze – szkło) ulega załamaniu i odbiciu. Fala odbita rozchodzi się w tym samym ośrodku, co fala padająca, natomiast fala załamana w drugim ośrodku. Kierunki rozchodzenia się fal są opisane prawem odbicia i załamania. W zależności od właściwości optycznych ośrodka przezroczystego i jego absorpcyjności natężenie promieniowania ulega odpowiedniemu zmniejszeniu (osłabieniu). Strumień energii promieniowania słonecznego docierającego do granicy ośrodków przezroczystych ma trzy składowe: promieniowania odbitego, pochłoniętego i promieniowania przepuszczonego.

Istotny wpływ na transmisyjność promieniowania ośrodka przezroczystego, oprócz jego własności, ma kąt padania promieniowania, skład widmowy promieniowania, stan polaryzacji, a także stopień chropowatości powierzchni granicznych ośrodków przepuszczających promieniowanie [128], [206].

Promieniowanie słoneczne po przejściu przez przezroczystą przegrodę, tj. okno, dociera do ośrodka nieprzezroczystego, który stanowią wewnętrzne przegrody pomieszczenia i przedmioty w nim znajdujące się, ulega odbiciu i pochłonięciu. Energia promieniowania słonecznego, które zostało pochłonięte ulega zamianie na ciepło. Promieniowanie słoneczne, które zostało odbite może dotrzeć do innego ośrodka, gdzie zostanie pochłonięte i spowoduje jego ogrzanie się. Otrzymane ciepło w każdym z tych przypadków może być przekazywane dalej wskutek podstawowych mechanizmów wymiany ciepła tj. poprzez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie [71] - [73], [90], [94], [104], [107], [126], [129] - [130], [157], [216], [237] - [238].

Procesy odbicia, pochłaniania i przepuszczania promieniowania słonecznego przez ciała przezroczyste, które prowadzą do pozyskania ciepła, a następnie mechanizmy wymiany pozyskanego ciepła w ośrodku nieprzezroczystym lub pomiędzy ośrodkami, takie jak przewodzenie, konwekcja i promieniowanie ciepła, stale zachodzą w elementach obudowy budynku i ich otoczeniu zewnętrznym i wewnętrznym. Przy czym wszystkie z występujących zjawisk mogą mieć zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na konwersję i wykorzystanie energii promieniowania słonecznego. Mogą one bowiem wpływać zarówno na wielkość zysków jak i strat energii promieniowania słonecznego.

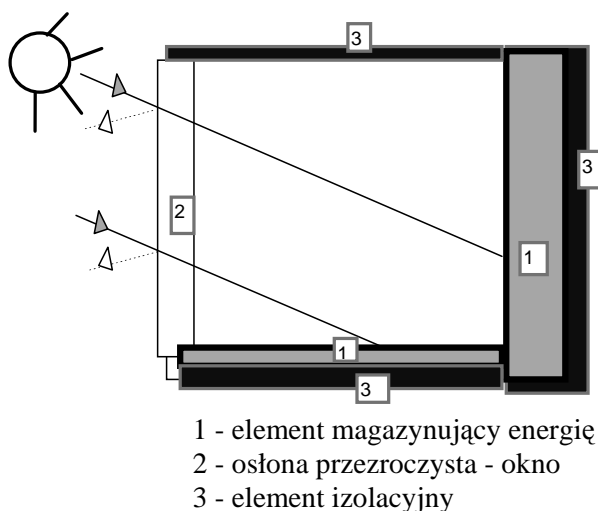
Energia promieniowania słonecznego dociera do wnętrza budynku w sposób bezpośredni przez przezroczyste elementy obudowy i w sposób pośredni przez przegrody nieprzezroczyste. Oddziaływanie pośrednie dotyczy zarówno standardowych ścian zewnętrznych jak i specjalnie zaprojektowanych elementów tworzących rozwiązania pasywne obudowy (ściany kolektorowe, magazynujące itp.). Zgodnie z obowiązującymi obecnie w budownictwie standardami ściany zewnętrzne powinny być wykonane z materiałów o dużej izolacyjności cieplnej, które gwarantują znaczne zmniejszenie oddziaływania środowiska zewnętrznego, a więc także i promieniowania słonecznego na komfort cieplny. Decydujące bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego dotyczy więc

przezroczystych elementów obudowy: okien i innych przeszklonych elementów obudowy budynku.

3.2 Bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego na budynek

W nomenklaturze słonecznych systemów pasywnych [20] występują m.in. tzw. systemy zysków bezpośrednich, wykorzystujące energię promieniowania słonecznego docierającego w sposób bezpośredni do pomieszczeń budynku. Okno jest właśnie najprostszym i powszechnie stosowanym elementem rozwiązań zysków bezpośrednich obudowy budynku, który został przedstawiony ideowo na rys. 3.1.

Jakiegokolwiek pomieszczenie zaopatrzone w okno tworzy system pasywny wykorzystujący w sposób bezpośredni energię promieniowania słonecznego. Promieniowanie słoneczne przechodzi przez okno stanowiące przezroczystą osłonę odbiornika energii promieniowania słonecznego, którym jest wnętrze pomieszczenia (budynek). Następnie promieniowanie jest pochłaniane i magazynowane przez przegrody wewnętrzne budynku, a także przedmioty znajdujące się w pomieszczeniu, przez krótszy lub dłuższy okres czasu w zależności od ich pojemności cieplnej. Przegrody wewnętrzne i inne obiekty wewnątrz pomieszczenia wskutek pochłonięcia energii promieniowania słonecznego stają się źródłem promieniowania cieplnego wpływając na komfort cieplny pomieszczenia.



Rys. 3.1. Idea wykorzystania systemu zysków bezpośrednich

Ilość energii dopływającej do wnętrza pomieszczenia zależy od wielkości okna, jego usytuowania, zastosowanych materiałów i konstrukcji okna, a także od jego zacienienia, związanego z otoczeniem zewnętrznym (np. drzewa, mur, inny budynek) i specjalnie zaprojektowanymi elementami architektury zewnętrznej (np.

okapy, zadaszenia). Regulacja (zmniejszenie) strumienia dopływającej energii promieniowania słonecznego dopływającego do wnętrza może być regulowana przez zasłanianie okien zasłonami, żaluzjami, roletami. Zwiększenie zysków promieniowania uzyskuje się przede wszystkim poprzez zwiększenie powierzchni okien i innych szklanych osłon (głównie od strony południowej). Jednakże, wzrost powierzchni okien powoduje także zwiększenie strat ciepłych. Chociaż system zysków bezpośrednich ma największą sprawność chwilową pozyskiwania energii, to niekontrolowany wzrost temperatury pomieszczenia może być niepożądany i uciążliwy dla mieszkańców.

Okna z jednej strony powinny być jak najbardziej przezroczyste zapewniając bardzo dobrą przepuszczalność dla promieniowania słonecznego, z drugiej strony zapewniać względnie dobrą izolacyjność. Podstawy fizyczne zjawisk związanych z przechodzeniem promieniowania słonecznego przez przezroczyste przegrody zostały opisane w kolejnym punkcie tego rozdziału. Przejście promieniowania słonecznego przez okno jako całość, czyli zespół elementów tworzących określoną konstrukcję i wykonanych z różnych materiałów jest zjawiskiem złożonym i wymaga szczegółowych rozważań. Własności optyczne i parametry cieplne okna zależą przede wszystkim od materiału zastosowanego na szyby okienne i ramę, a także od konstrukcji okna, w tym: ilości szyb, sposobu ich łączenia z ramą, materiału łączenia, sposobu osadzania okien itp.

Okna mogą mieć różną konstrukcję [115] - [118], [191] ([116] – polska wersja [191]). Podstawowymi elementami okna są oszklenie i rama okienna. W naszych warunkach klimatycznych okna mają najczęściej dwie szyby, pomiędzy którymi znajduje się przestrzeń powietrzna lub wypełnienie gazowe (np. argon, krypton). Okna zawsze wyposażone są w stałą ramę i zwykle w skrzydło ruchome. Pomiędzy szybami występuje rozpórka. Stosuje się różne materiały na ramy okienne (np. drewno, plastik, aluminium) i różne na rozpórki (np. drewno, aluminium, stal). Rama może mieć budowę jednorodną lub komorową. Okno może być tzw. oknem podwójnym (dwa niezależne oszklenia) lub zespolonym (co najmniej dwa oszklenia tworzące jedną całość). Przestrzeń powietrzna może być wentylowana lub nie, w przypadku okien zespolonych przestrzeń gazowa jest zawsze niewentylowana.

Badania i wdrożenia nowych technologii okiennych spowodowały, że wymiana ciepła przez oszklenia została znacznie ograniczona [7]. Obecnie uzyskuje się względnie niskie współczynniki przenikania ciepła przez tzw. centralną część oszklenia, przede wszystkim dzięki stosowaniu pokryć niskoemisyjnych i wypełnieniu wewnętrznej przestrzeni między oszkleniami gazem szlachetnym (o niskiej przewodności cieplnej). Natomiast punktem newralgicznym pozostaje obrzeże oszklenia kontaktujące się z ramą. Efekt cieplny istnienia rozpórek pomiędzy szybami, może być znaczny zwłaszcza jeśli są one metalowe. Wzajemne oddziaływanie ramy, oszklenia i rozpórki jest uwzględnione w sposób uproszczony m.in. w normie ISO 10077-1 [116] lub [191]. Załącznik E zawiera kilka wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła połączenia rama/szyba.

Do wyznaczenia charakterystyk cieplnych okien wykorzystuje się badania eksperymentalne i obliczenia symulacyjne. W 1989 roku opracowano w Laboratorium w Berkeley program komputerowy Window 3.1 opisujący w układzie jednowymiarowym zjawiska wymiany ciepła zachodzące w pionowym oszkleniu [7], [146]. Program ten był wykorzystywany do obliczania współczynnika przenikania ciepła przez okna [14]. W wyniku dalszych badań w Laboratorium w Berkeley na początku lat 90-tych stwierdzono, że wymiana ciepła przez część centralną oszklęcia ma rzeczywiście wyraźny charakter jednowymiarowy, natomiast wymiana ciepła przez obrzeże oszklęcia, w wyniku oddziaływania z ramą, ma charakter dwuwymiarowy. W konsekwencji do wspomnianego programu numerycznego dodano opis dwuwymiarowej wymiany ciepła na obrzeżu oszklęcia i w ramie (opracowano nową wersję programu *Windows 4*). Taki model wymiany ciepła stał się podstawą do opracowania zależności na współczynnik przenikania ciepła przez okno zalecanej do stosowania przez ASHRAE [12], a następnie przez właściwą normę ISO 15099 [115]. Współczynnik ten oblicza się z uwzględnieniem odpowiednich współczynników wagowych dla części centralnej oszklęcia, krawędzi oszklęcia i ramy.

Przegrody szklane i okna są podstawowym elementem architektury słonecznej, dlatego też na świecie prowadzi się bardzo intensywne badania dotyczące zarówno samych stosowanych materiałów, jak i konstrukcji okien, przezroczystych osłon, czy też całych przeszklonych fasad. W zakresie energetyki słonecznej wyodrębniła się dziedzina zwana „materiały słoneczne” (*solar materials*) związana z wykorzystaniem przezroczystych i nieprzezroczystych materiałów stosowanych w technologiach słonecznych. W literaturze można znaleźć szereg ciekawych rozważań związanych z wykorzystaniem okien i innych przeszklonych osłon w rozwiązaniach architektury słonecznej budynków. Do najciekawszych prac należą publikacje Granqvista [100], Hollandsa [106], [167], Eamesa [78], [83] i innych [61], [82], [85] - [88], [91], [97], [156], [203], [205], [212].

3.3. Zjawiska optyczne występujące przy przejściu promieniowania słonecznego przez przezroczystą przegrodę obudowy budynku

W tym punkcie rozdziału opisano podstawy zjawisk optycznych związanych z przejściem promieniowania słonecznego przez przezroczyste przegrody. Natomiast szczegółowy opis procesów przepływu energii przez okna został przedstawiony w rozdziale 4.3.

Określając własności optyczne ciała przezroczystego, jakim jest szyba okienna czy inna przezroczysta przegroda elewacji budynku, istotna jest jego transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność. Dwie ostatnie decydują o wielkości strat, czyli osłabieniu promieniowania w wyniku przejścia przez rozważane ciało. Ze względu na pozyskiwanie energii promieniowania słonecznego przezroczysta przegroda - okno powinna przepuszczać całkowicie promieniowanie słoneczne w całym zakresie

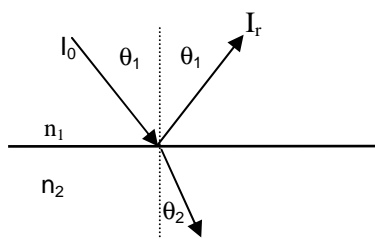
jego widma. Jednakże, w rzeczywistości transmisyjność przezroczystej przegrody zależy od kąta padania promieniowania, długości fali padającego promieniowania, własności materiału zastosowanego na przeszklenie i stanu jego powierzchni oraz grubości przeszklenia.

Największa przepuszczalność dla promieniowania występuje przy kątach padania równych zero (wzdłuż normalnej do powierzchni). Przy wzroście kąta padania transmisyjność maleje, natomiast wzrasta refleksyjność (absorpcyjność wzrasta nieznacznie). Przy kątach bliskich kątowi 90° praktycznie całe promieniowanie ulega odbiciu.

Promieniowanie słoneczne padające na przezroczyste przegrody obudowy budynków składa się ze składowej bezpośredniej, rozproszonej i odbitej. Składowa bezpośrednia i składowa okołosłoneczna promieniowania rozproszonego są ukierunkowane, natomiast promieniowanie rozproszone izotropowe i odbite padają w pełnym zakresie kątów od 0 do 90° (przy czym różnią się one od siebie własnościami kierunkowymi).

Promieniowanie słoneczne jest promieniowaniem niespolaryzowanym, jednakże dla potrzeb rozważań dotyczących jego przechodzenia przez ośrodki przezroczyste o różnej gęstości (powietrze - szkło), przyjmuje się [75], [110], że promieniowanie słoneczne jest sumą dwóch wiązek spolaryzowanych, składowej spolaryzowanej prostopadłe i składowej spolaryzowanej równoległe.

Fresnel sformułował prawo odbicia dla światła niespolaryzowanego padającego na gładką powierzchnię i przechodzącego z ośrodka 1 o współczynniku załamania n_1 do ośrodka 2 o współczynniku załamania n_2 . Wyprowadził on zależność na współczynniki odbicia r , rozważając osobno składową prostopadłą r_p i równoległą r_r . Ilustracja graficzna zjawisk zachodzących na granicy dwóch ośrodków jest przedstawiona na rys. 3.2.



Rys.3.2. Przejście wiązki światła niespolaryzowanego przez granicę dwóch ośrodków

Na granicę dwóch ośrodków pada promieniowanie I_0 pod kątem θ_1 i ulega ono odbiciu pod tym samym kątem (I_r - promieniowanie odbite) oraz załamaniu pod kątem θ_2 . Współczynnik odbicia r , będący stosunkiem promieniowania I_r odbitego

do promieniowania I_o padającego na dana powierzchnię, matematycznie opisuje równanie (3.1). Zależność ta przedstawia matematyczny zapis prawa Fresnela, wyrażający całkowity współczynnik odbicia r jako średnią arytmetyczną współczynników obu składowych r_p i r_r , pierwszy człon to składowa prostopadła, drugi składowa równoległa.

$$r = \frac{I_r}{I_o} = \frac{1}{2}(r_p + r_r) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\operatorname{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right) \quad (3.1)$$

Natomiast stosunek współczynników załamania dwóch ośrodków (ośrodka pierwszego do ośrodka drugiego) odpowiada stosunkowi sinusa kąta załamania do sinusa kąta padania (odbicia). Jest to równość Snelliusa, opisana równaniem (3.2).

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (3.2)$$

Jeżeli znane są kąty padania θ_1 oraz załamania θ_2 z równań (3.1) i (3.2) można wyznaczyć współczynnik odbicia pojedynczej powierzchni rozdziału ośrodków.

Jeśli promieniowanie pada na granicę dwóch ośrodków jako promieniowanie normalne, czyli wzdłuż normalnej do rozważanej powierzchni, wtedy obie składowe prostopadła i równoległa dają ten sam współczynnik odbicia, bowiem kąty padania i odbicia θ_1 oraz załamania θ_2 są równe 0. Równanie (3.1) upraszcza się do postaci:

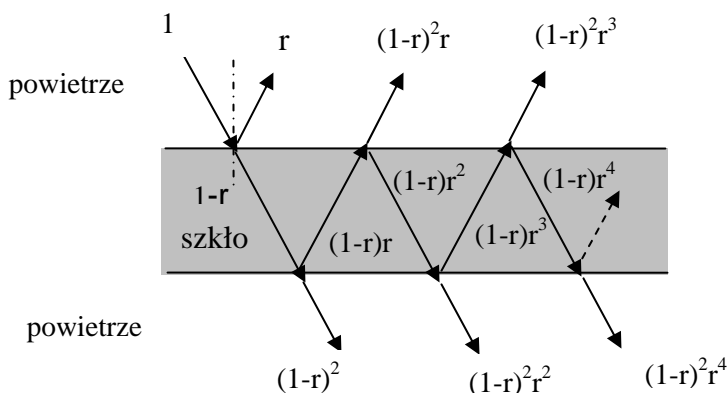
$$r(0) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3.3)$$

Jeśli jednym z ośrodków jest powietrze, wtedy współczynnik załamania n_2 jest bliski jedności i równanie (3.3) przyjmuje postać:

$$n_2 \rightarrow 1$$

$$r(0) = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 \quad (3.4)$$

W przypadku osłony szklanej elewacji budynku, jaką z reguły jest okno, rozważa się granicę rozdziału dwóch ośrodków, jakimi są powietrze i szkło. Poniżej opisano zjawisko przechodzenia promieniowania przez przezroczystą przegrodę. Po obu stronach przezroczystej przegrody znajduje się powietrze, osłabienie promieniowania z obydwu stron jest jednakowe. Sumując udziały promieniowania wielokrotnie odbijanego przez powierzchnie rozdziału ośrodków otrzymuje się całkowitą transmisyjność osłony.



Rys. 3.3. Zjawisko wielokrotnego odbicia w przezroczystej przegrodzie

Zjawisko przejścia promieniowania przez osłonę ilustruje w sposób ideowy rys. 3.3 (na tym jak i na kolejnych rysunkach w tym punkcie rozdziału w sposób uproszczony przedstawiono przechodzenie fali przez osrodek, nie zaznaczając różnicy pomiędzy kątem padania i załamania).

Zgodnie z rys. 3.3 na przezroczystą przegrodę pada promieniowanie, z czego do przezroczystej przegrody wchodzi $(1 - r)$ promieniowania padającego na jej zewnętrzną powierzchnię, r ulega odbiciu. Przez przeszklenie przechodzi na drugą stronę $(1 - r)^2$, natomiast $(1 - r)r$ odbija się z powrotem od dolnej powierzchni przegrody. Następnie od górnej powierzchni odbija się $(1 - r)r^2$, a $(1 - r)^2 r$ przechodzi przez tę powierzchnię na zewnątrz. Zjawisko odbicia i przejścia promieniowania przez powierzchnie szyby powtarza się. Matematycznie opisuje powyższe zjawisko wyrażenie na zdolność szyby do przepuszczania promieniowania i odbijania promieniowania, czyli wyrażenie na transmisyjność i refleksyjność rozważanej przezroczystej przegrody. Własności te w odniesieniu do składowej promieniowania spolaryzowanej prostopadle, czyli odpowiednio τ_p i ρ_p , wyrażone są za pomocą następujących nieskończonych sum:

$$\begin{aligned} \tau_p &= (1 - r_p)^2 + (1 - r_p)^2 r_p^2 + (1 - r_p)^2 r_p^4 + \dots = (1 - r_p)^2 (1 + r_p^2 + r_p^4 + \dots) = \\ &= (1 - r_p)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_p^{2n} \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\rho_p = r_p + (1 - r_p)^2 r_p + (1 - r_p)^2 r_p^3 + (1 - r_p)^2 r_p^5 + \dots = r_p + ((1 - r_p)^2 r_p) \sum_{n=0}^{\infty} r_p^{2n} \tag{3.6}$$

Ponieważ składniki sum w powyższych równaniach tworzą zbieżne postępy geometryczne można je odpowiednio zapisać jako:

$$\tau_p = \frac{(1-r_p)^2}{1-r_p^2} = \frac{1-r_p}{1+r_p} \quad (3.5')$$

$$\rho_p = r_p + \frac{((1-r_p)^2 r_p)}{1-r_p^2} \quad (3.6')$$

Analogicznie otrzymuje się zależności dla składowej spolaryzowanej równoległej i w odniesieniu do transmisyjności można zapisać:

$$\tau_r = (1-r_r)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_r^{2n} = (1-r_r)^2 (1+r_r^2+r_r^4+\dots) = \frac{(1-r_r)^2}{1-r_r^2} = \frac{1-r_r}{1+r_r} \quad (3.7)$$

Całkowita transmisyjność będąca w rozważanej sytuacji średnią arytmetyczną transmisyjności składowej prostopadłej (równanie (3.5')) i równoległej (równanie (3.7)) jest opisana zależnością:

$$\tau_c = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_p}{1+r_p} + \frac{1-r_r}{1+r_r} \right) \quad (3.8)$$

W przypadku występowaniu kilku osłon w liczbie n , które są równoległe i mają identyczne własności, ich całkowita transmisyjność może być opisana równaniem:

$$\tau_c = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_p}{1+(2n-1)r_p} + \frac{1-r_r}{1+(2n-1)r_r} \right) \quad (3.9)$$

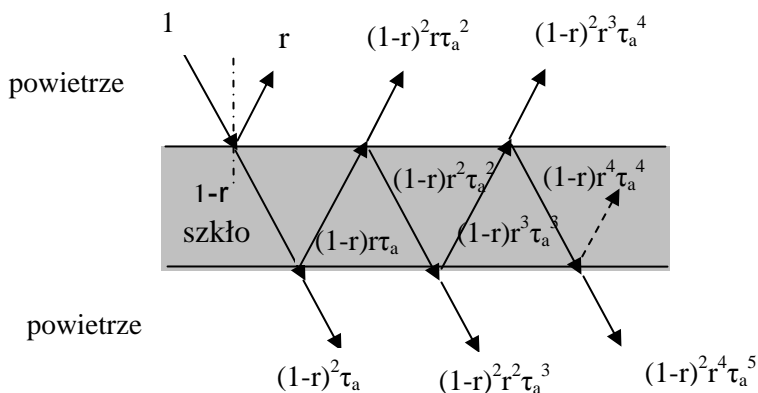
Powyższe rozważania dotyczą zdolności do przepuszczania promieniowania bez udziału pochłaniania w strukturze przegrody. Przy analizowaniu pochłaniania promieniowania w częściowo przezroczystym ośrodku przegrody wykorzystuje się prawo Bouguera (Bouguera - Lamberta - Beera). Określa się współczynnik transmisyjności τ_a , który wyraża stosunek ilości promieniowania I_{trans} przepuszczonego przez dany ośrodek, które uległo osłabieniu w wyniku procesów pochłaniania w tym ośrodku, do całkowitego promieniowania I_0 padającego na ten ośrodek, czyli:

$$\tau_a = \frac{I_{trans}}{I_0} = e^{(-KL)} \quad (3.10)$$

Występujący w powyższym równaniu współczynnik K ekstynkcji (wygaszenia) przyjmuje się jako stały dla całego widma promieniowania słonecznego. Natomiast L oznacza drogę, którą w wyniku załamania przebywa promieniowanie w przezroczystej przegrodzie. Droga ta jest dłuższa niż odległość pomiędzy granicami rozdziału dwóch ośrodków, czyli grubość przegrody δ , i wynosi:

$$L = \frac{\delta}{\cos(\theta_z)} \tag{3.11}$$

Transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność pojedynczej przezroczystej przegrody, biorąc pod uwagę straty odbicia i pochłaniania, są wyznaczane w podobny sposób, jak opisano to powyżej (równania (3.5)-(3.9)), uwzględniając zjawisko wielokrotnego odbicia promieniowania padającego na powierzchnię rozdziału dwóch ośrodków. Składową spolaryzowaną prostopadłe i równoległe rozpatruje się oddzielnie. Zjawiska zachodzące w przezroczystej przegrodzie (analogia do rys. 3.3) z uwzględnieniem pochłaniania promieniowania przedstawia rys. 3.4.



Rys. 3.4. Zjawisko wielokrotnego odbicia w przezroczystej przegrodzie z uwzględnieniem pochłaniania

Transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność przegrody dla składowej spolaryzowanej prostopadłe opisuje się za pomocą następujących nieskończonych sum:

$$\begin{aligned} \tau_p &= (1-r_p)^2 \tau_a + (1-r_p)^2 r_p^2 \tau_a^3 + (1-r_p)^2 r_p^4 \tau_a^5 + (1-r_p)^2 r_p^6 \tau_a^7 + \dots = \\ &= \left((1-r_p)^2 \tau_a \right) \sum_{n=0}^{\infty} (r_p^{2n} \tau_a^{2n}) \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned} \rho_p &= r_p + (1-r_p)^2 r_p \tau_a^2 + (1-r_p)^2 r_p^3 \tau_a^4 + (1-r_p)^2 r_p^5 \tau_a^6 + \\ &+ (1-r_p)^2 r_p^7 \tau_a^8 + \dots = r_p + \left((1-r_p)^2 r_p \tau_a^2 \right) \sum_{n=0}^{\infty} (r_p^{2n} \tau_a^{2n}) \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} \alpha_p &= (1-r_p)(1-\tau_a) + (1-r_p)(1-\tau_a)r_p\tau_a + (1-r_p)(1-\tau_a)r_p^2\tau_a^2 + \\ &+ (1-r_p)(1-\tau_a)r_p^3\tau_a^3 + (1-r_p)(1-\tau_a)r_p^4\tau_a^4 + \dots = \\ &= \left((1-r_p)(1-\tau_a) \right) \sum_{n=0}^{\infty} (r_p\tau_a)^n \end{aligned} \quad (3.14)$$

Składniki sum w równaniach (3.12) - (3.14) tworzą zbieżne postępy geometryczne, można je zapisać w postaci:

$$\tau_p = \frac{(1-r_p)^2\tau_a}{1-r_p^2\tau_a^2} \quad (3.15)$$

$$\rho_p = r_p + \frac{(1-r_p)^2r_p\tau_a^2}{1-r_p^2\tau_a^2} \quad (3.16)$$

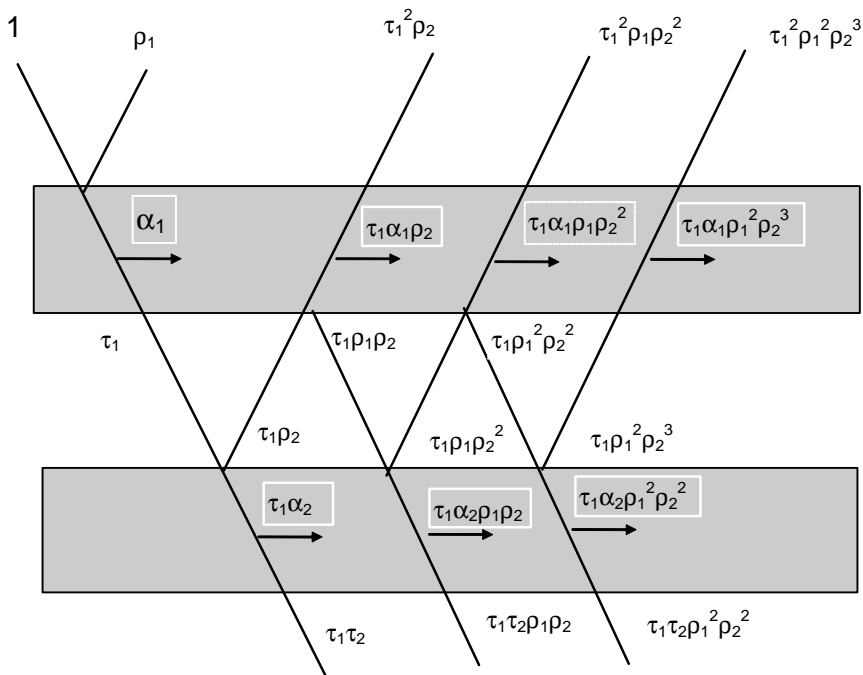
$$\alpha_p = \frac{(1-r_p)(1-\tau_a)}{1-r_p\tau_a} \quad (3.17)$$

Podobne zależności (jak powyżej) uzyskuje się dla składowej promieniowania spolaryzowanej równolegle, a następnie jako średnią arytmetyczną obu składowych, otrzymuje się transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność dla pojedynczej przezroczystej przegrody, na którą pada promieniowanie niespolaryzowane.

Analogicznie jak na rys. 3.4 można przeanalizować zjawisko przechodzenia promieniowania przez dwie przezroczyste osłony uwzględniając zjawisko wielokrotnego odbicia promieniowania na granicach rozdziału kolejnych ośrodków. W sposób ideowy zjawisko to ilustruje rys. 3.5. Dwie przezroczyste osłony mogą być wykonane z różnych materiałów, stanowiąc ośrodki o różnym współczynniku załamania, różnym współczynniku absorpcji, mogą też mieć inną grubość. Dlatego też transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność przezroczystych osłon wyznacza się najpierw oddzielnie dla każdej z osłon, korzystając odpowiednio z równań (3.5)-(3.7) dla składowej spolaryzowanej prostopadle i analogicznie dla składowej spolaryzowanej równolegle. Ostatecznie dla niespolaryzowanego promieniowania całkowitą transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność wyznacza się jako średnią arytmetyczną składowych spolaryzowanych prostopadle i równolegle.

Na rysunku 3.5 symbolami ρ_1 , τ_1 , α_1 oraz ρ_2 , τ_2 , α_2 oznaczono transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność dwóch kolejnych przezroczystych osłon. Korzystając z rys. 3.5 podobnie jak w przypadku pojedynczej osłony sformułowano zależności na transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność układu 2 osłon dla promieniowania spolaryzowanego prostopadle i równolegle, a także równania na transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność każdej z osłon oddzielnie, uwzględniając kolejność

ich ułożenia względem przechodzącego promieniowania i oddziaływanie jednej na drugą.



Rys. 3.5. Zjawisko wielokrotnego odbicia na granicy ośrodków: powietrza i dwóch przezroczystych przegród z uwzględnieniem pochłaniania

Transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność układu 2 osłon dla promieniowania spolaryzowanego prostopadle jest zapisana poniżej w postaci nieskończonych sum, które tworzą odpowiednie zbieżne postępy geometryczne:

$$\begin{aligned} \tau_p &= \tau_{p,1}\tau_{p,2} + \tau_{p,1}\tau_{p,2}\rho_{p,1}\rho_{p,2} + \tau_{p,1}\tau_{p,2}\rho_{p,1}^2\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}\tau_{p,2}\rho_{p,1}^3\rho_{p,2}^3 + \\ &+ \tau_{p,1}\tau_{p,2}\rho_{p,1}^4\rho_{p,2}^4 + \dots = (\tau_{p,1}\tau_{p,2})\sum_{n=0}^{\infty}(\rho_{p,1}\rho_{p,2}) = \frac{\tau_{p,1}\tau_{p,2}}{1-\rho_{p,1}\rho_{p,2}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \rho_p &= \rho_{p,1} + \tau_{p,1}^2\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}^2\rho_{p,1}\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}^2\rho_{p,1}^2\rho_{p,2}^3 + \tau_{p,1}^2\rho_{p,1}^3\rho_{p,2}^4 + \\ &+ \tau_{p,1}^2\rho_{p,1}^4\rho_{p,2}^5 + \dots = \rho_{p,1} + (\tau_{p,1}^2\rho_{p,2})\sum_{n=0}^{\infty}(\rho_{p,1}\rho_{p,2}) = \rho_{p,1} + \frac{\tau_{p,1}^2\rho_{p,2}}{1-\rho_{p,1}\rho_{p,2}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_p &= \alpha_{1,p} + \tau_{p,1}\alpha_{p,2} + \tau_{p,1}\alpha_{p,1}\rho_{p,2} + \tau_{p,1}\alpha_{p,2}\rho_{p,1}\rho_{p,2} + \\
 &+ \tau_{p,1}\alpha_{p,1}\rho_{p,1}\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}\alpha_{p,2}\rho_{p,1}^2\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}\alpha_{p,1}\rho_{p,1}^2\rho_{p,2}^3 + \\
 &+ \tau_{p,1}\alpha_{p,2}\rho_{p,1}^3\rho_{p,2}^3 + \tau_{p,1}\alpha_{p,1}\rho_{p,1}^3\rho_{p,2}^4 + \dots = \\
 &= \alpha_{1,p} + \tau_{p,1}(\alpha_{p,2} + \alpha_{p,1}\rho_{p,2}) + \tau_{p,1}(\alpha_{p,2} + \alpha_{p,1}\rho_{p,2})\rho_{p,1}\rho_{p,2} + \\
 &+ \tau_{p,1}(\alpha_{p,2} + \alpha_{p,1}\rho_{p,2})\rho_{p,1}^2\rho_{p,2}^2 + \tau_{p,1}(\alpha_{p,2} + \alpha_{p,1}\rho_{p,2})\rho_{p,1}^3\rho_{p,2}^3 + \dots = \\
 &= \alpha_{1,p} + \frac{\tau_{p,1}(\alpha_{p,2} + \alpha_{p,1}\rho_{p,2})}{1 - \rho_{p,1}\rho_{p,2}}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Analogicznie można wyznaczyć transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność dla trzech osłon:

$$\tau_p = \frac{\tau_{p,2}\tau_{p,3}}{1 - \rho_{p,2}\rho_{p,3}} \tag{3.21}$$

$$\rho_p = \rho_{p,2} + \frac{\tau_{p,2}^2\rho_{p,3}}{1 - \rho_{p,2}\rho_{p,3}} \tag{3.22}$$

$$\alpha_p = \alpha_{p,2} + \frac{\tau_{p,2}(\alpha_{p,3} + \alpha_{p,2}\rho_{p,3})}{1 - \rho_{p,2}\rho_{p,3}} \tag{3.23}$$

Dla układu n osłon dla składowej spolaryzowanej prostopadle otrzymuje się:

$$\tau_p = \frac{\tau_{p,n-1}\tau_{p,n}}{1 - \rho_{p,n-1}\rho_{p,n}} \tag{3.24}$$

$$\rho_p = \rho_{p,n-1} + \frac{\tau_{p,n-1}^2\rho_{p,n}}{1 - \rho_{p,n-1}\rho_{p,n}} \tag{3.25}$$

$$\alpha_p = \alpha_{p,n-1} + \frac{\tau_{p,n-1}(\alpha_{p,n} + \alpha_{p,n-1}\rho_{p,n})}{1 - \rho_{p,n-1}\rho_{p,n}} \tag{3.26}$$

Korzystając z równania (3.15), po odpowiednich przekształceniach transmisyjność przezroczystej osłony obudowy dla składowej spolaryzowanej prostopadle opisuje się za pomocą następującego równania:

$$\tau_p = \frac{(1-r_p)^2 \tau_a}{1-r_p^2 \tau_a^2} = \tau_a \left(\frac{1-r_p}{1+r_p} \right) \left(\frac{1-r_p^2}{1-r_p^2 \tau_a^2} \right) \quad (3.27)$$

Podobna zależność istnieje dla transmisyjności przegrody dla składowej promieniowania spolaryzowanej równoległe, czyli:

$$\tau_r = \frac{(1-r_r)^2 \tau_a}{1-r_r^2 \tau_a^2} = \tau_a \left(\frac{1-r_r}{1+r_r} \right) \left(\frac{1-r_r^2}{1-r_r^2 \tau_a^2} \right) \quad (3.28)$$

Powyższe równania (3.27) i (3.28) można uprościć, bowiem ostatni czynnik w praktyce jest bliski jedności [75]. W związku z tym w analizach uproszczonych łączna transmisyjność τ pojedynczej przezroczystej osłony może być wyrażona jako:

$$\tau = \tau_a \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1-r_p}{1+r_p} \right) + \left(\frac{1-r_r}{1+r_r} \right) \right) \quad (3.29)$$

Powyższe równanie przedstawia łączną transmisyjność τ pojedynczej przezroczystej osłony jako iloczyn transmisyjności τ_c uwzględniającej zjawisko wielokrotnego odbicia w osłonie (równanie (3.7)) i transmisyjności τ_a uwzględniającej zjawisko pochłaniania w przegrodzie (równanie (3.10)). Po wprowadzonych uproszczeniach rozważaną transmisyjność zapisuje się jako:

$$\tau = \tau_c \tau_a \quad (3.30)$$

Dla kilku równoległych i identycznych przeszkleń w liczbie n , łączna transmisyjność τ_n jest opisana równaniem:

$$\tau_n = \frac{1}{2} \left(\frac{1-r_p}{1+(2n-1)r_p} + \frac{1-r_r}{1+(2n-1)r_r} \right) e^{(-K\sigma/\cos(\theta_2))} \quad (3.31)$$

Równanie (3.29) jest często stosowane w analizach kolektorów słonecznych, które z reguły mają tylko jedną przezroczystą osłonę. Według Nortona [98] rozważane uproszczone zależności dają dużą dokładność przede wszystkim w zakresie kątów padania od 0 do 75°. Dalsze uproszczenia w analizach parametrów przezroczystych osłon proponują Duffie i Beckmann [75], według których absorpcyjność dla pojedynczej przegrody (dla składowej spolaryzowanej prostopadle opisana równaniem (3.17)), może być aproksymowana do następującej postaci:

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (3.32)$$

Refleksyjność dla pojedynczej przezroczystej przegrody, $\rho = 1 - \alpha - \tau_c$, może być z kolei (korzystając z równania (3.32)), przybliżona do postaci:

$$\rho \cong \tau_a - \tau_c = \tau_a (1 - \tau_p \tau_r) \tag{3.33}$$

W przypadku dwóch nieidentycznych przezroczystych przegród korzystając z równań (3.19) - (3.20) w odniesieniu do promieniowania niespolaryzowanego transmisyjność, refleksyjność i absorpcyjność opisują następujące przybliżone wzory:

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_p + \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_r \right] \cong \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \tag{3.34}$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\left(\rho_1 + \frac{\rho_2 \tau_1^2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_p + \left(\rho_1 + \frac{\rho_2 \tau_1^2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_r \right] \cong \left(\rho_1 + \frac{\rho_2 \tau_1^2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \tag{3.35}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\left(\alpha_1 + \frac{\tau_1 (\alpha_2 + \alpha_1 \rho_2)}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_p + \left(\alpha_1 + \frac{\tau_1 (\alpha_2 + \alpha_1 \rho_2)}{1 - \rho_1 \rho_2} \right)_r \right] \cong \left(\alpha_1 + \frac{\tau_1 (\alpha_2 + \alpha_1 \rho_2)}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \tag{3.36}$$

Indeksy 1 i 2 odnoszą się odpowiednio do pierwszej i drugiej osłony od strony padania promieniowania. Przy określaniu transmisyjności, refleksyjności i absorpcyjności podwójnej nieidentycznej osłony na podstawie równań (3.34) - (3.36), istotna jest kolejność osłon, tzn. przez którą z nich jako pierwszą przechodzi promieniowanie słoneczne.

Jeżeli obie osłony są identyczne wtedy równania (3.34)-(3.36) upraszczają się do następującej postaci:

$$\tau_c = \left(\frac{\tau^2}{(1 - \rho^2)} \right) \tag{3.37}$$

$$\rho_c = \left(\rho + \frac{\rho \tau^2}{1 - \rho^2} \right) \tag{3.38}$$

$$\alpha_c = \left(\alpha + \frac{\tau \alpha (1 + \rho)}{(1 - \rho^2)} \right) \tag{3.39}$$

Dzielnik w równaniu (3.37) jest z reguły bliski jedności, bowiem refleksyjność typowego szkła jest mała (np. około 0,04) i przy podniesieniu do kwadratu staje się pomijalnie mała. W obliczeniach szacunkowych przyjmuje się, że przy dwóch

identycznych standardowych osłonach szklanych (okno dwuszybowe, $l_{sz}=2$) transmisyjność jest równa:

$$\tau_c = \tau^2 \tag{3.40}$$

Przy trzech identycznych szybach ($l_{sz}=3$) otrzymamy w przybliżeniu $\tau_c = \tau^3$, czyli:

$$\text{dla } l_{sz}=n \quad \tau_c = \tau^n \tag{3.40'}$$

Uproszczona zależność (3.40'), stosowana jest często do większej liczby osłon i pozwala w miarę prosto oszacować osłabienie promieniowania w wyniku przejścia przez kolejne osłony. Można także oszacować absorpcyjność osłon wykorzystując zależność: $\alpha = 1 - \tau_c - \rho_c$.

W rozważaniach transmisji promieniowania słonecznego przez przezroczyste osłony istotna jest często absorpcyjność każdej z osłon osobno, niezbędna przy określeniu strumienia promieniowania słonecznego zaabsorbowanego w każdej z dwóch osłon. Korzystając z rys. 3.5 można m.in. sformułować równanie na absorpcyjność (dla promieniowania spolaryzowanego prostopadle i równoległe) każdej z osłon uwzględniając kolejność ich ułożenia względem przechodzącego promieniowania i oddziaływanie jednej osłony na drugą. Zgodnie z tym odpowiednio dla osłony pierwszej – zewnętrznej i drugiej – wewnętrznej otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \alpha_{p,z} &= \alpha_{1,p} + \tau_{p,1} \alpha_{p,1} \rho_{p,2} + \tau_{p,1} \alpha_{p,1} \rho_{p,2}^2 \rho_{p,1} + \tau_{p,1} \alpha_{p,1} \rho_{p,2}^3 \rho_{p,2}^2 + \dots \\ &= \alpha_{1,p} + \tau_{p,1} \alpha_{p,1} \rho_{p,2} \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_{p,2} \cdot \rho_{p,1}) = \alpha_{1,p} + \frac{\tau_{p,1} \alpha_{p,1} \rho_{p,2}}{1 - \rho_{p,1} \rho_{p,2}} \\ &= \alpha_{1,p} \left(1 + \frac{\tau_{p,1} \rho_{p,2}}{1 - \rho_{p,1} \rho_{p,2}} \right) \end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{p,w} &= \tau_{p,1} \alpha_{p,2} + \tau_{p,1} \alpha_{p,2} \rho_{p,1} \rho_{p,2} + \tau_{p,1} \alpha_{p,2} \rho_{p,1}^2 \rho_{p,2}^2 + \dots \\ &= \tau_{p,1} \alpha_{p,2} \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_{p,1} \cdot \rho_{p,2}) = \frac{\tau_{p,1} \alpha_{p,2}}{1 - \rho_{p,1} \rho_{p,2}} = \alpha_{2,p} \frac{\tau_{p,1}}{1 - \rho_{p,1} \rho_{p,2}} \end{aligned} \tag{3.42}$$

Zależności dla składowej promieniowania spolaryzowanej równoległe i prostopadle są takie same, a absorpcyjność dla każdej z przezroczystych przegród, na którą pada promieniowanie niespolaryzowane wyznacza się jako średnią arytmetyczną obu składowych. Jeżeli obie szyby są identyczne, ich odpowiednie parametry optyczne są takie same, czyli:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha; \quad \tau_1 = \tau_2 = \tau; \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho$$

Absorpcyjność szyby zewnętrznej i wewnętrznej wynosi wtedy odpowiednio:

$$\alpha_z = \alpha \left(1 + \frac{\tau \cdot \rho}{1 - \rho^2} \right) \quad (3.43)$$

$$\alpha_w = \alpha \left(\frac{\tau}{1 - \rho^2} \right) \quad (3.44)$$

Zamieszczone powyżej rozważania dotyczyły promieniowania bezpośredniego i promieniowania rozproszonego okołosłonecznego. Do dowolnej przezroczystej przegrody stanowiącej obudowę budynku dociera także promieniowanie izotropowe rozproszone przez atmosferę i promieniowanie odbite od otoczenia (przy powierzchniach pochyłonych). W przybliżeniu ilość promieniowania przepuszczanego przez przezroczystą osłonę może być wyznaczana poprzez scałkowanie tego promieniowania względem pełnego zakresu kątów padania. Jednakże z reguły szczegółowy rozkład kątowy promieniowania dyfuzyjnego nie jest znany i nie są dostępne własności spektralne osłon. W przypadku modelu izotropowego promieniowania dyfuzyjnego stosuje się więc metodę uproszczoną określania transmisyjności przegrody. Przyjmuje się, że rozważania są prowadzone w odniesieniu do zastępczego kąta padania promieniowania bezpośredniego, który w przybliżeniu wynosi 60° [34]. Oznacza to, że przepuszczalność dowolnej osłony przezroczystej dla promieniowania dyfuzyjnego docierającego z wszystkich kierunków w sposób równomierny (izotropowy) odpowiada transmisyjności (refleksyjności, absorpcyjności) dla promieniowania bezpośredniego padającego pod kątem 60° na rozważaną osłonę. W literaturze [34], [75] można znaleźć zależności (wg Brandemuehla i Beckmana) na zastępczy kąt padania promieniowania na płaszczyznę pochyłą, dla którego wyznacza się transmisyjność dla promieniowania rozproszonego izotropowego i odbitego. Podobnie do tego samego zastępczego kąta padania promieniowania można odnosić promieniowanie rozproszone jaśniejszego horyzontu.

Przegrody przezroczyste - szklane są przepuszczalne dla długości fal odpowiadających promieniowaniu słonecznemu w około 90%, a z reguły nieprzezroczyste dla fal długich, czyli dla promieniowania ciepłego. Jednakże szkło pochłania promieniowanie długofalowe i promieniowanie słoneczne. W wyniku czego wzrasta jego temperatura, a w konsekwencji wymiana ciepła z otoczeniem. Zjawiska przepływu energii przez przezroczystą przegrodę zostały opisane w punkcie 4.3.

3.4 Absorpcja promieniowania słonecznego w pomieszczeniu

Promieniowanie słoneczne po przejściu przez przezroczystą osłonę, jaką jest okno, dociera do nieprzezroczystych przegród wewnętrznych pomieszczenia i przedmiotów w nim znajdujących się, gdzie ulega pochłonięciu i odbiciu. Część

promieniowania ulegając wielokrotnemu odbiciu może „wydostać się” z powrotem na zewnątrz przez przezroczystą osłonę. Znaczna część ulega pochłonięciu w elementach wewnętrznych pomieszczenia i staje się źródłem promieniowania ciepłego. Udział promieniowania słonecznego, które jest pochłaniane w elementach pomieszczenia, w całkowitym promieniowaniu słonecznym docierającym do wnętrza zależy od absorpcyjności poszczególnych powierzchni wewnętrznych elementów ich pola powierzchni i pola powierzchni przeszklenia, przez które promieniowanie dociera do wnętrza. Dufnie i Beckmann [75] przy określaniu udziału promieniowania pochłoniętego w pomieszczeniu w stosunku do promieniowania padającego na przeszklenie o transmisyjności τ_c zalecają wprowadzenie i stosowanie w obliczeniach absorpcyjności α_{eff} efektywnej (zastępczej), wykorzystywanej zgodnie z następującą zależnością:

$$\tau_c \alpha_{eff} = \tau_c \frac{\alpha_i}{\alpha_i + (1 - \alpha_i) \tau_d \frac{A_a}{A_i}} \quad (3.45)$$

przy czym poszczególne symbole oznaczają:

α_i – absorpcyjność dla promieniowania słonecznego dyfuzyjnego izotropowego;

τ_d – transmisyjność przeszklenia dla promieniowania słonecznego dyfuzyjnego izotropowego (liczona dla kąta padania promieniowania bezpośredniego równego 60°), które odbija się od wewnętrznych powierzchni pomieszczenia;

A_i – pole powierzchni wewnętrznych przegród [m^2];

A_a – pole powierzchni przeszklenia [m^2].

Jeżeli powierzchnie wewnętrzne mają różną absorpcyjność, wtedy wartość α_i jest uwzględniana jako odpowiednio uśredniona wartość.

4 Równania bilansu energetycznego pomieszczenia uwzględniające promieniowanie słoneczne

4.1 Ogólne sformułowanie bilansu energetycznego budynku

Rozwiązania pasywne w budownictwie wykorzystują strukturę budynku jako odbiornik - kolektor, magazyn i dystrybutor energii promieniowania słonecznego. Jednakże, jeżeli nawet budynek nie jest wyposażony w helioaktywne i heliopasywne elementy obudowy, to znajdując się w środowisku atmosferycznym ulega oddziaływaniu promieniowania słonecznego, w mniejszym lub większym stopniu w zależności od tego jak został zaprojektowany i wykonany. W budynkach niskoenergetycznych powinno stosować się rozwiązania architektoniczno – budowlane zwiększające o odpowiedniej porze roku zyski z promieniowania słonecznego (odpowiednie pochylenie i zorientowanie powierzchni odbierających promieniowanie słoneczne, stosowanie elementów o dużym współczynniku odbicia), a także chroniące przed zbytnim przegrzaniem pomieszczeń w czasie, kiedy jest to wymagane ze względu na warunki pogodowe, co jest szczególnie ważne dla okien [101], [132], [171], [192], [205], [231]. Można również stosować okresowo w ciągu dnia, czy w różnych porach roku takie elementy jak zasłony, żaluzje, okiennice, które wpływają na bilans cieplny pomieszczenia (budynku) w danym czasie i w odpowiedni sposób mogą być w tym bilansie uwzględniane [20], [25], [32], [115] - [118].

W literaturze [9], [26] - [27], [77], [185] - [186] można znaleźć różne podejście do opisu stanu termicznego budynku. W rozprawie wprowadzono pewne nowe elementy opisu energetycznego budynku. Analizie został poddany standardowy budynek, w którym nie stosuje się zaawansowanych technologicznie rozwiązań energooszczędnych i systemów pozyskiwania energii odnawialnej. Rozważany budynek nie jest wyposażony w aktywne i pasywne systemy słoneczne, ale oczywiście w sposób naturalny jest wystawiony na działanie promieniowania słonecznego. Podstawą do przeprowadzania rozważań jest opracowanie modelu matematycznego przepływu energii i procesów cieplnych zachodzących w modelowym pomieszczeniu budynku, jego obudowie i otoczeniu. Następnie rozwiązanie sformułowanego zagadnienia przy wykorzystaniu symulacji komputerowej i zastosowanie tej symulacji do wybranych przykładów pomieszczeń budynku w celu udokumentowania konieczności uwzględniania promieniowania słonecznego przy formułowaniu bilansu energetycznego budynku, przy tworzeniu jego koncepcji i projektowaniu.

Bilans energetyczny dowolnego pomieszczenia budynku można zapisać w postaci ogólnej uwzględniając dopływające i odpływające z niego strumienie ciepła oraz wewnętrzne źródła ciepła w chwili czasu t w następujący sposób:

$$Vc_p\rho\frac{dT_w}{dt} = \sum \dot{Q}_{dopr}(t) - \sum \dot{Q}_{odpr}(t) - \sum \dot{Q}_{wen}(t) + \sum \dot{Q}_{qv}(t) \quad (4.1)$$

przy czym poszczególne symbole oznaczają:

$\Sigma \dot{Q}_{dopr}$ suma strumieni energii doprowadzonej do wnętrza pomieszczenia [W]

$\Sigma \dot{Q}_{odpr}$ suma strumieni ciepła odprowadzonych z wnętrza pomieszczenia [W]

$\Sigma \dot{Q}_{wen}$ Zapotrzebowanie na moc grzewczą do celów wentylacyjnych [W]

$\Sigma \dot{Q}_{qv}$ suma strumieni wewnętrznych źródeł ciepła w pomieszczeniu [W]

V objętość pomieszczenia [m^3]

T_w temperatura wewnętrzna pomieszczenia [K]

Suma strumieni wewnętrznych źródeł ciepła w danym pomieszczeniu pochodzi od takich źródeł ciepła jak urządzenia energetyczne, źródła światła i ludzie. (Obecność jednego człowieka w danym pomieszczeniu odpowiada istnieniu źródła ciepła o mocy 100 W). Zyski cieplne dawane przez urządzenia energetyczne w niektórych przypadkach mogą być znaczne i w sposób istotny mogą wpływać na bilans cieplny pomieszczenia (np. w serwerowniach). Jednakże celem niniejszej rozprawy jest przede wszystkim określenie oddziaływania promieniowania słonecznego na budynek, dlatego też przyjęto, że wewnętrzne źródła ciepła w budynku nie występują, czyli:

$$\sum \dot{Q}_{qv}(t) = 0 \quad (4.2)$$

W celu rozwiązania równania bilansowego (4.1) przyjęto także inne założenia upraszczające. Podstawowym jest założenie, że wszystkie pomieszczenia w budynku mają taką samą temperaturę T_w , stałą w czasie i przestrzeni. Oznacza to, że poszczególne pomieszczenia nie oddziałują na siebie pod względem cieplnym, w budynku nie występuje zjawisko akumulacji ciepła w ścianach wewnętrznych. W dowolnym miejscu dowolnego pomieszczenia i w dowolnym czasie nie występują zmiany temperatury T_w , czyli lewa strona równania bilansowego (4.1) jest równa 0, czyli:

$$V c_p \rho \frac{dT_w}{dt} = 0 \quad (4.3)$$

Strumień energii $\Sigma \dot{Q}_{dopr}$ doprowadzany do danego pomieszczenia mogą tworzyć:

- zyski $\Sigma \dot{Q}_s$ z promieniowania słonecznego docierającego bezpośrednio do danego pomieszczenia przez przezroczystą obudowę budynku (okna) (jeśli takie występują);
- strumień ciepła $\Sigma \dot{Q}_{ob}$ przenikający przez obudowę budynku: nieprzezroczystą i przezroczystą, do wnętrza (przy odpowiednich warunkach otoczenia i stanie przegród);
- strumień ciepła $\Sigma \dot{Q}_h$ dostarczany przez urządzenia grzewcze (gdy występuje zapotrzebowanie na ciepło).

Poszczególne strumienie energii doprowadzanej do budynku mogą nie występować. Zyski z promieniowania słonecznego występują tylko w odpowiednich warunkach (opisanych w dalszej części szczegółowo).

Strumień ciepła przenikający przez obudowę budynku przy niskich temperaturach otoczenia zewnętrznego może odbywać na zewnątrz stanowiąc straty ciepła z obudowy do otoczenia zewnętrznego, czyli $\sum \dot{Q}_{ob} < 0$. Należy zaznaczyć, że przegrody budowlane, którymi są ściany zewnętrzne i okna, charakteryzują się różną zdolnością do akumulacji ciepła (pojemność cieplna przegród nieprzezroczystych jest znacznie większa od przezroczystych). W związku z tym w zależności od warunków panujących w otoczeniu przegród i w nich samych, przepływ ciepła przez przegrody przezroczyste i nieprzezroczyste obudowy budynku może odbywać się w przeciwnych kierunkach, tj. w danej chwili czasu (t) ciepło przez przegrody nieprzezroczyste może być doprowadzane a przez przegrody przezroczyste odprowadzane z pomieszczenia. Przepływ ciepła przez przegrody zewnętrzne obudowy budynku rozważono oddzielnie dla przegród przezroczystych i nieprzezroczystych

Może zaistnieć sytuacja, kiedy nie jest wymagane dostarczanie ciepła przez urządzenia grzewcze, bowiem przepływ energii z zewnątrz do wewnątrz, jest tak duży, że zachodzi konieczność klimatyzacji pomieszczenia, wtedy $-\sum \dot{Q}_h = \sum \dot{Q}_c$, czyli ciepło jest odprowadzane z pomieszczenia.

Bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego na wnętrze budynku ma miejsce tylko przez przegrody przezroczyste. Oddziaływanie pośrednie promieniowania słonecznego występuje dla całej obudowy, przy czym przy bardzo dobrej izolacyjności przegród nieprzezroczystych decydujące są zyski z promieniowania słonecznego przechodzącego przez przegrody przezroczyste. Jednakże, ze względu na tematykę rozprawy, zyski z promieniowania słonecznego uwzględniono zarówno w odniesieniu do przegród przezroczystych, jak i nieprzezroczystych, przy czym zagadnienie pozyskiwania promieniowania słonecznego przez przegrody przezroczyste rozważono w sposób szczegółowy.

W równaniu (4.1) bilansu energetycznego pomieszczenia występuje zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych. Zapotrzebowanie to, odnoszone do jednego pomieszczenia, jest wyznaczone w funkcji uśrednionego normowego wydatku objętościowego V_{wen} powietrza wentylacyjnego wymienianego w pomieszczeniu, który zależy od objętości danego pomieszczenia V i wymaganej liczby a wymian powietrza [99], [145]. Zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych wynosi:

$$\sum \dot{Q}_{wen}(t) = V_{wen} \cdot \rho \cdot c_p (T_w(t) - T_a(t)) \quad (4.4)$$

Jeżeli uwzględnimy istnienie systemu rekuperacji ciepła z układów wentylacyjnych, o określonej η efektywności oraz stałość temperatury T_w w czasie i przestrzeni, równanie (4.4) można zapisać jako:

$$\sum \dot{Q}_{wen,r}(t) = (1-\eta) \cdot \sum \dot{Q}_{wen}(t) = (1-\eta) \cdot V_{wen} \cdot \rho \cdot c_p (T_w - T_a(t)) \quad (4.4')$$

Przyjęcie założenia o stałej temperaturze wewnętrznej pomieszczeń oznacza utrzymywanie stałych w czasie warunków temperaturowych w dowolnym pomieszczeniu dzięki takiemu sterowaniu funkcjonowaniem instalacji grzewczo/klimatyzacyjnej, aby dostarczane przez nią ciepło/chłód pokrywały straty/zyski ciepła związane z wymianą ciepła przez nieprzezroczyste i przezroczyste przegrody budowlane, zyski wynikające z bezpośredniego oddziaływania promieniowania słonecznego (jeśli występują) i zapotrzebowanie na ciepło/chłód do celów wentylacyjnych. Równanie bilansowe (4.1) wobec przyjętych założeń, w tym założeń opisanych równaniem (4.2) i (4.3) przybiera następującą ogólną postać:

$$\sum \dot{Q}_{h/c}(t) = \sum \dot{Q}_{j,ściany}(t) + \sum \dot{Q}_{i,okna}(t) + \dot{Q}_{wen}(t) - \sum \dot{Q}_s(t) \quad (4.5)$$

Procesy transportu energii przez zewnętrzne przegrody budowlane, nieprzezroczyste - ściany zewnętrzne i przezroczyste – okna, i inne przeszklone elementy elewacji odgrywają istotną rolę w bilansie energetycznym budynku. Straty lub zyski ciepła przez przegrody nieprzezroczyste są wynikiem procesów wymiany ciepła zachodzących przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie, co zostało opisane w sposób szczegółowy w kolejnych punktach tego rozdziału. W przypadku przegród przezroczystych na zyski i straty ciepła oprócz procesów wymiany ciepła mają też wpływ zjawiska optyczne: odbicia, pochłaniania i przepuszczania (transmitancji) promieniowania słonecznego opisane w rozdziale 3.

4.2 Zagadnienie wymiany ciepła przez nieprzezroczyste elementy obudowy budynku

4.2.1 Ogólne sformułowanie zagadnienia nieustalonego przewodzenie ciepła w przegrodzie

W niniejszym punkcie rozdziału sformułowano w sposób ogólny zagadnienie wymiany ciepła przez nieprzezroczyste elementy obudowy z uwzględnieniem oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek. Rozważano procesy wymiany ciepła w stanie nieustalonym.

Pole temperatury w nieprzezroczystej przegrodzie obudowy zewnętrznej budynku wyznaczono przyjmując następujące założenia. Pominięto efekty wilgotnościowe w przegrodzie. Przegroda jest ciałem stałym jedno lub kilkuwarstwowym, a każda warstwa (przegrody) jest jednorodna i izotropowa, w związku z tym przewodność cieplna danej warstwy przegrody jest stała w tej warstwie. W rozważaniach przegrodę odniesiono do nieskończonej długiej płyty o grubości δ , bez wewnętrznych źródeł ciepła (poza zewnętrznym granicznym elementarnym obszarem, co opisano w dalszej części). Pole temperatury w układzie

jednowymiarowym w stanie nieustalonym, w przegrodzie jednowarstwowej, a w przypadku przegrody wielowarstwowej w każdej jej warstwie, opisuje równanie przewodnictwa o postaci:

$$\frac{\partial T_{pi}(x,t)}{\partial t} = a_{pi} \frac{\partial^2 T_{pi}(x,t)}{\partial x_{pi}^2} \quad (4.6)$$

gdzie a_{pi} jest dyfuzyjnością cieplną i-tej warstwy przegrody ($a_{pi} = \lambda_{pi} / \rho_{pi} c_{pi}$)

Równanie (4.6) można również zapisać w odniesieniu do pojemności cieplnej $Mc_p = V \rho c_p [J/K]$ i wtedy:

$$\frac{1}{V} (Mc_{pi}) \frac{\partial T_{pi}(x,t)}{\partial t} = \lambda_{pi} \frac{\partial^2 T_{pi}(x,t)}{\partial x_{pi}^2} \quad (4.6')$$

Równanie (4.6) lub (4.6') może być rozwiązane, jeśli znany jest warunek początkowy i warunki wymiany ciepła na powierzchniach granicznych i-tej warstwy przegrody. Założony stan początkowy i sformułowane warunki brzegowe na granicy obszaru opisano poniżej.

Zewnętrzna przegroda budowlana kontaktuje się od wewnątrz z pomieszczeniem (budynku) o stałej w czasie i przestrzeni temperaturze T_w , i od zewnątrz z bezpośrednim otoczeniem atmosferycznym o temperaturze $T_a(t)$ zmiennej w czasie. Na budynek oddziałują także dalsze otoczenie – nieboskłon o temperaturze $T_{nieb}(t)$ (tzw. pozornej temperaturze nieboskłonu), która jest funkcją temperatury otoczenia atmosferycznego. Istnienie i oddziaływanie nieboskłonu zostało uwzględnione w modelu matematycznym zjawisk zachodzących w czasie w otoczeniu budynku. Natomiast w chwili początkowej $t_0=0$ przyjęto, że rozkład temperatury w przegrodzie przebiega tak, jak by była ona jednowarstwowa i zależna tylko od temperatur bezpośredniego otoczenia.

Temperatura powierzchni przegrody od strony wewnętrznej odpowiada temperaturze T_w powietrza w pomieszczeniu, a temperatura przegrody od strony zewnętrznej odpowiada temperaturze $T_a(t)$ powietrza atmosferycznego. Rozkład temperatury $T_{0p}(x_p)$ w przegrodzie w chwili początkowej opisano więc funkcją liniową o postaci:

$$T_{0p}(x_p) = f_{0p}(x_p) = \frac{T_a(t_0) - T_w}{\delta_p} x_p - T_w \quad (4.7)$$

Wymiana ciepła na brzegach obszaru przegrody opisana jest warunkiem granicznym, który dla powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej przegrody przyjmuje odpowiednio postać:

$$-\lambda_p \left. \frac{\partial T_p}{\partial x_p} \right|_w = h_w [T_p(t)|_w - T_w] \quad (4.8)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x_p} \Big|_z = h_z [T_a(t) - T_p(t) \Big|_z] \quad (4.9)$$

Należy zaznaczyć, że początkowy rozkład temperatury w przegrodzie, opisany równaniem (4.7) nie zapewnia co prawda ciągłości temperatury w połączeniu z warunkiem brzegowym opisanym równaniem (4.8) lub (4.9), ale jego wpływ zanika wobec zastosowanej cykliczności obliczeń obejmujących 10 dni, przy tych samych dobowych warunkach otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego.

W przypadku przegrody wielowarstwowej poza warunkami granicznymi na powierzchniach zewnętrznych przegrody należy sformułować warunki brzegowe dla powierzchni wewnętrznych na granicy obszaru oddzielającej kolejne warstwy przegrody. Zgodnie z przyjętymi założeniami o izotropowości i jednorodności każdej z warstw. Przy wymianie ciepła przez przewodzenie, warunek brzegowy opisuje równość temperatury powierzchni na granicy warstw i równość strumienia ciepła wymienianego na granicy obszaru warstw i jest szczególnym warunkiem brzegowym o postaci:

$$\begin{aligned} T_{p,w-1}(t) \Big|_{x_{gr}} &= T_{p,w}(t) \Big|_{x_{gr}} \\ -\lambda_{p,w-1} \frac{\partial T_{p,w-1}}{\partial x_{gr}} \Big|_{x_{gr}} &= -\lambda_{p,w} \frac{\partial T_{p,w}}{\partial x_{gr}} \Big|_{x_{gr}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Indeks w odnosi się do danej warstwy, a indeks $w-1$ do warstwy leżącej przed warstwą w .

Do rozwiązania przedstawionego powyżej zagadnienia brzegowego dla każdej warstwy dla równania różniczkowego parabolicznego o postaci (4.6) (lub (4.6')) i odpowiednich warunków brzegowych opisanych równaniami: (4.9) dla pierwszej warstwy od zewnątrz i (4.10) od wewnątrz przegrody; (4.10) dla drugiej warstwy z obu stron (wewnątrz przegrody); (4.10) dla trzeciej ostatniej warstwy wewnątrz przegrody i (4.8) od wewnątrz pomieszczenia; zastosowano metodę bilansów elementarnych.

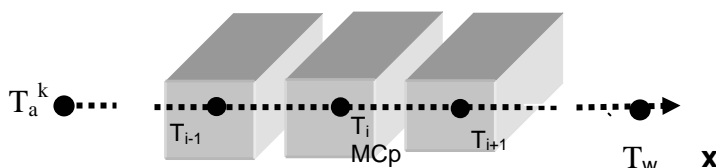
Oddziaływanie promieniowania słonecznego na powierzchnię zewnętrzną przegrody nieprzezroczystej uwzględniono w następujący sposób. Wyznaczono natężenie promieniowania słonecznego $G_s(t, \beta, \gamma)$ docierającego w danym czasie do powierzchni zewnętrznej przegrody o określonym usytuowaniu, opisanym przez kąt pochylenia β i kąt azymutalny γ , na podstawie równania (1.42) (które jest zapisane w odniesieniu do napromieniowania godzinowego). Promieniowanie słoneczne jest pochłaniane przez przegrodę o określonej absorpcyjności $\alpha_{s,ściany}$ i o powierzchni zewnętrznej A_s elementarnej objętości. Pochłonięty strumień energii jest traktowany jako wewnętrzne źródło ciepła o mocy $\dot{Q}_{s,vw,1}$ w zewnętrznej granicznej elementarnej objętości ściany o powierzchni zewnętrznej A_s , co można zapisać jako:

$$\dot{Q}_{s\text{vw},1}(t) = G_s(t, \beta, \gamma) \cdot \alpha_{s,\text{siany}} A_s \quad (4.11)$$

Sposób wyznaczania współczynników wymiany ciepła na powierzchniach granicznych został opisany w dalszej części. Należy zaznaczyć, że przy określaniu wymiany ciepła od strony otoczenia zewnętrznego wskutek promieniowania cieplnego uwzględnia się wymianę ciepła z bezpośrednim otoczeniem i dalszym otoczeniem reprezentowanym przez nieboskłon.

4.2.2 Szczegółowe sformułowanie i rozwiązanie zagadnienia procesu wymiany ciepła w nieprzezroczystej przegrodzie

W niniejszym punkcie rozdziału w sposób szczegółowy opisano sformułowany model matematyczny zjawisk zachodzących w przegrodzie nieprzezroczystej i jego rozwiązanie przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych [66], [166], [186], [195], [219]. Przegrodę dzieli się na warstwy prostopadłe do zasadniczego kierunku przepływu ciepła. Węzły temperaturowe umieszcza się pośrodku każdej warstwy. Wartość temperatury przegrody $T_p(i, t_{k+1})$ w węźle i pola temperatury na jednym poziomie czasowym t_{k+1} otrzymuje się na podstawie wartości temperatury w węzłach $T_p(i-1, t_k)$ $T_p(i, t_k)$ $T_p(i+1, t_k)$ w poprzedniej płaszczyźnie (przestrzeni) czasowej, tj. t_j . Krok czasowy $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ i krok Δx wzdłuż współrzędnej x przyjęto jako stałe. Przyjęte elementarne objętości kontrolne wokół każdego węzła stworzonej siatki przestrzennej dla analizowanego układu jednowymiarowego przedstawiono ideowo na rys. 4.1. Następnie wprowadzono równania bilansów elementarnych dla rozważanych objętości kontrolnych.



Rys. 4.1. Siatka przestrzenna nieprzezroczystej przegrody w układzie jednowymiarowym

Przy określaniu warunków granicznych przyjęto, że istnieją dwa węzły reprezentujące otoczenie zewnętrzne i wewnętrzne opisane poprzez temperaturę tych ośrodków, którym nie przypisuje się pojemności cieplnej. Temperatura w pierwszym węźle $T(i, t_k) = T(1, t_k)$ odpowiada temperaturze powietrza zewnętrznego (atmosferycznego) $T_a(t_k)$, czyli:

$$T_i^k \Big|_{i=1} = T_a^k \quad (4.12)$$

Natomiast temperatura w ostatnim N węźle $T(i, t_k) = T(N)$ odpowiada temperaturze powietrza T_w w pomieszczeniu, czyli:

$$T_i^k \Big|_{i=N} = T_w \quad (4.13)$$

W celu określenia stanu początkowego procesów związanych z wymianą ciepła przez nieprzezroczystą przegrodę obudowy budynku przyjęto, że w chwili początkowej t_0 rozkład temperatury $T_0(x)$ w przegrodzie w chwili początkowej (niezależnie od liczby warstw) ma postać zgodną z równaniem (4.7).

W układzie jednowymiarowym w danej płaszczyźnie czasowej węzeł i ma tylko dwa sąsiednie węzły $i-1$ i $i+1$ (rys. 4.1). Do rozważanej elementarnej objętości kontrolnej wokół węzła i w czasie j dopływają następujące jednostkowe strumienie ciepła:

$$\dot{q}_{x,in} = U_{i-1}^k (T_{i-1}^k - T_i^k) \quad (4.14)$$

$$\dot{q}_{x,out} = U_i^k (T_i^k - T_{i+1}^k) \quad (4.14')$$

Współczynniki U_{i-1}^k i U_i^k [W/m²K] opisujące proces wymiany ciepła, są odwrotnością oporów cieplnych. We wnętrzu przegrody opisują one proces przewodzenia ciepła i są zwane współczynnikami konduktancji cieplnej. Zgodnie z przyjętymi założeniami o stałości w czasie i w przestrzeni (dla danej warstwy przegrody) przewodności cieplnej λ_p , oraz uwzględniając stałą odległość pomiędzy poszczególnymi węzłami rozważanej jednowymiarowej siatki ($L_{i-1} = L_i = L_{i+1} = \Delta x$), współczynniki dla wszystkich węzłów w danej (np. pierwszej) warstwie przegrody, poza współczynnikami dla węzłów w zewnętrznych objętościach granicznych, odpowiadają:

$$U_{p1,i-1} = U_{p1,i} = \frac{\lambda_1}{L_{i-1}} = \frac{\lambda_1}{L_i} = \frac{\lambda_1}{L_{i+1}} = \frac{\lambda_1}{\Delta x} = U_{p1} \quad (4.15)$$

Jeżeli przegroda jest n - warstwowa wtedy każda kolejna warstwa ma inną przewodność cieplną λ_p , ale stałą w czasie i w przestrzeni danej warstwy, a w konsekwencji współczynniki U (krok Δx jest stały dla całej przegrody) dla n - tej warstwy zapisać, jako:

$$U_{pn,i-1} = U_{pn,i} = \frac{\lambda_n}{L_{i-1}} = \frac{\lambda_n}{L_i} = \frac{\lambda_n}{L_{i+1}} = \frac{\lambda_n}{\Delta x} = U_{pn} \quad (4.15')$$

Korzystając z równań (4.14) i (4.14') i (4.15) (4.15') sumę strumieni ciepła dopływających i odpływających przez powierzchnię jednostkową A_x (przyjęto, że $A_x = \Delta x^2$) z dowolnego węzła i we wnętrzu warstwy przegrody w czasie t^k można zapisać jako:

$$\sum \dot{Q}_i(t) = A_x (\dot{q}_{x,in}^k - \dot{q}_{x,out}^k) = \Delta x^2 \left(\frac{\lambda}{\Delta x} (T_{i-1}^k - T_i^k - T_i^k + T_{i+1}^k) \right) = \quad (4.16)$$

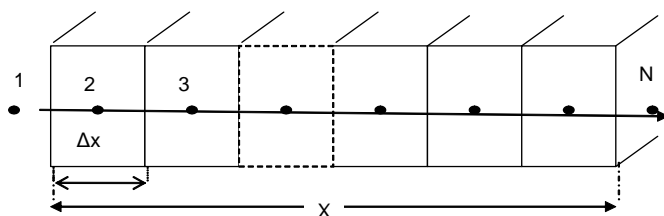
$$= \Delta x \lambda (T_{i-1}^k + T_{i+1}^k - 2T_i^k)$$

Mając określoną sumę strumieni ciepła dopływających i odpływających z dowolnego węzła i danej warstwy przegrody (równanie (4.16)) w jej wnętrzu (bez wewnętrznych źródeł ciepła) oraz uwzględniając przyrost energii wewnętrznej rozważanej elementarnej objętości wywołany zmianą jej temperatury, bilans cieplny w układzie jednowymiarowym opisany równaniem (4.6') przyjmuje postać:

$$\lambda \Delta x (T_{i-1}^k + T_{i+1}^k - 2T_i^k) = \frac{M c_p (T_i^{k+1} - T_i^k)}{\Delta t} \quad (4.17)$$

Tak zapisany bilans cieplny odnosi się do dowolnego węzła siatki znajdującego się w elementarnej objętości we wnętrzu warstwy przegrody. (Każda warstwa ma inne własności cieplne opisane jej przewodnością cieplną, gęstością i ciepłem właściwym). Dla zewnętrznych węzłów granicznych objętości elementarnych postać bilansu energii jest bardziej skomplikowana, ponieważ poza wymianą ciepła przez przewodzenie występują także inne zjawiska. Układ równań zapisany dla wszystkich węzłów siatki w rozważanej przegrodzie pozwala na wyznaczenie pola temperatury w przegrodzie.

W układzie jednowymiarowym przegrodę o grubości X , charakteryzującą się określoną stałą przewodnością cieplną λ [W/(mK)] w każdej warstwie, można podzielić na skończoną liczbę $N-2$ elementów – węzłów siatki przestrzennej (tu jednowymiarowej), każdy w odległości od siebie o $\Delta x = X/(N-2)$ [m]. Węzeł $i=1$ i $i=N$ stanowią węzły zewnętrzny i wewnętrzny, i znajdują się w odległości $\Delta x/2$ odpowiednio od powierzchni zewnętrznej przegrody i powierzchni wewnętrznej. Położenie poszczególnych elementów, odpowiadających węzłom jednowymiarowej siatki przedstawia rys. 4.2.



Rys. 4.2. Ideowe umiejscowienie węzłów jednowymiarowej siatki

Każdemu węzłowi we wnętrzu przegrody od $i=2$ do $i=N-1$ przyporządkowuje się pojemność cieplną $M c_{pi}$ [J/K] danej objętości elementarnej, w której znajduje się dany węzeł. Przy czym węzłowi $i=2$ przypisuje się dodatkowo istnienie

wewnętrznego źródła ciepła o mocy $\dot{Q}_{s,vw,1}$ [W] reprezentującego zyski z promieniowania słonecznego (pochląpanie promieniowania słonecznego w zewnętrznej granicznej objętości elementarnej), opisane równaniem (4.11) i wewnętrznego źródła ciepła o mocy $\dot{Q}_{s,vw,2}$ [W] reprezentujące zyski lub straty wynikające z wymiany ciepła przez promieniowanie z dalszym otoczeniem - nieboskłonem.

Mechanizm wymiany ciepła opisuje zapisany w sposób ogólny współczynnik U [W/(m²K)] (liczba współczynników U jest o 1 mniejsza od liczby węzłów, którym jest przypisana określona temperatura). Jak już wspomniano, w przypadku elementów we wnętrzu przegrody mamy do czynienia z przewodzeniem ciepła pomiędzy węzłami siatki $1 < i < N$, stąd współczynniki U pomiędzy kolejnymi węzłami odpowiadają współczynnikom konduktancji cieplnej, które opisano równaniem (4.15) lub (4.15'). Przy n - warstwach przegrody, dla każdej kolejnej warstwy w jej wnętrzu zachodzi równość współczynników:

$$U_{p1}=U_{p1,2}=U_{p1,3}=\dots=U_{p1,i}=\dots=U_{p1,N-2}=\lambda_{p1}/\Delta x \quad \text{dla pierwszej warstwy: } 1_{p1} < i < N_{p1}-1$$

$$U_{pn,1}=\dots=U_{pn,i}=\dots=U_{pn,N-2}=\lambda_{pn}/\Delta x \quad \text{dla n-tej warstwy: } 1_{pn} < i < N_{pn}-1$$

Na granicy obszaru pomiędzy poszczególnymi warstwami przegrody, np. warstwą pierwszą i warstwą drugą, wymianę ciepła opisuje warunek brzegowy wyrażony równaniem (4.10), w którym graniczny współczynnik wymiany ciepła jest opisany następującym równaniem:

$$U_{gr}|_{1-2} = \frac{1}{\left(\frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)}{\lambda_2}\right)} = \frac{2\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\Delta x(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (4.18)$$

Węzły 1 i N są węzłami temperaturowymi otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego, co opisano równaniem (4.12 i (4.13). W granicznych objętościach elementarnych wokół węzła 2 i $N-1$ (rys. 4.2) w odległości $\Delta x/2$ od zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni przegrody, wymiana ciepła jest związana z przewodzeniem ciepła w przegrodzie (na długości $\Delta x/2$) i przejmowaniem ciepła pomiędzy przegrodą i otoczeniem. Współczynniki proporcjonalności U [W/(m²K)] opisujące wymianę ciepła pomiędzy węzłem zewnętrznym $i=1$ i pierwszym węzłem wewnątrz przegrody $i=2$, oraz pomiędzy węzłem w pomieszczeniu $i=N$ i ostatnim węzłem wewnątrz przegrody $i=N-1$ wynoszą odpowiednio:

$$U_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{zew}}\right) + \left(\frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)}{\lambda_1}\right)} \quad (4.19)$$

$$U_{N-1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{wew}}\right) + \left(\frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)}{\lambda_n}\right)} \quad (4.20)$$

Założono, że w węzłach 1 i N pojemność cieplna jest równa zero $Mc_p = 0$. Współczynniki h_{zew} , h_{wew} przejmowania ciepła pomiędzy przegrodą i otoczeniem wskutek konwekcji i promieniowania są opisane w punkcie 4.4 tego rozdziału. Należy zaznaczyć, że współczynnik U_i opisuje (poza przewodzeniem) wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie tylko z bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym o temperaturze $T_a(t)$. Wymiana ciepła przez promieniowanie z dalszym otoczeniem - nieboskłonem została uwzględniona poprzez wprowadzenie wewnętrznego źródła ciepła w rozważanej granicznej objętości wokół węzła $i=2$ (co opisano w dalszej części tego punktu).

Korzystając z równań (4.14) – (4.17) i z rys. 4.1, stosując ogólną postać współczynników U , bilans cieplny dla dowolnego węzła (x_i) w we wnętrzu przegrody można zapisać w następujący sposób:

$$\text{dla } 3 \leq i \leq N-1 \quad (4.21)$$

$$\left[U_{i-1} (T_{p,i-1}^k - T_{p,i}^k) \Delta x^2 - U_i (T_{p,i}^k - T_{p,i+1}^k) \Delta x^2 \right] = \frac{Mc_{pi} (T_{p,i}^{k+1} - T_{p,i}^k)}{\Delta t}$$

Jeżeli objętość elementarna z węzłem i w jej środku należy do jednej warstwy przegrody, natomiast węzeł $i+1$ znajduje się w drugiej warstwie przegrody, to bilans cieplny dla węzła granicznego i_{gr} pierwszej warstwy można zapisać jako:

$$\left[U_{i-1} (T_{p,i-1}^k - T_{p,i}^k) \Delta x^2 - U_{gr|_{1-2}} (T_{p,i}^k - T_{p,i+1}^k) \Delta x^2 \right] = \frac{Mc_{pi} (T_{p,i}^{k+1} - T_{p,i}^k)}{\Delta t} \quad (4.21')$$

Korzystając z równania (4.21) temperaturę przegrody $T_{p,i}^{k+1}$ w węźle $i > 2$ i $i < N$ po czasie dt (czyli w czasie t_{k+1}) można zapisać jako:

$$T_{p,i}^{k+1} = T_{p,i}^k + \frac{\Delta t \Delta x^2}{Mc_{p,i}} \left[U_{i-1} (T_{p,i-1}^k - T_{p,i}^k) - U_i (T_{p,i}^k - T_{p,i+1}^k) \right] \quad (4.22)$$

i dla powyższych węzłów przegrody jednowarstwowej równanie upraszcza się:

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{\Delta t \Delta x \lambda}{Mc_{p,i}} (T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k) \quad (4.22')$$

Natomiast dla węzłów granicznych wewnętrznych, przy granicy warstw przegrody, należy uwzględnić odpowiednie współczynniki proporcjonalności i korzystając z równania (4.21') i równania (4.18) temperaturę przegrody $T_{p,i}^{k+1}$ w węźle ostatnim pierwszej warstwy można zapisać jako:

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{\Delta t \Delta x \lambda_1}{Mc_{p,i}} \left[(T_{i-1}^k - T_i^k) - \frac{2\lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2)} (T_i^k - T_{i+1}^k) \right] \quad (4.22'')$$

Natomiast bilans ciepła dla węzła $i=N-1$ ostatniego węzła rozważanej siatki we wnętrzu przegrody, można zapisać korzystając z równania (4.21) jako:

$$\begin{aligned} & [U_{N-2} (T_{p,N-2}^k - T_{p,N-1}^k) \Delta x^2 - U_{N-1} (T_{p,N-1}^k - T_{p,N}^k) \Delta x^2] = \\ & = \frac{Mc_{p,i} (T_{p,N-1}^{k+1} - T_{p,N-1}^k)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Wstawiając do równania (4.23) odpowiednie współczynniki U z równania (4.15) i (4.20) po przekształceniach otrzymuje się temperaturę $T_{p,N-1}^{k+1}$ w węźle $i=N-1$ po czasie Δt (czyli w czasie t_{k+1}):

$$T_{N-1}^{k+1} = T_{N-1}^k + \frac{\Delta t \Delta x^2}{Mc_{p,N-1}} \left[\frac{\lambda}{\Delta x} (T_{N-2}^k - T_{N-1}^k) + \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{h_{wew}^k} \right) + \left(\frac{\Delta x}{2\lambda} \right)} \right) (T_w - T_{N-1}^k) \right] \quad (4.24)$$

Bilans cieplny dla węzła $i=2$ jest bardziej skomplikowany. W pierwszym elemencie rozważanej elementarnej objętości kontrolnej przegrody, o powierzchni zewnętrznej A_x , uwzględnia się wpływ promieniowania słonecznego w postaci istnienia wewnętrznego źródła ciepła (równanie (4.11)). Jednocześnie, jako drugie wewnętrzne źródło przyjęto ciepło wynikające z wymiany ciepła przez promieniowanie cieplne pomiędzy rozważaną przegrodą a nieboskłonem. Powierzchnia zewnętrzna przegrody nieprzezroczystej „widzi” zarówno bezpośrednie otoczenie o temperaturze $T_a(t)$, jak i dalsze otoczenie, tj. nieboskłon o pozornej temperaturze $T_{nieb}(t)$ (niższej od temperatury bezpośredniego otoczenia). Współczynnik widoku nieboskłonowi odpowiada współczynnikowi korekcji promieniowania dyfuzyjnego R_d , który opisuje równanie (1.29). Wymianę ciepła przez promieniowanie z nieboskłonem, uwzględnia się w modelu obliczeniowym poprzez istnienie wewnętrznego źródła ciepła o mocy opisanej równaniem:

$$\dot{Q}_{vw,2}^k = \dot{Q}_{nieb}^k = \varepsilon_r \sigma \left((T_{nieb}^k)^4 - (T_2^k)^4 \right) R_d A_x \quad (4.25)$$

Wprowadzając sumaryczną moc $\Sigma \dot{Q}_{vw}^k$ [W] wewnętrznych źródeł ciepła odpowiadającą pozyskiwanej w czasie energii słonecznej (równanie (4.11)) i pozyskiwanej lub traconej w czasie energii wynikającej z wymiany ciepła z nieboskłonem (równanie (4.25)) otrzymuje się:

$$\Sigma \dot{Q}_{vw}^k = \left(G_s^k \alpha_{s,sciany} + \varepsilon_r \sigma \left((T_{nieb}^k)^4 - (T_2^k)^4 \right) R_d \right) \Delta x^2 \quad (4.26)$$

Uwzględniając wewnętrzne źródła ciepła opisane równaniem (4.26), bilans energii będzie miał dla rozważanej elementarnej granicznej objętości następującą postać:

$$\left[U_1^k (T_a^k - T_2^k) \Delta x^2 - U_2 (T_2^k - T_3^k) \Delta x^2 \right] + \Sigma \dot{Q}_{vw}^k = \frac{Mc_p (T_2^{k+1} - T_2^k)}{\Delta t} \quad (4.27)$$

Korzystając z równań (4.15), (4.19), (4.26) i przekształcając równanie (4.27) można wyznaczyć temperaturę przegrody w węźle $i=2$ w następujący sposób:

$$T_2^{k+1} = T_2^k + \frac{\Delta t \Delta x^2}{Mc_p} \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{h_{zew}^k} \right) + \left(\frac{\Delta x}{2\lambda} \right)} (T_a^k - T_2^k) - \frac{\lambda}{\Delta x} (T_2^k - T_3^k) + \left(G_s^k \alpha_{s,sciany} + \varepsilon_r \sigma \left((T_{nieb}^k)^4 - (T_2^k)^4 \right) R_d \right) \right] \quad (4.28)$$

Dla bilansu cieplnego rozważanego pomieszczenia istotna jest gęstość strumienia ciepła \dot{q}_{in} przekazywanego do danego pomieszczenia w danym czasie, którą wyznacza się z zależności:

$$\dot{q}_{in}^k = U_{N-1}^k (T_{N-1}^k - T_N^k) = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{zew}^k} \right) + \left(\frac{\Delta x}{2\lambda} \right)} (T_{N-1}^k - T_w) \quad (4.29)$$

Założenia i model obliczeniowy nieustalonej wymiany ciepła w układzie jednowymiarowym przez przegrodę nieprzezroczystą służą do wyznaczenia strumienia ciepła dopływającego do wnętrza pomieszczenia w danym czasie, będącego jednym z elementów bilansu cieplnego budynku. Wyznaczona z równania (4.29) gęstość strumienia ciepła dopływającego do wnętrza pomieszczenia w danym czasie jest elementem (składową) bilansu energetycznego budynku i jest uwzględniana w równaniu bilansowym (4.5) danego modelowego pomieszczenia. Odnosi się ona do jednostkowego pola powierzchni, a więc wstawiając ją do równania bilansowego (4.5) należy ją pomnożyć przez pole powierzchni danej nieprzezroczystej przegrody kontaktującej się z otoczeniem wewnętrznym.

4.3 Zagadnienie transportu energii przez okno

4.3.1 Rozważania ogólne

Oddziaływanie promieniowania słonecznego na obudowę budynku jest szczególnie istotne dla przegród przezroczystych, czyli okien i innych przeszklonych elementów elewacji budynku, jeśli takie występują. Dlatego też ważne jest odpowiednie sformułowanie modelu matematycznego zjawisk fizycznych zachodzących podczas pozyskiwania promieniowania słonecznego i wymiany ciepła przez przezroczyste elementy obudowy budynku. Przedmiotem rozważań w pracy nie są różne typy okien i ich konstrukcja. Dlatego też do analizy przyjęto model uproszczony okna, składający się z ramy i podwójnego oszklenia.

W celu sformułowania zagadnień transportu energii przez okna wprowadzono pewne założenia. Przyjęto, że rozważania dotyczą jednego okna rozważanego modelowego pomieszczenia, znajdującego się w zmieniających się warunkach otoczenia.

Uwzględnienie w bilansie cieplnym budynku zysków z promieniowania słonecznego oznacza rozważanie na określonym poziomie szczegółowości zjawisk związanych z przepływem energii przez przezroczystą przegrodę - okno. Przepływ energii przez okno jest spowodowany dwoma podstawowymi zjawiskami: oddziaływaniem promieniowania słonecznego o natężeniu G_s , zmiennym w czasie i zależnym od usytuowania (opisanego kątami β i γ) napromieniowywanej powierzchni oraz różnicą temperatur $T_w - T_a(t)$ pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem zewnętrznym atmosferycznym, zmienną w czasie.

Pierwsze zjawisko dotyczy procesu przejścia dostępnego promieniowania słonecznego - krótkofalowego przez przezroczystą przegrodę do wnętrza pomieszczenia. Zjawiska optyczne związane z przechodzeniem promieniowania słonecznego przez ośrodek przezroczysty zostały opisane w rozdziale 3.3. Natomiast zjawiska, związane z istniejącą różnicą temperatur pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem zewnętrznym dotyczą takich procesów wymiany ciepła jak: promieniowanie (cieplne), przewodzenie i konwekcja, zostały opisane w kolejnych punktach rozdziału.

Procesy wymiany ciepła zachodzące pomiędzy szybami w szczelinie gazowej, w standardowym oknie z reguły co najmniej w 60% są związane z wymianą ciepła przez promieniowanie i w około 40% skutek konwekcji swobodnej [98]. W celu ograniczenia wymiany ciepła przez promieniowanie stosuje się niskoemisyjne pokrycia szyb od strony szczeliny gazowej. Natomiast w celu zmniejszenia konwekcyjnego przepływu ciepła, poza stosowaniem odpowiedniej odległości między szybami, zaleca się wypełnienie przestrzeni międzyszybowej odpowiednim gazem lub, co jest najbardziej wskazane, stosowanie próżni. W wymianie ciepła od strony pomieszczenia (od wewnątrz) udział zjawisk promieniowania i konwekcji kształtuje się tak jak w szczelinie gazowej pomiędzy szybami. Natomiast w

wymianie ciepła od strony zewnętrznej dominującą rolę odgrywa konwekcja wymuszona (działaniem wiatru), która odpowiada za około 90% wymiany ciepła, a tylko 10% stanowi wymiana przez promieniowanie z otoczeniem.

Własności optyczne szyb zależą między innymi od kąta padania promieniowania słonecznego, a więc są zmienne w czasie zarówno w krótkim - dziennym, jak i w długim – sezonowym okresie czasu. W związku z tym poszukuje się pokryć charakteryzujących się określoną selektywnością kątową w celu uzyskania zadanej transmisyjności promieniowania słonecznego w danych warunkach (w danym czasie dnia i w danej porze roku).

Okno składa się z oszklenia i ramy, w której jest umieszczone. Najczęściej stosuje się okna dwuszybowe, przy czym jedną szybę może stanowić jedna tafła szkła, lub kilka tafli przedzielonych wewnętrznymi oddzieleniami. Pomiędzy ramą a szybami występuje obszar obrzeża szyb przymocowanych bezpośrednio do ramy. W oknie dwuszybowym dwie szyby oddzielone są od siebie rozpórką (uszczelnieniem). Intensywna wymiana ciepła zachodzi na obrzeżu szyb, w miejscu ich kontaktu z rozpórką i ramą. Wymiana ciepła w ramie i rozpórce jest zależna od detali konstrukcyjnych i materiału okna.

Z reguły w analizach energetycznych budynków rozważania dotyczące wymiany ciepła przez okna są uproszczone i odnoszą się do okna jako całości. Stosuje się jeden współczynnik przenikania ciepła dla całego okna (np. z danych normowych [191] lub katalogowych) lub korzysta się z wzorów pozwalających go obliczyć z różnym stopniem szczegółowości [115] - [118]. W literaturze ASHRAE [12] - [13] można też znaleźć równania lub zależności graficzne pozwalające wyznaczyć wartości średnie współczynników przenikania ciepła, oddzielnie dla ramy, dla obrzeża i części centralnej przeszklenia, a także wartości całkowite. Zestawione zostały tam różne typy okien i odpowiadające im wartości współczynników przenikania. Podany został uproszczony sposób wyznaczania zysków słonecznych z uwzględnieniem jego absorpcji w szybach i z całkowitym średnim ważonym współczynnikiem zysków słonecznych dla ramy i innych nieprzezroczystych elementów okna. Dla danej szerokości geograficznej w zależności od pory dnia (godziny wg czasu słonecznego) i miesiąca roku dla szesnastu głównych orientacji okien zestawiono wskaźniki gęstości strumienia słonecznych zysków cieplnych – *SHGF* (*Solar Heat Gain Factor*) [W/m^2]. Przy szczegółowych analizach zjawisk zachodzących w oknach proponuje się [7], [14] dla części centralnej szyb stosowanie modelu jednowymiarowego wymiany ciepła, wzdłuż grubości okna, natomiast dla ramy i obrzeża szyb stosowanie modelu dwuwymiarowego.

Jednym z celów rozważań jest sformułowanie modelu matematycznego procesów fizycznych związanych z przepływem energii przez okno z uwzględnieniem oddziaływania energii promieniowania słonecznego, a następnie rozwiązanie zagadnienia przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych. Zagadnienie przepływu energii przez okno jest zagadnieniem złożonym. Bilans energetyczny

okna i metoda jego rozwiązania mogą charakteryzować się różnym stopniem szczegółowości.

Przy przepływie energii przez okno mamy do czynienia z reguły z przepływem dwóch różnych strumieni energii, w tym samym lub w różnych kierunkach. W ciągu dnia, w okresie czasu pomiędzy wschodem a zachodem Słońca, gdy natężenie promieniowania słonecznego G_s i wskaźnik $SHGF$ zysków słonecznych ([19], [98]) są większe od zera, występuje przepływ energii promieniowania słonecznego do wnętrza pomieszczenia. Natomiast jeżeli wartość natężenia promieniowania słonecznego (w okresie czasu pomiędzy zachodem a wschodem Słońca) lub wskaźnik $SHGF$ są równe zero, przepływ energii słonecznej nie występuje, co można zapisać jako:

$$\begin{aligned} \sum \dot{Q}_s > 0 & \quad \text{jeżeli} \quad G_s > 0 \quad (\text{dla } t_{\text{wsch}+\Delta t} < t < t_{\text{zach}-\Delta t'}) \quad \text{i} \quad SHGF > 0 \\ \sum \dot{Q}_s = 0 & \quad \text{jeżeli} \quad G_s = 0 \quad (\text{dla } t_{\text{zach}-\Delta t'} < t < t_{\text{wsch}+\Delta t}) \quad \text{lub} \quad SHGF = 0 \end{aligned}$$

Jednocześnie cały czas występuje przepływ ciepła przez okno pomiędzy wnętrzem o temperaturze T_w a otoczeniem zewnętrznym o temperaturze T_a wywołany różnicą temperatur tych dwóch ośrodków.

W pracy przyjęto, że w celu wyznaczenia strumienia energii netto przepływającej przez okna, konieczne jest sformułowanie bilansów energetycznych dla przezroczystej przeszklonej centralnej części okna, przezroczystego obrzeża szyb mającego bezpośredni kontakt z ramą i nieprzezroczystej ramy, z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania na siebie. Zarówno przeszklenie, jak i rama, są ośrodkami o złożonej budowie i matematyczny opis zjawisk cieplnych zachodzących w nich samych oraz w ich otoczeniu jest również złożony.

Zagadnienie przepływu energii przez okno można przeprowadzać uwzględniając, iż okno składa się z kilku podstawowych elementów, tj. z dwóch szyb znajdujących się względem siebie w określonej odległości, szczeliny gazowej w przestrzeni między szybami, ramy okiennej nadającej oknu sztywność i zapewniającej utrzymanie szczelności szczeliny gazowej. Istnienie ramy wpływa na procesy wymiany ciepła w części przeszklonej okna, przede wszystkim w części obrzeża szyb. Przeprowadzone badania [7], [14], [86], [89] udowodniły, że zjawiska wzajemnego oddziaływania ramy na oszklenie są szczególnie istotne na obrzeżu szyb w odległości 0,063 metra od ramy i to niezależnie od wielkości okna. Odległość przeszklania od ramy równa 0,063 metra, wyznaczająca obszar obrzeża przeszklania, została uznana przez ASHRAE jako wymiar standardowy określający jednoznacznie strefę oddziaływania ramy na przeszklenie i obowiązujący do stosowania w analizach cieplnych okien. Odległość ta została także uwzględniona w nowopowstałej normie ISO 15099 dotyczącej szczegółowych obliczeń do wyznaczania charakterystyki cieplnej okien, drzwi i urządzeń zacięniających [115], a także będącej w trakcie nowelizacji normie ISO/DIS 10077-1 [118].

4.3.2 Przepływ energii przez szyby

Opisane w tej części rozdziału zjawiska dotyczą całego przeszklenia, zarówno centralnej części szyb, jak i ich obrzeży przy przepływie energii w poprzek okna.

Przepływ energii przez szybę jest spowodowany napromieniowaniem okna przez krótkofalowe promieniowanie słoneczne i różnicą temperatur pomiędzy ośrodkiem wewnętrznym - pomieszczeniem i zewnętrznym - otoczeniem atmosferycznym. Przy formułowaniu modelu matematycznego zjawisk zachodzących w szybach i ich otoczeniu rozważono zarówno przepływ energii niesionej przez krótkofalowe promieniowanie słoneczne, jak i przepływ ciepła z ośrodka o wyższej temperaturze do ośrodka o niższej temperaturze. W wyniku przejścia promieniowania słonecznego przez okno część promieniowania zostaje pochłonięta w szybach, powodując wzrost ich temperatury, a część zostaje bezpośrednio przepuszczona do wnętrza.

Założono, że okno składa się z dwóch szyb wykonanych z tego samego materiału, o tej samej grubości, znajdujących się w pewnej ustalonej odległości od siebie, w przestrzeni między szybami znajduje się jednorodny przezroczysty ośrodek - powietrze. Ze względu na duże wymiary szyb w stosunku do ich grubości przyjęto, że wzdłuż grubości, tj. współrzędnej z każdą z szyb w centralnej ich części reprezentuje jeden punkt umiejscowiony w elementarnej objętości w środku szyby. Punktowi temu przypisano parametry fizyczne szyby: gęstość, ciepło właściwe, przewodność cieplna, temperaturę T_{szw} lub T_{szz} szyby wewnętrznej i zewnętrznej odpowiednio, wynikającą z warunków otoczenia szyby w danym czasie i stanu obrzeża przeszklenia. Rozważania dla przepływu energii przez przeszklenie wzdłuż grubości okna, (współrzędna z), można odnieść do następujących temperatur:

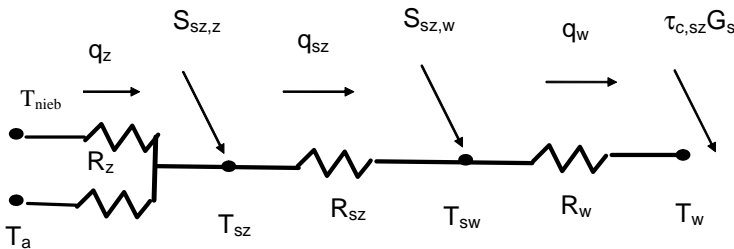
- T_w powietrza wewnątrz pomieszczenia,
- T_a powietrza atmosferycznego - na zewnątrz pomieszczenia,
- T_{nieb} (pozornej) nieboskłonu,
- T_{szw} szyby wewnętrznej,
- T_{szz} szyby zewnętrznej.

Temperatura pozorna nieboskłonu T_{nieb} jest zmienna w czasie i jest wyrażana w funkcji temperatury otoczenia atmosferycznego $T_{nieb}(t)=f(T_a(t))$. Zastosowaną zależność na temperaturę pozorną nieboskłonu T_{nieb} opisano w punkcie 4.4.

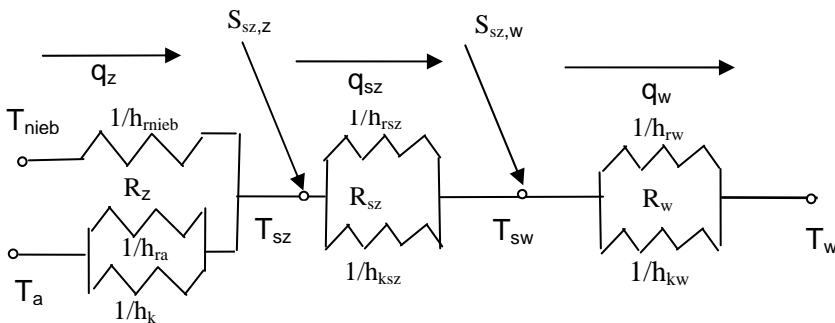
Zachowanie się okna jest związane ze zmianami zachodzącymi w jego otoczeniu zewnętrznym i wewnętrznym, opisanym za pomocą podstawowych parametrów takich jak: temperatura T_a powietrza atmosferycznego, natężenie promieniowania słonecznego G_s , temperatura T_w powietrza wewnątrz pomieszczenia.

Przy formułowaniu przepływu ciepła przez okno wzdłuż jego grubości można skorzystać z metody oporów cieplnych [98], [228]. Zgodnie z tą metodą wymienione powyżej temperatury T_a , T_w , T_{szw} , T_{szz} , T_{nieb} , stanowią węzły na schemacie przepływu ciepła (wzdłuż grubości okna) analogicznym do przepływu prądu elektrycznego i odpowiadają pojęciu napięcia w obwodach elektrycznych, co

przedstawiono w sposób ogólny na rys. 4.3 i w sposób bardziej szczegółowy tj. z uwzględnieniem poszczególnych procesów wymiany ciepła (promieniowania i konwekcji, ale bez przewodzenia w szybach) na rys. 4.4. Jednostkowe gęstości strumieni ciepła \dot{q}_z , \dot{q}_w , \dot{q}_{sz} odpowiadają z kolei natężeniu prądu elektrycznego, a gęstości $S_{sz,z}$ i $S_{sz,w}$ strumienia promieniowania słonecznego zaabsorbowanego w odpowiedniej szybie odpowiadają natężeniu wewnętrznych źródeł prądu elektrycznego. W celu obrazowego przedstawienia przepływu strumieni ciepła przez przeszklenie zamieszczony został także rys. 4.5.



Rys. 4.3. Zastosowanie metody oporów cieplnych do zamodelowania przepływu strumienia ciepła przez okno wzdłuż jego grubości



Rys. 4.4. Zastosowanie metody oporów cieplnych do zamodelowania przepływu strumienia ciepła przez okno z uwzględnieniem oporów składowych

Zgodnie z rozważaniami zawartymi w rozdziale 3.3 i korzystając z rys. 3.5 można wyznaczyć strumień promieniowania słonecznego zaabsorbowanego w każdej z dwóch szyb rozważanego okna. Zjawisko wielokrotnego odbicia promieniowania na granicy ośrodków: zewnętrzna szyba – powietrze - wewnętrzna szyba powoduje osłabienie promieniowania przechodzącego do wnętrza pomieszczenia i wpływa na ilość ciepła zaabsorbowanego w każdej z szyb. Korzystając z równań (3.43) i (3.44) na absorpcyjność dwóch identycznych szyb: zewnętrznej i wewnętrznej, przy

uwzględnieniu kolejności ich ułożenia, przyjmując, że znana jest transmisyjność i refleksyjność pojedynczej szyby oraz korzystając z zależności: $\alpha = 1 - \tau - \rho$, natężenie promieniowania słonecznego zaabsorbowanego w danym czasie w każdej z dwóch szyb $S_{sz,z}$ [W/m^2] i $S_{sz,w}$ [W/m^2] wynosi odpowiednio:

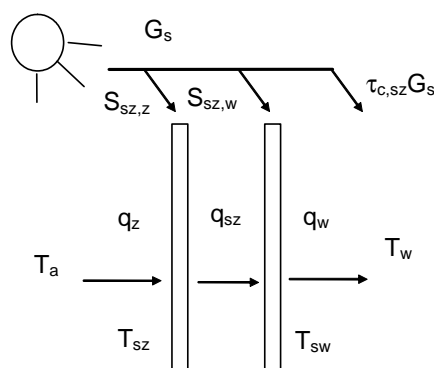
$$S_{sz,w}(t) = (1 - \rho - \tau) \frac{\tau}{1 - \rho^2} G_s(t) = A_{sz,w} \cdot G_s(t) \quad (4.30)$$

$$S_{sz,z}(t) = (1 - \rho - \tau) \left(1 + \tau \frac{\rho}{1 - \rho^2} \right) G_s(t) = A_{sz,z} G_s(t) \quad (4.31)$$

Analiza przenikania promieniowania słonecznego do wnętrza pomieszczenia, oprócz wyznaczenia strumienia energii absorbowanej przez poszczególne szyby (co ogólnie opisują równania (4.30), (4.31)) dotyczy wyznaczania gęstości strumienia energii słonecznej \dot{q}_s bezpośrednio przechodzącego do pomieszczenia, określonej jako:

$$\dot{q}_s(t) = \tau_{c,sz} G_s(t) \quad (4.32)$$

Sposób określania transmisyjności całkowitej $\tau_{c,sz}$ okna dla promieniowania słonecznego został opisany w rozdziale 3 i wyznacza się go w przypadku dwóch identycznych szyb przy wykorzystaniu równania (3.37).



Rys. 4.5. Schemat przepływu strumieni ciepła przez okno

Korzystając z metody oporów cieplnych zobrazowanej dla analizowanego przypadku na rys. 4.3–4.5 można sformułować bilans dla rozważanego przeszklenia. Na wstępie należy określić poszczególne strumienie ciepła przepływające przez okno o powierzchni A_c w danym czasie t , a więc strumień $q_w(t)$ wpływający do pomieszczenia (do wewnątrz), strumień $q_{sz}(t)$ przepływający między szybami, strumień $q_z(t)$ napływający z zewnątrz. Najbardziej skomplikowane jest określenie strumienia $q_z(t)$, bowiem odnosi się on do napływu ciepła z dwóch różnych ośrodków o różnych temperaturach, z otoczenia atmosferycznego o temperaturze

$T_a(t)$ i dalszego otoczenia: nieboskłonu $T_{nieb}(t)$ (co ilustruje rys. 4.4). W rozważaniach uproszczonych, przyjmuje się, że wymiana ciepła z otoczeniem zewnętrznym odnosi się tylko do bezpośredniego otoczenia atmosferycznego o temperaturze $T_a(t)$ i strumień $q_z(t)$ jest traktowany jako zastępczy, i wtedy poszczególne strumienie wyznacza się zgodnie z następującymi zależnościami:

$$\dot{q}_w(t) = \frac{T_{sw}(t) - T_w}{A_c R_w(t)} \quad (4.33)$$

$$\dot{q}_{sz}(t) = \frac{T_{sz}(t) - T_{sw}(t)}{A_c R_{sz}(t)} \quad (4.34)$$

$$\dot{q}_z(t) = \frac{T_a(t) - T_{sz}(t)}{A_c R_z(t)} \quad (4.35)$$

Z kolei zgodnie z rys. 4.5 można zapisać następujące równania bilansowe w odniesieniu do strumienia ciepła w szczelinie okna w danym czasie t :

$$\dot{q}_z(t) + S_{sz,z}(t) = \dot{q}_{sz}(t) \quad (4.36)$$

$$\dot{q}_{sz}(t) + S_{sz,w}(t) = \dot{q}_w(t) \quad (4.37)$$

Gdy nie ma promieniowania słonecznego ($G_s=0$) to nie występuje zjawisko absorpcji promieniowania słonecznego w szybach, czyli:

$S_{sz,z}(t)=0$ i $S_{sz,w}(t)=0$ a w konsekwencji zachodzi równość:

$$\dot{q}_z(t) = \dot{q}_{sz}(t) = \dot{q}_w(t) \quad (4.38)$$

Korzystając z rys. 4.4 i uwzględniając poszczególne opory cieplne w odniesieniu do wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem atmosferycznym a zewnętrzną szybą, wskutek konwekcji i promieniowania, przy założeniu, że wymiana ciepła odbywa się tylko z bezpośrednim otoczeniem o temperaturze T_a , otrzymuje się następującą zależność:

$$\frac{1}{A_c R_z(t)} = h_{k,a}(t) + \frac{\varepsilon_o \sigma (T_a(t)^4 - T_{sz}(t)^4)}{(T_a(t) - T_{sz}(t))} \quad (4.39)$$

Natomiast w odniesieniu do wymiany ciepła w szczelinie gazowej pomiędzy dwoma szybami, wskutek konwekcji i promieniowania, zależność przyjmuje postać:

$$\frac{1}{A_c R_{sz}(t)} = h_{k,sz}(t) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_o} + \frac{1}{\varepsilon_o} - 1} \frac{(T_{sz}(t)^4 - T_{sw}(t)^4)}{(T_{sz}(t) - T_{sw}(t))} \quad (4.40)$$

Z kolei w odniesieniu do wymiany ciepła pomiędzy otoczeniem wewnętrznym - pomieszczeniem a wewnętrzną szybą, wskutek konwekcji i promieniowania, otrzymuje się:

$$\frac{1}{A_c R_w(t)} = h_{k,w}(t) + \frac{\varepsilon_o \sigma (T_{sw}(t)^4 - T_w(t)^4)}{(T_{sz}(t) - T_w)} \quad (4.41)$$

Układ ośmiu powyższych równań tj. (4.33) – (4.41) z ośmioma niewiadomymi $T_{sw}(t)$, $T_{sz}(t)$, $q_{sz}(t)$, $q_w(t)$, $q_z(t)$, $R_{sz}(t)$, $R_z(t)$, $R_w(t)$ można rozwiązać metodą iteracji dla kolejnych przedziałów czasowych. Jeżeli opory cieplne z równań (4.39) - (4.41) wstawi się do równań opisujących przepływające strumienie ciepła (4.33) - (4.35), a następnie uwzględni się równania bilansowe (4.36) - (4.37) oraz przyjmie się, że temperatura otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego są znane (np. dane pomiarowe, lub założony jest rozkład w czasie tych temperatur), w rezultacie otrzyma się układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi T_{sw} , T_{sz} o postaci:

$$\begin{aligned} h_{k,w}(T_w, T_{sw}(t))(T_{sw}(t) - T_w) + \varepsilon_o \sigma (T_{sw}(t)^4 - T_w^4) = \\ = h_{k,sz}(T_{sz}(t), T_{sw}(t))(T_{sz}(t) - T_{sw}(t)) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_o} + \frac{1}{\varepsilon_o} - 1} (T_{sw}(t)^4 - T_{sz}(t)^4) + S_{sz,w}(t) \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} h_{k,z}(T_a(t), T_{sz}(t))(T_a(t) - T_{sz}(t)) + \varepsilon_o \sigma (T_a(t)^4 - T_{sz}(t)^4) = \\ = h_{k,sz}(T_{sz}(t), T_{sw}(t))(T_{sz}(t) - T_{sw}(t)) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_o} + \frac{1}{\varepsilon_o} - 1} (T_{sw}(t)^4 - T_{sz}(t)^4) - S_{sz,z}(t) \end{aligned} \quad (4.43)$$

Rozwiązanie powyższego układu równań jest bardzo skomplikowane. Rozwiązanie można uprościć wprowadzając pewne założenia i stosując proste zależności na współczynniki wymiany ciepła [98]. Jednakże, w rozważaniach do opisu poszczególnych zjawisk zastosowano złożone zależności aproksymacyjne na współczynniki konwekcyjnej wymiany ciepła będące funkcją zmiennych w czasie temperatur ośrodków wymieniających ciepło. Rozwiązanie zagadnienia wymagało zastosowania symulacji komputerowej (co opisano w dalszej części szczegółowo). W rozważaniach, zgodnie z przedstawionymi powyżej założeniami, przepływ ciepła przez centralną część okna jest rozpatrywany w układzie jednokierunkowym wzdłuż grubości okna (współrzędna z). Natomiast w przypadku przepływu ciepła w obrzeżach szyb oprócz przepływu w poprzek (grubości) szyby (współrzędna z) rozważono przepływ wzdłuż szyby, od obszarów o wyższej temperaturze do obszarów o niższej temperaturze, co wynika z oddziaływania ramy i zostało opisane w kolejnym punkcie.

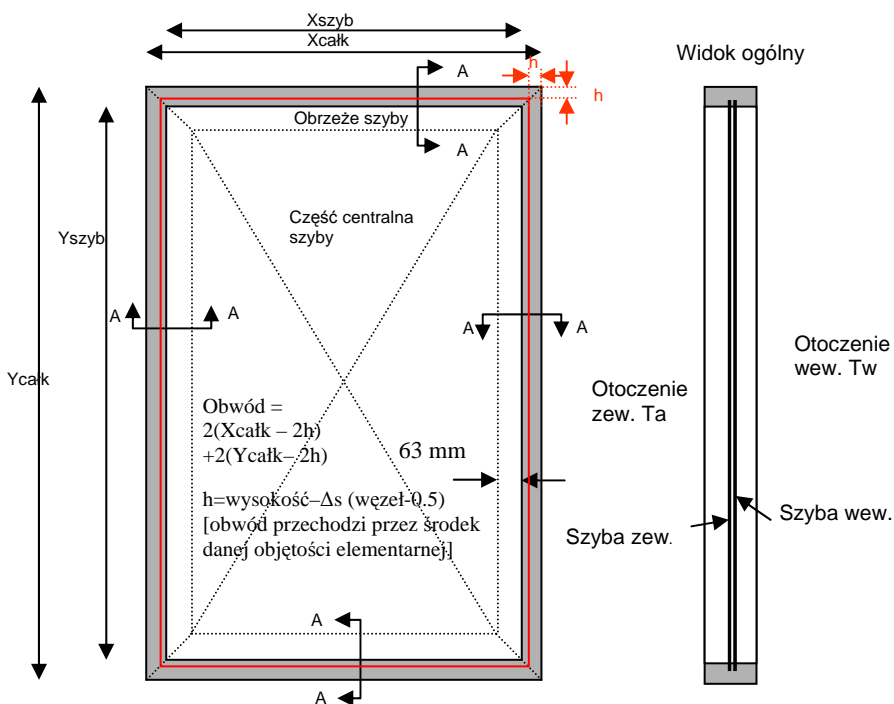
Strumień energii dopływającej lub odpływającej z pomieszczenia składa się ze strumienia ciepła dopływającego do otoczenia wewnętrznego od szyby wewnętrznej, o polu powierzchni przeszklenia A_c (niezaciemnionej), i strumienia krótkofalowego promieniowania słonecznego G_s osłabionego określoną transmisyjnością układu dwu szyb, opisanego współczynnikiem $\tau_{c,sz}$, (τ z równania (3.34) lub dla dwu identycznych szyb τ_c z równania (3.37)), co w sposób ogólny można zapisać jako:

$$\sum_i A_i q_{net}(t) = A_c \dot{q}_w(t) + A_c G_s(t) \tau_{c,sz}(t) \quad (4.44)$$

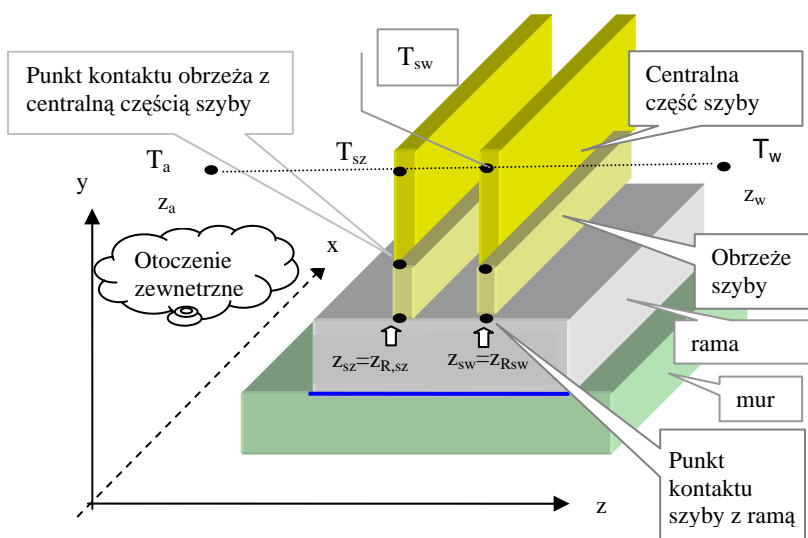
Zjawiska zachodzące w przeszkleniach i ich otoczeniu opisano w kolejnych punktach, gdzie rozważono je bardziej szczegółowo niż to przedstawiono powyżej.

4.3.3 Ogólne sformułowanie zagadnienia przepływu energii przez obrzeże szyby

Zagadnienia przepływu ciepła przez przezroczystą część obrzeża okna rozważono w sposób bezpośredni w układzie jednowymiarowym, w sposób uproszczony w układzie dwuwymiarowym, a w sposób pośredni w układzie trójwymiarowym, co wyjaśniono w dalszej części. Przyjęte współrzędne układu są następujące: z w poprzek grubości okna, y wzdłuż wysokości/szerokości okna. Przyjęty układ współrzędnych został opisany poniżej. Widok okna z przodu/tyłu i z boku z jego podstawowymi elementami jest pokazany na rys. 4.6. Przyjęty układ współrzędnych jest pokazany ideowo na rys. 4.7.



Rys. 4.6. Widok okna od zewnątrz (lub wewnątrz) i jego podstawowe elementy



Rys.4.7. Ideowy przekrój przez szyby i ramę z przyjętym układem współrzędnych. Współrzędna x jest wzdłuż rozwinięcia (obwodu) ramy i obrzeża szyby.

Rama jest bryłą, którą stanowią cztery prostopadłościenne elementy utrzymujące szyby, dwa pionowe: lewy i prawy, dwa poziome: górny i dolny. Na rysunku 4.6 zaznaczono, w dowolnym miejscu każdego z wymienionych czterech elementów składowych ramy, przekrój A-A ramy wraz z obrzeżem przeszklenia. Przekroje A-A ramy, przy tej samej szerokości ramy w pionie lub poziomie (w zależności od tego czy rozważamy ramę poziomą czy pionową, odpowiednio) są identyczne. Ramę i obrzeże przeszklenia rozpatruje się bezpośrednio w układzie dwuwymiarowym, ze współrzędną z w poprzek ich grubości, i drugą współrzędną (y) wzdłuż szerokości ramy (zawsze tej samej co do wymiaru tyle, że w rzeczywistości ułożonej poziomo lub pionowo - wzdłuż przekroju A-A). Przy czym rozważania w kierunku z w przypadku przeszklenia są uproszczone, bowiem rozpatruje się tylko kilka stałych punktów. Trzeci wymiar jest również brany pod uwagę, ale w swoisty sposób. Przyjęto mianowicie, że przepływ ciepła w układzie dwuwymiarowym odbywa się po odpowiednim obwodzie ramy lub po odpowiednim obwodzie obrzeża przeszklenia, na który składają się odpowiednie składowe ramy, tj. pionowa rama bądź obrzeże po lewej stronie + pozioma górna rama bądź obrzeże + pionowa rama bądź obrzeże po prawej stronie + pozioma dolna rama bądź obrzeże. Zastosowano rozłożenie całej ramy i kontaktującego się z nią obrzeża przeszklenia wzdłuż jednego kierunku (wzdłuż współrzędnej x). Należy zaznaczyć, że długość danego obwodu wzdłuż współrzędnej x jest zmienna i zależy od współrzędnej y . Największy jest oczywiście zewnętrzny obwód, ramy lub obrzeża przeszklenia, dla których $y=y_{max}$, najmniejszy jest obwód wewnętrzny, dla których $y=y_{min}$, pomiędzy tymi

obwodami można utworzyć szereg kolejnych pośrednich obwodów (liczba zależy od dokładności podziału, czyli kroku siatki przestrzennej związanego z dokładnością modelu obliczeniowego).

Zmienność temperatury obrzeża w każdej z szyb jest rozważana wzdłuż współrzędnej y , która odpowiada szerokości/wysokości okna i oznacza kierunek, i zwrot od ramy do centralnej części przeszklenia. Przepływ ciepła w obrzeżu szyby wzdłuż jej szerokości/wysokości, jak już wspomniano jest wynikiem oddziaływania ramy okiennej na przeszklenie i odbywa się przez przewodzenie. Zgodnie ze obowiązującym standardem obliczeniowym ASHRAE obrzeże stanowi obszar przeszklenia w odległości 0,063 m od ramy niezależnie od wymiaru okna.

Przepływ energii przez szyby w poprzek grubości obrzeża szyb i części centralnej przeszklenia (współrzędna z) został rozważony w sposób bardziej szczegółowy niż opisują to równania (4.33) - (4.41). Temperatura szyb, jak już wspomniano, jest rozważana wzdłuż współrzędnej z w sposób uproszczony, jako temperatura dwóch węzłów siatki przestrzennej, w której węzeł z_{sz} znajduje się w szybie zewnętrznej, a węzeł z_{sw} w szybie wewnętrznej. Obu węzłom przypisano taką samą pojemność cieplną (obie szyby są identyczne). Dla współrzędnej z w sposób przybliżony punktowo zamodelowano także otoczenie zewnętrzne (węzeł o temperaturze T_a) i wewnętrzne (węzeł o temperaturze T_w). W niektórych przypadkach (co w dalszej części tego rozdziału opisano w sposób bardziej szczegółowy) rozważania odnosi się także do innych temperatur, a mianowicie do temperatury niebosłonu T_{nieb} , która jest wyrażana w funkcji temperatury T_a i do temperatury warstwy przyściennej powietrza przy przeszkleniu. Korzystając z rys. 4.5 i rys. 4.7 temperatury przypisane poszczególnym węzłom temperaturowym o określonej współrzędnej z można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned} T_a(y, z, t) &= T_a(t) && \text{dla } z = z_a \\ T_{sz}(y, z, t) &= T_{sz}(y, t) && \text{dla } z = z_{sz} \\ T_{sw}(y, z, t) &= T_{sw}(y, t) && \text{dla } z = z_{sw} \\ T_w(y, z, t) &= T_w && \text{dla } z = z_w \end{aligned}$$

Przyjęto, że w stanie początkowym temperatura $T_{sz}(y, t_0)$ całego obszaru obrzeża szyby zewnętrznej (dla wszystkich y) jest taka sama i odpowiada średniej temperaturze ramy $\bar{T}_r(y_{maz}, \bar{z}_{R,sz}, t_0)$ w miejscu kontaktu z tą szybą (y_{max} oznacza współrzędną odpowiadającą górnej powierzchni ramy, natomiast współrzędna $\bar{z}_{R,sz}$ oznacza uśrednioną współrzędną z ramy w obszarze kontaktu z szybą zewnętrzną). Również temperatura początkowa $T_{sw}(y, t_0)$ całego obszaru obrzeża szyby wewnętrznej odpowiada średniej temperaturze ramy $\bar{T}_r(y_{maz}, \bar{z}_{R,sw}, t_0)$ w miejscu kontaktu z szybą, co odpowiednio w odniesieniu do szyby zewnętrznej i wewnętrznej można zapisać jako:

$$\text{dla } t = t_0 = 0$$

$$T_{sz}(y, t_0) = T_{0sz} = \bar{T}_r(\bar{z}_{R,sz}, t_0) \Big|_{y_r = y_{\max}} \quad (4.45)$$

$$T_{sw}(y, t_0) = T_{0sw} = \bar{T}_r(\bar{z}_{R,sw}, t_0) \Big|_{y_r = y_{\max}} \quad (4.45')$$

Obrzeże przeszklenia szyby zewnętrznej i wewnętrznej w kierunku y ogranicza od dołu rama, a od góry centralna część przeszklenia, co ilustruje rys. 4.7. Teoretyczne miejsce przejścia obrzeża szyby w część centralną przeszklenia znajduje się zgodnie ze standardami ASHRAE w odległości 0,063 metra od ramy. Warunek początkowy dla obszaru obrzeża każdej z szyb opisany równaniami (4.45) i (4.45') odnosi się także do części centralnej tych szyb. Temperatura części centralnej poszczególnych szyb jest bowiem zawsze równa temperaturze obrzeża na granicy z częścią centralną każdej z szyb. W chwili początkowej temperatura w całym obszarze przeszklenia danej szyby jest taka sama i odpowiada średniej temperaturze ramy w miejscu kontaktu z daną szybą.

Istnienie ramy powoduje przepływ ciepła wskutek przewodzenia od szyby do ramy lub odwrotnie, w zależności od gradientu temperatur. Przewodzenie zachodzi też wzdłuż grubości szyby, czyli zgodnie ze współrzędną z . (Często przewodzenie wzdłuż grubości szyby jest pomijane, wobec małej grubości w porównaniu z wysokością/szerokością szyby.) Wymianę ciepła przez przewodzenie w obrzeżu szyby (wzdłuż wysokości/szerokości) w kierunku y w stanie nieustalonym dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej, stosując zapis uwzględniający pojemność cieplną ($Mc_{p,sz} = V\rho_{sz}c_{psz}$ [J/K], obie szyby są identyczne, ich pojemność cieplna jest taka sama), opisują odpowiednio równania:

$$\frac{1}{V_{sz}} Mc_{p,sz} \frac{\partial T_{sz}(y, z_{sz}, t)}{\partial t} = \lambda_{sz} \frac{\partial^2 T_{sz}(y, z_{sz}, t)}{\partial y_{sz}^2} \quad (4.46)$$

$$\frac{1}{V_{sz}} Mc_{p,sz} \frac{\partial T_{sw}(y, z_{sw}, t)}{\partial t} = \lambda_{sz} \frac{\partial^2 T_{sw}(y, z_{sw}, t)}{\partial y_{sz}^2} \quad (4.46')$$

Równania powyższe mogą być rozwiązane przy sformułowaniu odpowiednich warunków brzegowych na granicach obszarów wymiany ciepła.

Przy formułowaniu warunków brzegowych dla współrzędnej y , wzdłuż obrzeża przeszklenia przyjęto, że wymiana ciepła na granicy obrzeże-rama zachodzi wskutek przewodzenia od ramy. Natomiast na granicy obrzeże-centralna część szyby przewodzenie ciepła zanika, temperatura na końcu obrzeża przeszklenia (w odległości 0,063 m od ramy) odpowiada temperaturze części centralnej szyby.

Wymianę ciepła na brzegu obszaru obrzeża przeszklenia od strony ramy opisuje warunek równości temperatury i strumieni ciepła przenoszonych na granicy obszaru. Temperatura obrzeża przeszklenia T_{sz} szyby zewnętrznej od strony ramy o

współrzędnej (y_l, z_{sz}) jest równa temperaturze ramy T_r , o współrzędnej $(y_{r,max}, \bar{z}_{R,sz})$ na granicy obu obszarów, na której zachodzi też równość strumieni wymianianego ciepła. Położenie obszaru kontaktu ramy i obrzeża szyby, w którym współrzędne z ramy i szyby pokrywają się, zaznaczono na rys. 4.7. Warunek brzegowy odpowiednio dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej można zapisać jako:

$$T_{sz}(y_l, z_{sz}, t) = T_r(y_{r,max}, \bar{z}_{R,sz}, t)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y_r} \Big|_{y=y_{max1}, z=\bar{z}_{R,sz}} = -\lambda_{sz} \frac{\partial T_{sz}(y, z_{sz}, t)}{\partial y_{sz}} \Big|_{y_{sz}=y_l} \quad (4.47)$$

$$T_{sw}(y_l, z_{sw}, t) = T_r(y_{r,max}, \bar{z}_{R,sw}, t)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y_r} \Big|_{y_r=y_{max}, z=\bar{z}_{R,sw}} = -\lambda_{sz} \frac{\partial T_{sw}(y, z_{sw}, t)}{\partial y_{sw}} \Big|_{y_{sw}=y_l} \quad (4.47')$$

Po lewej stronie równania (4.47) i (4.47') dla przepływu ciepła na granicy obszaru ramy i szyby zewnętrznej, i szyby wewnętrznej, odpowiednio występuje uśredniona współrzędna $\bar{z}_{R,sz}, \bar{z}_{R,sw}$, bowiem temperatura w ramie dla tej współrzędnej jest uśrednioną (arytmetycznie) wartością kilku temperatur w ramie. Wynika to z faktu, że krok siatki wzdłuż współrzędnej z jest inny w ramie niż w szybie (na tej samej długości – grubości szyby liczba węzłów w szybie i ramie jest różna, co opisano szczegółowo w kolejnym punkcie tego rozdziału). Występujące w powyższych wzorach współczynniki przewodności cieplnej ramy i przeszklenia przyjęto jako stałe w czasie i przestrzeni.

Granice obszaru ramy wzdłuż kierunku współrzędnej y od strony centralnej szyby mają współrzędne y_{max} . Przyjęto, że w tym miejscu kończy się oddziaływanie ramy, nie ma wymiany ciepła, na granicy obszaru zachodzi równość temperatury, a temperatura całej centralnej części przeszklenia jest taka sama, czyli:

$$T_{sz}(y_{max}, t) = T_{sz,cen}(t) \quad (4.48)$$

$$T_{sw}(y_{max}, t) = T_{sw,cen}(t) \quad (4.48')$$

Szyba zewnętrzna jest opisana tylko jedną współrzędną $z = z_{sz}$, a szyba wewnętrzna współrzędną $z = z_{sw}$. Przy formułowaniu warunków brzegowych dla współrzędnej z uwzględniono, zarówno dla części centralnej szyby jak i obrzeża, przepływ ciepła do otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego wskutek konwekcji i promieniowania, co opisano w kolejnym punkcie szczegółowo.

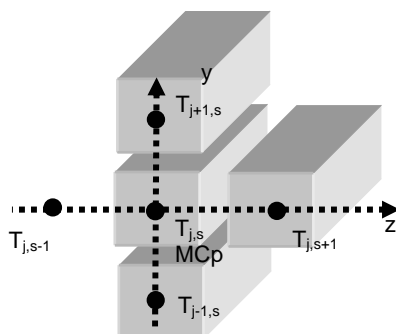
Zagadnienie nieustalanej wymiany ciepła w obrzeżu przeszklenia rozwiązano przy wykorzystaniu metody bilansów elementarnych. W efekcie uzyskano rozkład pola temperatury w obrzeżu szyby i wyznaczono strumień ciepła przechodzący przez

obrzeże i centralne przeszklenie do lub z wnętrza pomieszczenia, w zależności od gradientu temperatur, co opisano w kolejnym punkcie.

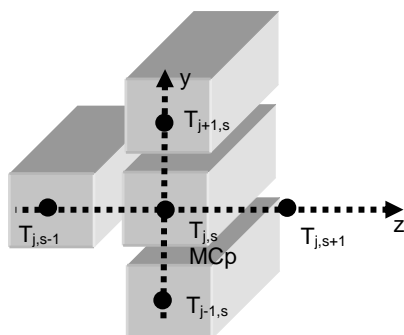
4.3.4 Rozwiązanie zagadnienia przepływu energii przez przeszklenie przy zastosowaniu symulacji komputerowej

W celu rozwiązania zagadnienia przepływu energii przez obrzeże przeszklania, podobnie jak w przypadku przegrody nieprzezroczystej, utworzono siatkę podziału rozpatrywanego obszaru na warstwowe elementy przestrzenne i sformułowano równania zachowania energii odniesione do wyróżnionego elementu przestrzennego z węzłem w środku. Sformułowany model matematyczny zjawisk zachodzących w przeszkleniach okna został opisany poniżej.

W związku z przyjętym modelem dwuwymiarowym (choć uproszczonym) każdy dowolny węzeł powstałej siatki przestrzennej jest otoczony przez cztery sąsiednie węzły. Dwa z nich wzdłuż współrzędnej y znajdują się w dwóch sąsiednich elementarnych objętościach, a dwa wzdłuż współrzędnej z reprezentują bezpośrednie otoczenie, którym może być otoczenie zewnętrzne lub wewnętrzne i druga szyba. Sposób przeprowadzenia podziału przestrzeni w sposób poglądowy ilustruje rys. 4.8a w odniesieniu do szyby zewnętrznej i 4.8b w odniesieniu do szyby wewnętrznej.

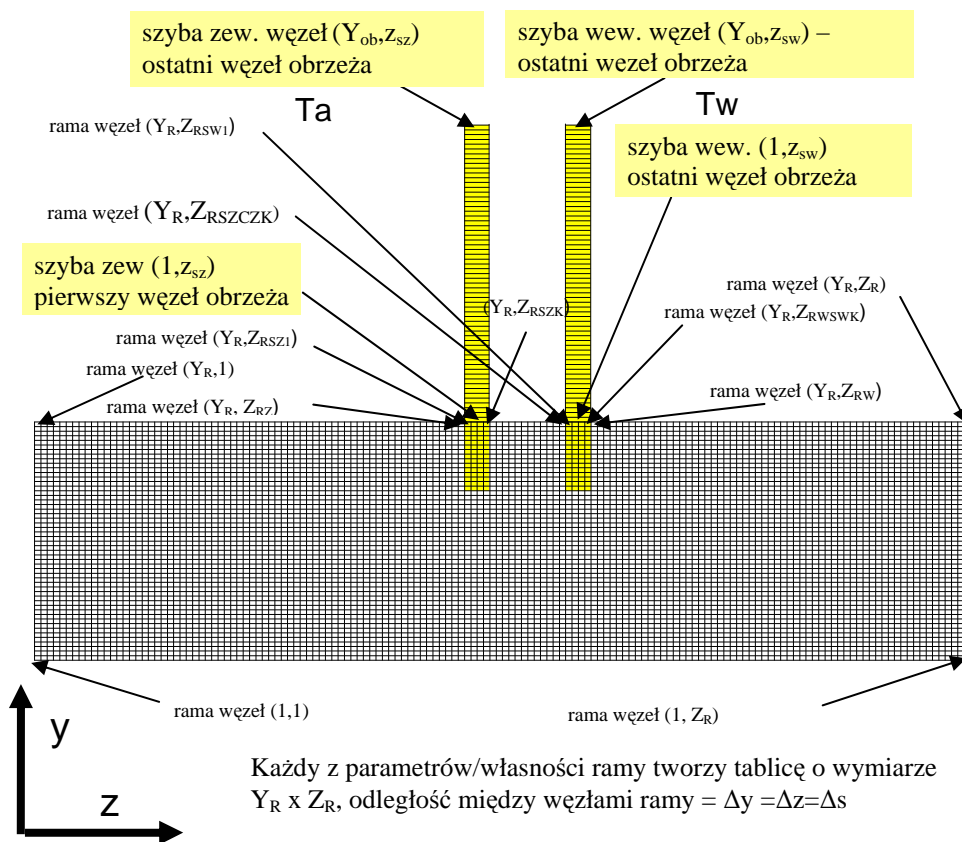


Rys. 4.8a. Siatka obszaru obrzeża szyby zewnętrznej w układzie dwuwymiarowym



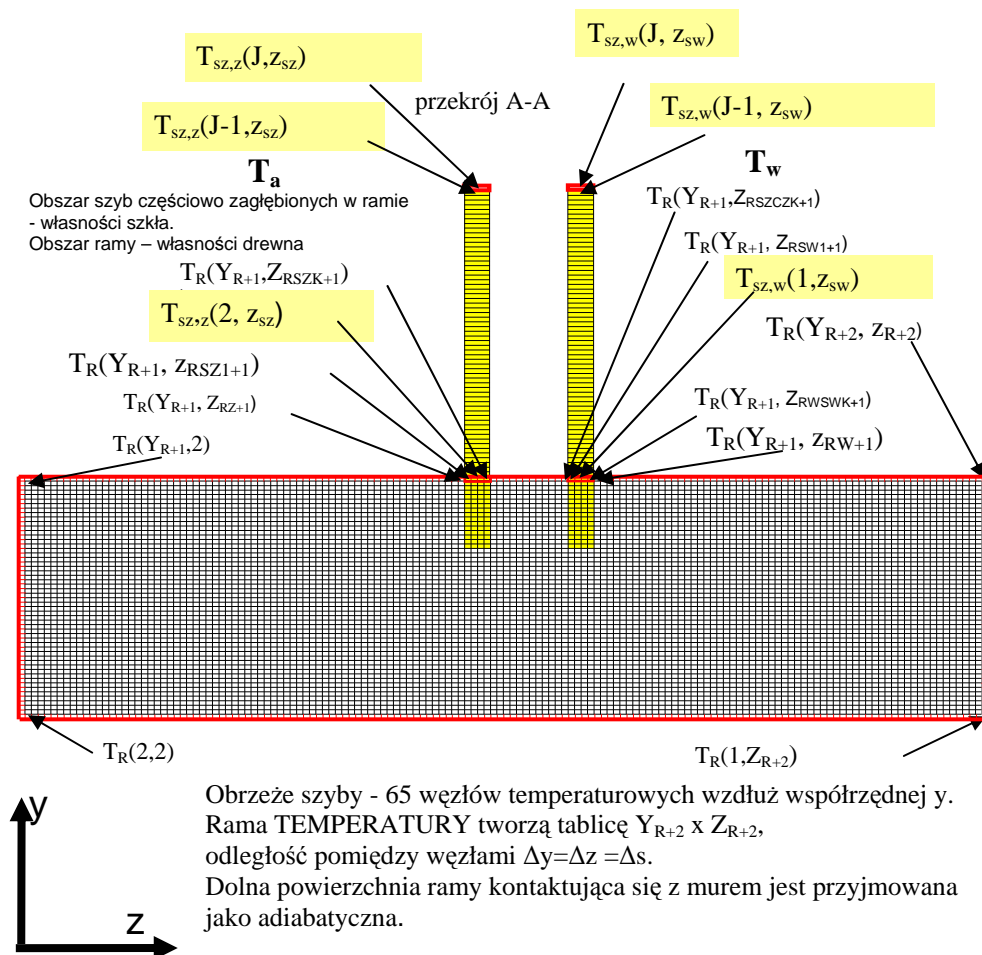
Rys. 4.8b. Siatka obszaru obrzeża szyby wewnętrznej w układzie dwuwymiarowym

Wartość temperatury obrzeża dowolnej z dwóch szyb $T_{j,s}^{k+1}$ w węźle (j, s) pola temperatury na kolejnym poziomie czasowym t_{k+1} otrzymuje się na podstawie wartości temperatury w węzłach siatki przestrzennej w poprzedniej płaszczyźnie czasowej, tj. w tym samym węźle, ale w poprzedniej płaszczyźnie czasowej: $T_{j,s}^k$ oraz w węzłach sąsiednich tj.: $T_{j-1,s}^k, T_{j+1,s}^k, T_{j,s-1}^k, T_{j,s+1}^k$. Węzłom znajdującym się w szybach przypisano odpowiednio ich pojemność cieplną. Krok czasowy $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, krok Δy wzdłuż współrzędnej y (wysokość/szerokość obrzeża przeszklenia okna) przyjęto jako stałe. Krok Δz jest oczywiście także stały i jest narzucony (stałą) odległością między środkami szyb. W celu rozwiązania zagadnienia sformułowano równania bilansów elementarnych dla każdej rozważanej elementarnej objętości kontrolnej wzdłuż współrzędnej y uwzględniając wymianę ciepła z węzłami brzegowymi wzdłuż współrzędnej z , reprezentującymi odpowiednie otoczenie danego węzła (j, s) , co zostało opisane szczegółowo poniżej.



Rys. 4.9. Ideowe umiejscowienie węzłów siatki przestrzennej w ramie i w obrzeżu przeszklenia w odniesieniu do własności/parametrów przeszklenia i ramy

Szyby są umocowane w ramie, cały czas występuje wzajemne oddziaływanie na siebie tych dwóch ośrodków. W celu lepszego zobrazowania podziału przestrzennego obu ośrodków na rys. 4.9 przedstawiono przyjęte umiejscowienie węzłów ramy i obrzeża przeszkleń obu szyb, którym przypisano odpowiednie własności/parametry. Węzły znajdują się w środku objętości elementarnych wewnątrz szyb lub ramy i charakteryzują się określoną pojemnością cieplną. Na opisywanym rysunku nie zaznaczono natomiast węzłów granicznych otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego oraz centralnej części szyb.



Rys. 4.10. Ideowe umiejscowienie węzłów dwuwymiarowej siatki przestrzennej w ramie i w obrzeżu przeszklenia w odniesieniu do temperatury

Każda z dwóch szyb charakteryzuje się określoną stałą w czasie i przestrzeni przewodnością cieplną λ , gęstością ρ i ciepłem właściwym c_p . Szyba ma szerokość X_{szyby} i wysokość Y_{szyby} (rys. 4.6). Rozważania prowadzone w odniesieniu do ramy

zostały opisane w kolejnym punkcie tego rozdziału. Natomiast rozważania odnośnie obrzeża szyby dotyczą obszaru szyby od powierzchni ramy do wysokości/szerokości szyby równej $w_{o,sz}=0,063$ m. Obszar ten podzielono na skończoną liczbę objętości elementarnych z węzłami w środku (liczba węzłów równa 63) wzdłuż współrzędnej y we wnętrzu szyby, każdy w odległości od siebie równej Δy (pierwszy i ostatni w odległości $\Delta y/2$ od granicy obszaru obrzeża). Lokalizację pierwszego i ostatniego węzła obrzeża wzdłuż współrzędnej y ilustruje rys. 4.9.

W związku z dokonaniem podziałem każdy z 63 węzłów obrzeża przeszklenia (każdej z szyb) ma taką samą współrzędną z, w szybie zewnętrznej z_{sz} lub z_{sw} w szybie wewnętrznej. Każdemu z tych węzłów przypisano określone własności, są to: przewodność cieplna, gęstość, ciepło właściwe (stałe w czasie i przestrzeni), a także temperaturę zmienną w czasie. Należy zaznaczyć, że tworząc siatkę przestrzenną węzłów, którym przypisuje się ich temperaturę, uzyskuje się większy rozmiar siatki niż w przypadku podziału przestrzeni dla własności poszczególnych ośrodków, co ilustruje rys. 4.10, uwzględnia się bowiem węzły graniczne (temperaturowe) leżące w sąsiednich ośrodkach. Liczba wszystkich węzłów temperatury dla obrzeża szyby dla współrzędnej y wynosi $J=65$ ($63+2$), przy czym pierwszy $j=1$ i ostatni $j=65$ to węzły brzegowe znajdujące się w innym granicznym ośrodku, tj. w ramie i szybie centralnej odpowiednio.

Rysunek 4.11 przedstawia teoretyczne rozmieszczenie granicznych węzłów temperaturowych obrzeża szyby zewnętrznej od strony ramy, z uwzględnieniem węzłów granicznych temperaturowych wzdłuż współrzędnej z, w poprzek przeszklenia. Wobec przyjętego założenia, że wszystkie węzły w obrzeżu danej szyby są opisane tą samą współrzędną z dla obrzeża szyby zewnętrznej $z=z_{sz}$ węzłami granicznymi temperaturowymi są węzły:

dla współrzędnej z:

- $(y, z_{sz-1}) = (z_a)$ – węzeł reprezentujący jednopunktowo otoczenie zewnętrzne
- $(y, z_{sz+1}) = (y, z_{sw})$ – węzły umiejscowione w obrzeżu szyby wewnętrznej

dla współrzędnej y:

(I, z_{sz}) - jeden węzeł graniczny temperaturowy obrzeża znajduje się w ramie i odpowiada określonej liczbie węzłów ramy, dla których $z=z_{RSZ1+1}, z_{RSZ2+1}, \dots, z_{RSZK+1}$; co dokładnie ilustruje rys. 4.11 i co można zapisać w następujący sposób:

- $(I, z_{sz}) = (Y_{R+1}, z_{RSZ1+1}; z_{RSZK+1})$
- $(J, z_{sz}) = (z_{szc})$ węzeł graniczny znajdujący się w centralnej części przeszklenia, przy czym jest on reprezentatywny dla całej centralnej części przeszklenia.

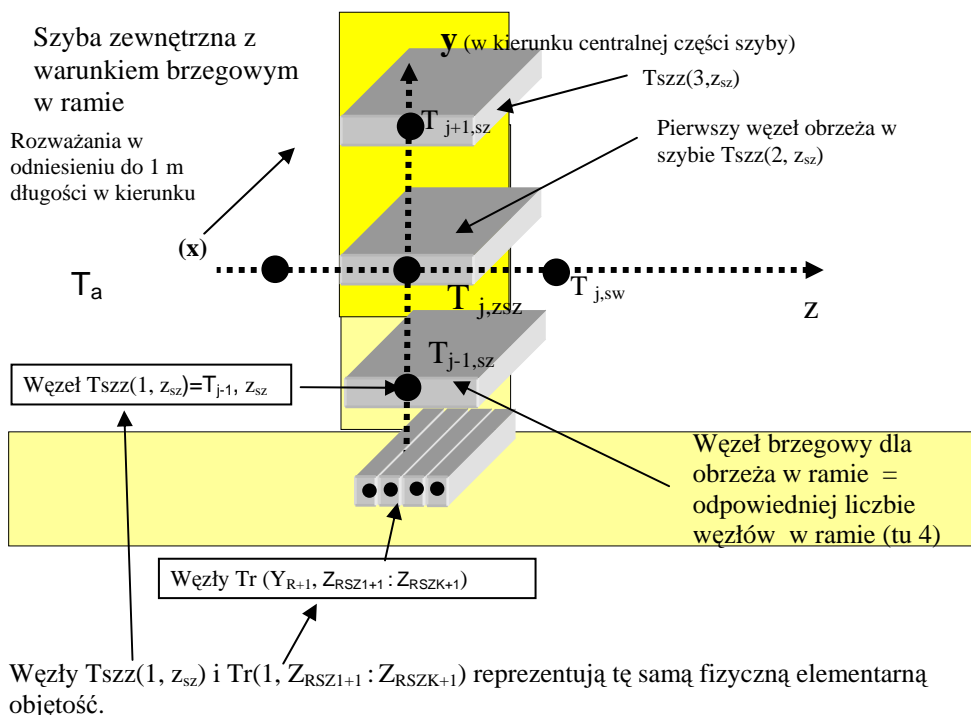
Analogicznie węzłami granicznymi temperaturowymi dla obrzeża szyby wewnętrznej są:

dla współrzędnej z:

- $(y, z_{sw+1}) = (z_w)$ – węzeł reprezentujący jednopunktowo otoczenie wewnętrzne;
- $(y, z_{sw-1}) = (y, z_{sz})$ – węzły umiejscowione w obrzeżu szyby zewnętrznej;

dla współrzędnej y :

- $(J, z_{sw}) = (z_{swc})$ - węzeł graniczny znajdujący się w centralnej części przeszklenia reprezentatywny dla całości centralnej części szyby wewnętrznej.
- $(I, z_{sw}) = (Y_{R+1}, z_{RSW1+1} : z_{RSWk+1})$, - węzeł graniczny temperaturowy obrzeża szyby znajduje się w ramie i odpowiada określonej liczbie węzłów ramy, dla których współrzędna $z = Z_{RSW1}, Z_{RSW2}, \dots Z_{RSWk}$.



Rys. 4.11 Teoretyczne rozmieszczenie granicznych węzłów temperaturowych obrzeża szyby zewnętrznej od strony ramy

Korzystając z rys. 4.9 - 4.11 można wyznaczyć jednostkowe strumienie ciepła dopływające w czasie k do elementarnej objętości kontrolnej obrzeża szyby wokół węzła (j,s) , odpowiednio dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej w następujący sposób:

$$\dot{q}_{sz,y,in} = U_{j-1,s} (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) = U_{j-1,sz} (T_{j-1,sz}^k - T_{j,sz}^k) \quad (4.49)$$

$$\dot{q}_{sw,y,in} = U_{j-1,s} (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) = U_{j-1,sw} (T_{j-1,sw}^k - T_{j,sw}^k) \quad (4.49')$$

$$\dot{q}_{sz,y,out} = U_{j,s} (T_{j,s}^k - T_{j+1,s}^k) = U_{j,sz} (T_{j,sz}^k - T_{j+1,sz}^k) \quad (4.50)$$

$$\dot{q}_{sw,y,out} = U_{j,s} (T_{j,s}^k - T_{j+1,s}^k) = U_{j,sw} (T_{j,sw}^k - T_{j+1,sw}^k) \quad (4.50')$$

$$\dot{q}_{sz,z,in} = U_{j,s-1} (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) = U_{j,a} (T_a^k - T_{j,sz}^k) \quad (4.51)$$

$$\dot{q}_{sw,z,in} = U_{j,s-1} (T_{j,s-1}^k - T_{j,s}^k) = U_{j,szcz} (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) \quad (4.51')$$

$$\dot{q}_{sz,z,out} = U'_{j,s} (T_{j,s}^k - T_{j,s+1}^k) = U_{j,szcz} (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) \quad (4.52)$$

$$\dot{q}_{sw,z,out} = U'_{j,s} (T_{j,s}^k - T_{j,s+1}^k) = U_{j,w} (T_{j,szw}^k - T_w) \quad (4.52')$$

Wzdłuż współrzędnej y we wnętrzu obrzeża szyby współczynniki $U_{j-1,s}$, $U_{j,s}$ [W/m^2K] opisują proces wymiany ciepła przez przewodzenie. Zgodnie z przyjętym założeniem o stałości w czasie i w przestrzeni przewodności cieplnej λ , uwzględniając stałą odległość pomiędzy poszczególnymi węzłami siatki Δy oraz przyjmując notację odpowiadającą węzłom temperatury (rys. 4.10, 4.11), wg której $j=2$ i $j=64$ znajdują się w objętościach graniczących z ośrodkami zewnętrznymi, dla węzłów o współrzędnych $z=z_{sz}$ i $z=z_{sw}$, współczynniki U odpowiadają:

$$U_{j-1,s} = U_{j,s} = U_{sz} = \frac{\lambda_{sz}}{\Delta y} \quad (4.53)$$

czyli:

$$U_{2,s} = U_{3,s} = U_{4,s} = \dots = U_{j,s} \dots = U_{J-2,s} = \frac{\lambda_{sz}}{\Delta y} \quad (4.53')$$

Węzły graniczne temperaturowe wzdłuż współrzędnej y (tzn. węzły (I, z_s) ; (J, z_s)) są umiejscowione w ramie w odległości $\Delta y/2$ odpowiednio od krawędzi rama/szyba i w odległości $\Delta y/2$ od teoretycznej granicy pomiędzy obrzeżem a centralną częścią szyby, co ilustruje rys. 4.10. Wymiana ciepła pomiędzy węzłami granicznymi w ramie a węzłem wewnątrz szyb najbliższym krawędzi szyba/rama zachodzi przez przewodzenie w dwóch ośrodkach: w ramie na długości $\Delta y/2$ i w szybie również na długości $\Delta y/2$ (przy czym $\Delta y = \Delta s$). (Ze względu na różny krok podziału przestrzeni dwuwymiarowej przeszklenia i ramy wzdłuż współrzędnej z węzeł graniczny dla przeszklenia odpowiada kilku węzłom ramy, co opisano wcześniej, rys. 4.11). Graniczne współczynniki U , na granicy szyby zewnętrznej i ramy, lub szyby wewnętrznej i ramy wynoszą:

$$U_{1,sz} = U_{1,sw} = U_{szR} = \frac{1}{\left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{2} \right)}{\lambda_r} \right) + \left(\frac{\left(\frac{\Delta y}{2} \right)}{\lambda_{sz}} \right)} = \frac{2\lambda_r \cdot \lambda_{sz}}{\Delta s(\lambda_r + \lambda_{sz})} \quad (4.54)$$

Formułując model fizyczny okna założono, że przeszklenie wchodzi na pewnej głębokości w głąb ramy, co zaznaczono na rys. 4.10 i 4.11. W związku z tym granica ośrodków przeszklenie/rama przesuwana się na pewną głębokość ramy, a wymiana ciepła zachodzi przez przewodzenie tylko w jednym ośrodku tj. w szkło, co powoduje, że współczynniki $U_{I,sz}$ i $U_{I,sw}$ są opisane równaniem (4.53).

Zgodnie z przyjętym założeniem (wg standardów ASHRAE) w odległości granicznej tj. 0,063 metra od ramy zanika wpływ wzajemnych oddziaływań cieplnych ramy i przeszklenia. Temperatura w węźle granicznym ($J, z_{sz/sw}$) obrzeża szyby (znajdującym się w centralnej części szyby) jest równa temperaturze w ostatnim węźle w obrzeżu szyby ($J-I, z_{sz/sw}$) w danej chwili t_k , czyli dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej można zapisać to jako:

$$T_{sz}^k(J, z_{sz}) = T_{sz}^k(J-I, z_{sz}) = T_{szC}^k \quad (4.55)$$

$$T_{sw}^k(J, z_{sw}) = T_{sw}^k(J-I, z_{sw}) = T_{swC}^k \quad (4.55')$$

Dla współrzędnej z (tak jak dla współrzędnej y) liczba współczynników U jest o 1 mniejsza od liczby węzłów i wynosi 3. W przypadku współczynników $U_{j,s-1}^k = U_{j,a}^k$, $U'_{j,s}^k = U_{j,w}^k$ opisujących wymianę ciepła wzdłuż współrzędnej z mamy do czynienia ze złożoną wymianą ciepła wskutek konwekcji, promieniowania oraz przez przewodzenie. Zgodnie z przyjętym założeniem odnośnie położenia poszczególnych węzłów (wzdłuż współrzędnej z) (rys. 4.7, rys. 4.8a i 4.8b) rozpatruje się tylko po jednej wartości współrzędnej z wewnątrz każdej z szyb, jedna odpowiada położeniu w środku szyby zewnętrznej, druga w środku szyby wewnętrznej.

Przy określaniu współczynnika $U_{j,s-1}^k = U_{j,a}^k$ dla szyby zewnętrznej z równania (4.51) uwzględnia się wymianę ciepła z otoczeniem zewnętrznym przez konwekcję i promieniowanie oraz przez przewodzenie na długości równej połowie grubości szyby δ_{sz} , co można zapisać w następujący sposób:

$$U_{j,s-1}^k \Big|_{sz,z} = U_{j,a}^k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \Big|_{kon,r|a}} \right) + \left(\frac{\left(\frac{\Delta z}{2} \right)}{\lambda_{sz}} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \Big|_{kon,r|a}} \right) + \left(\frac{\left(\frac{\delta_{sz}}{2} \right)}{\lambda_{sz}} \right)} \quad (4.56)$$

W punkcie 4.3.2 tego rozdziału równaniem (4.39) w sposób ogólny opisano odwrotność oporu cieplnego występującego przy wymianie ciepła pomiędzy otoczeniem atmosferycznym, a zewnętrzną szybą (wskutek konwekcji i promieniowania), przy założeniu, że wymiana ciepła odbywa się tylko z bezpośrednim otoczeniem o temperaturze T_a . W równaniu (4.56) analogicznie wymianę ciepła odniesiono tylko do bezpośredniego otoczenia.

W przypadku współczynników opisujących wymianę ciepła w szczelinie, tj. $U'_{j,s}^k = U_{j,szcz}^k$ dla szyby zewnętrznej (z równania (4.52)) i $U_{j-1,s}^k = U_{j,szcz}^k$ (z równania

(4.51') dla szyby wewnętrznej mamy do czynienia z wymianą ciepła przez przewodzenie na długości równej połowie grubości szyby δ_{sz} , następnie wskutek konwekcji i promieniowania w przestrzeni między szybami (równanie (4.40) opisuje odwrotność oporu cieplnego szczeliny gazowej) oraz przez przewodzenie przez połowę grubości drugiej szyby δ_{sz} (obie szyby są identyczne materiałowo i rozmiarowo), co można zapisać jako:

$$U'_{j,s}{}^k \Big|_{sz} = U_{j,s-1}{}^k \Big|_{sw} = U_{j,szcz}{}^k$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{\delta_{sz}}{2} \right) + \left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} \quad (4.57)$$

Współczynnik $U'_{j,s}{}^k = U_{j,w}{}^k$ z równania (4.52') opisuje wymianę ciepła z otoczeniem wewnętrznym wskutek konwekcji i promieniowania (równanie (4.41) opisuje odwrotność oporu cieplny pomiędzy otoczeniem wewnętrznym a wewnętrzną szybą) oraz przewodzenia na długości równej połowie grubości szyby δ_{sz} , co można zapisać jako:

$$U'_{j,s}{}^k \Big|_{sw} = U_{j,w}{}^k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{w}} \right) + \left(\frac{\Delta z}{2} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{w}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} \quad (4.58)$$

Poszczególne powierzchnie kontrolne, przez które przepływają jednostkowe strumienie ciepła odpowiadają:

$$A_y = \Delta z * I_{ob} = \delta * I_{ob} \quad \text{dla } q_y$$

$$A_z = \Delta y * I_{ob} \quad \text{dla } q_z$$

Oznaczenie I_{ob} oznacza jednostkowy obwód przeszklenia. Zgodnie z przyjętym założeniem rozważania prowadzone są w odniesieniu do obwodu, który pośrednio odwzorowuje trzeci wymiar (współrzedną x zaznaczono na rys. 4.7 i rys. 4.11).

Uwzględniając poczynione założenia, korzystając z równań (4.49) – (4.52') określających, strumienie ciepła dopływające i odpływające z węzła (j,s) znajdującego się we wnętrzu szyby zewnętrznej (dla $1 < j < J$) otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
\sum_{j,s} \dot{Q}_{sz}^k &= A_y (\dot{q}_{sz,y,in}^k - \dot{q}_{sz,y,out}^k) + A_z (\dot{q}_{sz,z,in}^k - \dot{q}_{sz,z,out}^k) = \\
&= A_y U_{sz} \left((T_{j-1,sz}^k - T_{j,sz}^k) - (T_{j,sz}^k - T_{j+1,sz}^k) \right) + \\
&+ A_z \left(U_{j,a}^k (T_{j,a}^k - T_{j,sz}^k) - U_{j,szcz}^k (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) \right)
\end{aligned} \tag{4.59}$$

Następnie korzystając z równań (4.53), (4.56) – (4.57) opisujących odpowiednie współczynniki U , po przekształceniach z równania (4.59) otrzymuje się:

(4.59')

$$\begin{aligned}
\sum_{j,s} \dot{Q}_{sz}^k &= \frac{1_{ob}}{\Delta y} \delta_{sz} \lambda (T_{j-1,sz}^k + T_{j+1,sz}^k - 2T_{j,sz}^k) + \\
&- (\Delta y \cdot 1_{ob}) \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}, r|_a} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}, r|_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} \right] (T_{j,sz}^k) + \\
&+ (\Delta y \cdot 1_{ob}) \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}, r|_a} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} (T_a^k) + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}, r|_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} (T_{j,sw}^k) \right]
\end{aligned}$$

Analogicznie suma strumieni ciepła dopływającego i odpływającego z węzła (j,s) znajdującego się we wnętrzu szyby wewnętrznej (dla $1 < j < J$) wynosi:

$$\begin{aligned}
\sum_{j,s} \dot{Q}_{sz,w}^k &= A_y (\dot{q}_{sz,w,y,in}^k - \dot{q}_{sz,w,y,out}^k) + A_z (\dot{q}_{sz,w,z,in}^k - \dot{q}_{sz,w,z,out}^k) = \\
&= A_y U_{sz} \left((T_{j-1,sw}^k - T_{j,sw}^k) - (T_{j,sw}^k - T_{j+1,sw}^k) \right) + \\
&+ A_z \left(U_{j,szcz}^k (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) - U_{j,w}^k (T_{j,sw}^k - T_w) \right)
\end{aligned} \tag{4.60}$$

Następnie uwzględniając równania (4.53), (4.57) – (4.58) opisujących odpowiednie współczynniki U , po przekształceniach z równania (4.60) otrzymuje się dla szyby wewnętrznej:

(4.60')

$$\sum_{j,s} \dot{Q}_{sz,w}^k = \frac{1_{ob}}{\Delta y} \delta_{sz} \lambda (T_{j-1,sw}^k + T_{j+1,sw}^k - 2T_{j,sw}^k) +$$

$$- (\Delta y \cdot 1_{ob}) \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_w} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} \right] (T_{j,sw}^k) +$$

$$+ (\Delta y \cdot 1_{ob}) \left[\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_w} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} \right) (T_w) + \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{ kon, r} |_{sz}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{\lambda_{sz}} \right)} \right) (T_{j,sz}^k) \right]$$

Formułując bilans cieplny szyb poza procesami wyrażonymi poprzez przepływ odpowiednich strumieni ciepła, co opisują równania (4.59) lub (4.59') dla szyby zewnętrznej i równania (4.60) lub (4.60') dla szyby wewnętrznej, należy uwzględnić także pojemność cieplną szyb. Każdej objętości elementarnej $V_{el} = \Delta y \cdot \Delta z \cdot I_{ob}$, w każdej z szyb, wokół węzła (j, s) znajdującego się we wnętrzu obrzeża danej szyby, przyporządkowuje się pojemność cieplną danej objętości elementarnej (rys. 4.8a i 4.8b). Przyjmując, że wszystkie parametry szkła są stałe w czasie i przestrzeni można przyjąć, że pojemność cieplna wszystkich objętości elementarnych jest taka sama, co można zapisać jako:

$$M_{sz}(j,s) \cdot c_{psz}(j,s) = \rho_{sz}(j,s) \cdot (\Delta y \cdot \Delta z \cdot I_{ob}) \cdot c_{psz}(j,s) = \rho_{sz}(\Delta y \Delta z I_{ob}) c_{psz} = M c_{psz} \quad (4.61)$$

Założono, że w węzłach granicznych temperaturowych wzdłuż współrzędnej z , znajdujących się odpowiednio w otoczeniu zewnętrznym i wewnętrznym, czyli w węzłach o współrzędnych $(y, 1)$; $(y, 4)$, pojemność cieplna jest równa zero $M c_p = 0$.

Zagadnienia przepływu energii promieniowania słonecznego przez szyby wymagają uwzględnienia także energii słonecznej zaabsorbowanej w szybach, co wpływa na bilans cieplny całej szyby i rozpatrywanych elementarnych objętości wokół węzłów siatki czasowo-przestrzennej. Natężenie promieniowania zaabsorbowanego w szybie zewnętrznej $S_{sz,z}$ i wewnętrznej $S_{sz,w}$ różni się od siebie, nawet przy szybach o identycznych wymiarach i parametrach. Jeśli przyjmie się, że transmisyjność i refleksyjność szkła jest stała w czasie i przestrzeni, to strumień ciepła zaabsorbowanego w danej chwili w szybie wewnętrznej jest opisany równaniem (4.30) i w szybie zewnętrznej równaniem (4.31). Strumień ciepła zaabsorbowanego

w szybie zewnętrznej i wewnętrznej w określonym przedziale czasu został uwzględniony w rozważaniach jako źródło wewnętrzne ciepła jednej i drugiej szyby odpowiednio.

Dla różnych współrzędnych y , czyli w różnych miejscach szyby (węzłach siatki) ilość zaabsorbowanego ciepła może być różna, bowiem w tym samym czasie wskutek zacielenia powierzchnia okna może być napromieniowywana nierównomiernie. Przyjmując, że zacielenie nie występuje strumień promieniowania słonecznego padający na jednostkowe pole powierzchni szyby zewnętrznej $A_z = \Delta y I_{ob}$ pochłonięty przez tę szybę w danym czasie t i przyjęty jako wewnętrzne źródło ciepła tej szyby może być zapisany jako:

$$\dot{Q}_{sv,SzZ,j}^k = S_{sz,z}^k A_z \quad (4.62)$$

Analogicznie dla szyby wewnętrznej można zapisać :

$$\dot{Q}_{sv,SzW,j}^k = S_{sz,w}^k A_z \quad (4.63)$$

Jak wspomniano wcześniej wymiana ciepła przez promieniowanie zachodzi z bliższym otoczeniem i dalszym, tj. nieboskłonem. Opisuując wymianę ciepła przez promieniowanie z nieboskłonem przyjęto, że nieboskłon jest ciałem doskonale czarnym otaczającym ciało szare, tj. okno. Pozyskane lub tracone ciepło jest traktowane jako wewnętrzne źródło ciepła w zewnętrznej objętości okna, w tym przypadku obrzeża przeszklenia, co opisano następującą zależnością:

$$\dot{Q}_{svN} (y,t) = \varepsilon_o \sigma (T_{nieb}(t)^4 - T_{j,szz}(t)^4) R_d A_z \quad (4.64)$$

Współczynnik widoku nieboskłonu R_d zależy od pochylenia płaszczyzny okna i odpowiada współczynnikowi korekcji promieniowania rozproszonego, a opisuje go równanie (1.29).

Dla szyby zewnętrznej okna rozpatrywane są więc dwa wewnętrzne źródła ciepła, co korzystając z równania (4.62) i (4.64) można zapisać jako:

$$\sum_i (\dot{Q}_{sv,SZ}(y,t)) = (\dot{Q}_{sv,SzZ}(y,t)) + (\dot{Q}_{sv,N}(y,t)) \quad (4.65)$$

Uwzględniając strumienie ciepła dopływające i odpływające z danego węzła wewnątrz obrzeża szyby zewnętrznej, opisane równaniem (4.59) lub (4.59'), a także pojemność cieplną rozważanej objętości elementarnej, opisaną równaniem (4.61), oraz uwzględniając, że dla szyby zewnętrznej ciepło słoneczne absorbowane w danej objętości elementarnej szyby (równanie (4.62)) i ciepło wymieniane z nieboskłonem przez promieniowanie (równanie (4.63)) są traktowane jako źródła wewnętrzne ciepła w szybie, bilans cieplny dla danej objętości (dla dowolnego węzła siatki przestrzennej we wnętrzu szyby) można zapisać w następujący sposób:

dla $2 \leq j \leq J-1$

$$\begin{aligned}
 & A_y U_{sz} \left(T_{j-1,sz}^k + T_{j+1,sz}^k - 2T_{j,sz}^k \right) + \\
 & + A_z \left(U_a^k (T_a^k - T_{j,sz}^k) - U_{sz}^k (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) \right) + \left(\dot{Q}_{sv,SzZ,j}^k \right) + \left(\dot{Q}_{sv,N,j}^k \right) = \\
 & = \frac{Mc_{psz} \left(T_{j,sz}^{k+1} - T_{j,sz}^k \right)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

Analogicznie dla szyby wewnętrznej, uwzględniając równanie (4.63) na wewnętrzne źródło ciepła, równanie bilansu elementarnego można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 & A_y U_{sz} \left(T_{j-1,sw}^k + T_{j+1,sw}^k - 2T_{j,sw}^k \right) + \\
 & + A_z \left(U_{j,szcz}^k (T_{j,sz}^k - T_{j,sw}^k) - U_{j,w}^k (T_{j,sw}^k - T_w) \right) + \dot{Q}_{sv,SzW_{j,s}}^k = \\
 & = \frac{Mc_{psz} \left(T_{j,sw}^{k+1} - T_{j,sw}^k \right)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.67}$$

Z powyższych równań (4.66) i (4.67) po przekształceniach można wyznaczyć nową wartość temperatury obrzeża szyby zewnętrznej lub wewnętrznej $T_{j,s}^{k+1}$ w danym węźle (j,s) w czasie $k+1$. Po przekształceniach temperaturę szyby zewnętrznej, uwzględniając równania (4.53), (4.62) i (4.31), (4.63), i współczynniki $U_{j,a}^k$ i $U_{j,szcz}^k$ w postaci ogólnej (a które są wyznaczone odpowiednio z równań (4.56) i (4.57)) ma ostatecznie postać:

$$\text{dla } 2 \leq j \leq J-1 \tag{4.68}$$

$$\begin{aligned}
 & T_{j,sz}^{k+1} = \\
 & T_{j,sz}^k \left(1 - \frac{\Delta t \cdot 1_{ob}}{Mc_{psz}} \left(\frac{2\delta_{sz} \cdot \lambda}{\Delta y} + \Delta y \left[(U_{j,a}^k + U_{j,szcz}^k) + \varepsilon_o \sigma R_d (T_{j,sz}^k)^3 \right] \right) \right) + \\
 & + \frac{\Delta t \cdot 1_{ob}}{Mc_{psz}} \left[\frac{\delta_{sz} \cdot \lambda}{\Delta y} (T_{j-1,sz}^k + T_{j+1,sz}^k) + \Delta y \left((U_{j,a}^k T_a^k) + (U_{j,szcz}^k T_{j,sw}^k) \right) \right] + \\
 & + \frac{\Delta t}{Mc_{psz}} \left[(\Delta y \cdot 1_{ob}) \left[\left((1 - \rho - \tau) \left(1 + \tau \frac{\rho}{1 - \rho^2} \right) G_s^k \right) + (\varepsilon_o \sigma R_d (T_{nieb}^k)^4) \right] \right]
 \end{aligned}$$

Z kolei zależność szczegółowa na temperaturę szyby wewnętrznej, uwzględniając równania (4.53), (4.63) i (4.30), ma ostatecznie postać:

dla $2 \leq j \leq J-1$

$$\begin{aligned}
 T_{j,sw}^{k+1} = & T_{j,sw}^k \left(1 - \frac{\Delta t \cdot 1_{ob}}{Mc_{psz}} \left(\frac{2\delta_{sz} \cdot \lambda}{\Delta y} + \Delta y (U_{j,szcz}^k + U_{j,w}^k) \right) \right) + \\
 & + \frac{\Delta t \cdot 1_{ob}}{Mc_{psz}} \left[\frac{\delta_{sz} \cdot \lambda}{\Delta y} (T_{j-1,sw}^k + T_{j+1,sz}^k) + \Delta y \left((U_{j,szcz}^k T_{j,sz}^k) + (U_{j,w}^k T_w) \right) \right] + \\
 & + \frac{\Delta t}{Mc_{psz}} \left[(\Delta y \cdot 1_{ob}) \cdot (1 - \rho - \tau) \frac{\tau}{1 - \rho^2} G_s^k \cdot \right]
 \end{aligned} \tag{4.69}$$

Znając pole temperatury w szybach możliwe jest określenia strumienia ciepła wymianianego przez szybę wewnętrzną z otoczeniem wewnętrznym, a więc strumienia wpływającego na bilans cieplny rozważanego obiektu. Obliczając strumień ciepła przepływający pomiędzy szybą wewnętrzną a pomieszczeniem sumuje się strumień ciepła wymianiany z pomieszczeniem przez obrzeże przeszklenia i przez centralną część szyby. W przypadku centralnej części przeszklenia temperatura jej powierzchni $T(J, z_{sw})$ zgodnie z poczynionymi założeniami jest jednakowa w całym obszarze centralnej części przeszklenia w danym czasie t i jest równa temperaturze obrzeża w węzle $T(J-1, z_{sw})$ granicznym z częścią centralną przeszklenia (co opisano równaniami (4.55) i (4.55')). Wysokość obrzeża $h_{obrzeze}$ wynosi 0,0063 metra. Strumień ciepła, który jest doprowadzany lub odprowadzany w danym czasie do otoczenia wewnętrznego (pomieszczenia) z całej powierzchni centralnej części szyby wewnętrznej, można dla dowolnej chwili czasu t zapisać jako:

$$\dot{Q}_{in\ szwC}^k = U_w^k \Big|_{j=J-1} \cdot (T_{J,sw}^k - T_w) \left((X_{szyby} - 2 \cdot h_{ob}) \cdot (Y_{szyby} - 2 \cdot h_{ob}) \right) \tag{4.70}$$

Uwzględniając równanie (4.58) równanie powyższe można zapisać jako: $(4.70')$

$$\dot{Q}_{in\ szwC}^k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{kon,r}^k \Big|_{w,J-1}} \right) + \left(\frac{\frac{\delta_{sz}}{2}}{\lambda_{sz}} \right)} (T_{J,sw}^k - T_w) (X_{szyby} - 2 \cdot h_{ob}) (Y_{szyby} - 2 \cdot h_{ob})$$

Dla samego obrzeża należy uwzględnić zmienność temperatury $T_{j,sw}(t)$ dla współrzędnej y , czyli wzdłuż wysokości obrzeża. Danej współrzędnej y na wysokości obrzeża, czy też węzłowi o współrzędnej (j, z_{zw}) , jest ściśle przyporządkowany obwód obrzeża $l_{ob}(y)$. Rozważany przepływ ciepła odnosi się w specyficzny sposób do trzeciej współrzędnej przestrzennej x , wyrażonej właśnie poprzez odpowiedni obwód obrzeża przeszklenia. Sposób wyznaczania długości

obwodu w sposób poglądowy dla ramy ilustruje rys. 4.6, a matematycznie dla obrzeża przeszklenia można to zapisać jako:

dla $1 < j < J-1$

$$l_{ob,j-1} = 2(X_{szyby} + Y_{szyby}) - 8h_{i,j} = 2(X_{szyby} + Y_{szyby}) - 8\Delta y((j-1) - 0,5) \quad (4.71)$$

Liczba $(j-1)$ oznacza numer (liczbę) węzła (węzłów) od granicy obszaru brzegowego wzdłuż współrzędnej y , wzdłuż wysokości/szerokości obrzeża przeszklenia (całkowita liczba węzłów wewnątrz obrzeża wynosi 63). Węzły znajdują się w środku elementarnych objętości, czyli w objętościach granicznych (przy centralnej części szyby i przy ramie) węzły są w odległości $0,5\Delta y$ od brzegu obszaru granicznego, a dowolna odległość h od wewnętrznego obwodu centralnej części szyby jest równa odpowiednio dla kolejnych węzłów $h_j = (j-1)\Delta y - 0,5\Delta y$. W konsekwencji, korzystając z równania (4.71) sumę strumieni ciepła przepływających przez całą powierzchnię obrzeża przeszklenia do wnętrza można wyznaczyć w sposób ogólny jako:

dla $1 < j < J$

$$\sum_j \dot{Q}_{in\ swOB}^k = \sum_{j=2}^{J-1} (U_{j-1,w}^k \cdot (T_{j,sw}^k - T_w) \cdot \Delta y \cdot l_{ob,j-1}) \quad (4.72)$$

Uwzględniając współczynnik $U_{j,w}^k$ opisany równaniem (4.58) otrzymuje się:

$$\sum_j \dot{Q}_{in\ swOB}^k = \sum_{j=2}^{J-1} \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \left. \begin{smallmatrix} kon, r \\ w \end{smallmatrix} \right|} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} (T_{j,sw}^k - T_w) (\Delta y \cdot l_{ob,j-1}) \quad (4.73)$$

Oprócz przepływu ciepła przez szyby pomiędzy otoczeniem zewnętrznym i wewnętrznym ma miejsce jeszcze bezpośredni przepływ krótkofalowego promieniowania słonecznego. Strumień promieniowania słonecznego G_s , przechodzący przez okno o transmisyjności $\tau_{c,sz}$ (układ dwu identycznych szyb) obliczanej z równania (3.37), można zapisać jako:

$$\dot{Q}_{in,s}(t) = A_c G_s(t) \tau_{c,sz} \quad (4.74)$$

Przy obliczaniu zysków z promieniowania słonecznego istotna jest powierzchnia przeszklenia A_i czy innej przezroczystej osłony, przez którą dociera do wnętrza promieniowanie. Okno może ulegać zacienieniu elementami obudowy budynku i jego otoczenia zewnętrznego. Zacienienie może być uwzględnione dzięki zastosowaniu diagramów drogi Słońca lub sformułowaniu odpowiedniej zależności funkcjonalnej od napromieniowania danej powierzchni, co powinno być przedmiotem szczegółowych rozważań. W rozważaniach przyjęto, że zacienienie nie występuje i w czasie operacji słonecznej cała powierzchnia okna jest wystawiona

na oddziaływanie promieniowania. Założono również, że całe promieniowanie słoneczne przepuszczone przez przeszklenie jest pochłonięte w przegrodach wewnętrznych i innych elementach wnętrza pomieszczenia, czyli absorpcyjność α_{eff} z równania (3.45) jest równa jedności.

Przez szyby do rozpatrywanego pomieszczenia w danym czasie dociera strumień będący sumą strumienia ciepłego $Q_{in,swC}(t)$ docierającego przez centralną część szyby, opisany równaniem (4.70'), strumień docierający przez obrzeże przeszklenia $\sum Q_{in,swOB}(t)$, opisany równaniem (4.73) i strumień promieniowania słonecznego $Q_{in,s}(t)$ (krótkofalowego) opisany równaniem (4.74), co można zapisać jako:

$$\begin{aligned} \Sigma \dot{Q}_{in,swCalk}^k &= \\ &= \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{J-1} k_{kon,r|_w}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} (T_{J,sw}^k - T_w)(X_{szyby} - 2h_{ob})(Y_{szyby} - 2h_{ob}) + \\ &+ \sum_{j=2}^{J-1} \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j k_{kon,r|_w}} \right) + \left(\frac{\delta_{sz}}{2\lambda_{sz}} \right)} (T_{j,sw}^k - T_w)(\Delta y \cdot l_{ob,j-1}) + (X_{szyby} \cdot Y_{szyby}) (G_s^k \cdot \tau_{c,sz}) \end{aligned} \quad (4.75)$$

Wyznaczony z równania (4.75) strumień ciepła dopływający do wnętrza pomieszczenia $Q_{in,swCalk}(t)$ w czasie t przez szyby jest jednym ze składników sumy strumieni ciepła dopływających lub odpływających z budynku, i jest wykorzystywany przy formułowaniu bilansu ciepłego budynku, opisanego równaniem (4.5). Do okna należy też nieprzezroczysta rama, która odgrywa istotną rolę w bilansie energetycznym okna. Formułowaniu bilansu ciepłego dla ramy i określeniu przepływu ciepła przez ramę poświęcono następne punkty tego rozdziału.

4.3.5 Przepływ ciepła przez ramę

Charakterystyczną cechą ramy wpływającą na zachodzące w niej zjawiska jest jej umiejscowienie w przegrodzie zewnętrznej budynku. Rama z jednej strony graniczy z przezroczystą częścią okna, którą tworzą dwie szyby i szczelina gazowa, z drugiej strony z murem budynku, co ideowo zilustrowano na rys. 4.7. Rama kontaktuje się także z otoczeniem zewnętrznym – atmosferycznym i wewnętrznym – pomieszczeniem. Wymianę ciepła rozpatruje się bezpośrednio w układzie dwuwymiarowym, ze współrzędną z wzdłuż grubości ramy i współrzędną y wzdłuż szerokości ramy. Szerokość ramy jest taka sama co do wymiaru, dla całej ramy tzn. części pionowych i poziomych ramy, zawsze wzdłuż przekroju A-A (rys. 4.6). Trzeci wymiar wzdłuż współrzędnej x uwzględnia się pośrednio przez rozłożenie obwodu ramy wzdłuż jednego kierunku (x). Największy jest zewnętrzny obwód, wzdłuż którego rama graniczy ze ścianą zewnętrzną, najmniejszy jest obwód wewnętrzny od strony przeszklenia.

Przyjęto, że rama jest wykonana z jednego materiału (drewna), przy czym szyby wchodzi częściowo w ramę, co zostało uwzględnione w obliczeniach i co ilustruje rys. 4.9 i 4.10. Rama jest ciałem stałym, jednorodnym i izotropowym. Procesy wymiany ciepła w ramie odbywają się przez przewodzenie. Dyfuzyjność ramy a_r jest stała w czasie i przestrzeni ($a_r = \lambda_r / \rho_r c_r$). Pole temperatury w ramie jest opisane nieustalonym równaniem przewodnictwa o postaci:

$$\frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial t} = a_r \left[\frac{\partial^2 T_r(y, z, t)}{\partial y_r^2} + \frac{\partial^2 T_r(y, z, t)}{\partial z_r^2} \right] \quad (4.76)$$

Rama jest konstrukcją złożoną przestrzennie, tworzą ją elementy składowe graniczące z sobą i z innym ośrodkiem, którym jest otoczenie wewnętrzne i zewnętrzne, mur, szyba wewnętrzna i zewnętrzna, szczelina powietrzna między szybami. Na powierzchniach granicznych ramy występują złożone procesy wymiany ciepła. W celu sformułowania modelu zjawisk cieplnych zachodzących w ramie i jej otoczeniu wprowadzono pewne uproszczenia.

Podobnie jak w przypadku przegrody nieprzezroczystej (ściany zewnętrznej) i obrzeża przeszklenia równanie przewodnictwa (4.76) można zapisać w odniesieniu do jednostkowej objętości materiału ramy uwzględniając pojemność cieplną ($Mc_{pr} = V_r \rho_r c_{pr}$ [J/K]), czyli:

$$\frac{1}{V_{i,r}} Mc_{pr} \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial t} = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 T_r(y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_r(y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (4.76')$$

Równanie powyższe może być rozwiązane przy sformułowaniu warunku początkowego i odpowiednich warunków brzegowych na granicach obszarów wymiany ciepła.

Przyjęto, że w chwili początkowej $t_0=0$ wymiana ciepła w ramie jest traktowana jako przewodzenie w stanie ustalonym. Znając wartości temperatur ramy na jej powierzchniach granicznych wzdłuż współrzędnej z (grubość ramy), rozwiązaniem równania przewodnictwa jest równanie liniowe o postaci ogólnej:

$$T(z, t_0) = T_0(z, 0) = C_1 z + C_2$$

Przyjmując, że w chwili początkowej temperatura powierzchni wewnętrznej ramy od strony pomieszczenia odpowiada temperaturze powietrza T_w w pomieszczeniu, a temperatura powierzchni ramy od strony zewnętrznej odpowiada temperaturze T_a powietrza atmosferycznego, wtedy rozkład temperatury w ramie (dla dowolnej współrzędnej y) w chwili początkowej ma postać:

$$T_r(y, z_r, t) \Big|_{t=t_0} = f_{0r}(z_r) = \frac{T_a(t_0) - T_w}{\delta_r} z_r - T_w \quad (4.77)$$

Warunki brzegowe dla poszczególnych powierzchni granicznych można sformułować w sposób ogólny opisany poniżej. Granice obszaru wzdłuż kierunku z mają współrzędne odpowiednio z_0 - od zewnątrz i z_{max} - od wewnątrz. Wymiana ciepła na brzegach obszaru opisana jest warunkiem granicznym, który dla powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej ramy przyjmuje odpowiednio jedną z postaci:

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = h_{z_0}(y, t) [T_a(t) - T_r(y, z, t) \Big|_{z=z_0}] \quad (4.78)$$

$$-\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=z_{max}} = h_{z_{max}}(y, t) [T_r(y, z, t) \Big|_{z=z_{max}} - T_w] \quad (4.79)$$

Podobnie jak w przypadku warunku początkowego i warunków brzegowych dla przegrody nieprzezroczystej, tak i w tym przypadku powyżej sformułowane warunki (równanie (4.77) – (4.79)) nie zapewniają ciągłości rozkładu temperatury na granicy obszaru, ale efekt ten zanika wobec zastosowanej wielokrotnej cykliczności obliczeń (obliczenia prowadzone są dla cykli 10 dniowych), przy tych samych dobowych warunkach otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego. Przy obliczeniach odpowiadających już kilku „identycznym” dniom występuje powtarzalność rozkładu poszczególnych parametrów, w tym temperatur.

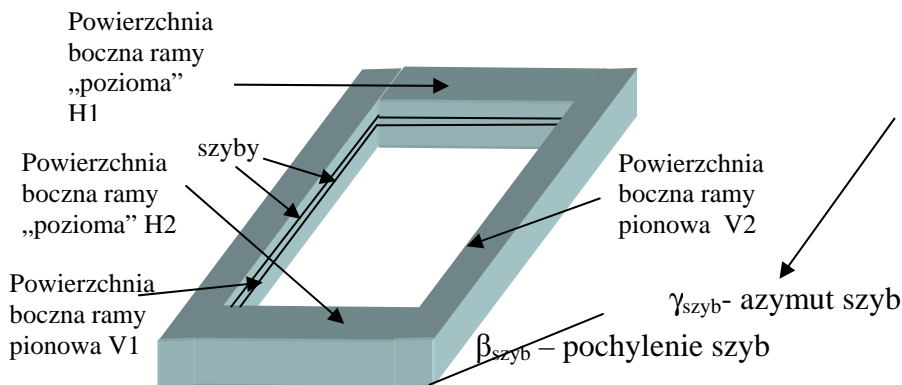
Poszczególne powierzchnie ramy w różnym stopniu „widzą” otoczenie zewnętrzne: bezpośrednio i nieboskłon. Równania (4.78) i (4.79) odnoszą się do czołowych powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych ramy, które są równoległe do szyb. Z otoczeniem zewnętrznym graniczy także część powierzchni ramy prostopadła do szyby, dla której współrzędna $y=y_{max}$ i którą ograniczają współrzędne $z_0 \leq z < z_{sz}$, przy czym $z=z_{sz}$ oznacza współrzędną miejsca kontaktu ramy z szybą zewnętrzną. Podobnie z otoczeniem wewnętrznym graniczy część powierzchni ramy prostopadłej do szyby, dla której również współrzędna $y=y_{max}$ i którą ograniczają współrzędne $z_{sw} < z \leq z_{max}$, czyli od miejsca kontaktu z szybą wewnętrzną do końca ramy od strony

pomieszczenia. Warunki graniczne dla tych powierzchni opisują następujące równania:

$$\text{Dla } z_0 \leq z \leq z_{sz} \quad -\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max}} = h_{zy_{\max}}(y, t) \left[T_r(y, z, t) \Big|_{y=y_{\max}} - T_a(t) \right] \quad (4.80)$$

$$\text{Dla } z_{sw} \leq z \leq z_{\max} \quad -\lambda_r \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max}} = h_{wy_{\max}}(y, t) \left[T_r(y, z, t) \Big|_{y=y_{\max}} - T_w \right] \quad (4.81)$$

Podobnie jak w równaniu (4.78), tak i w równaniu (4.80), współczynniki radiacyjnej wymiany ciepła odnoszą się do bezpośredniego otoczenia zewnętrznego o temperaturze T_a . Wymiana radiacyjna z dalszym otoczeniem, tj. nieboskłonem o temperaturze T_{nieb} , jest uwzględniana poprzez wprowadzenie wewnętrznych źródeł ciepła w granicznych objętościach elementarnych ramy.



powierzchnia V1: $\beta = 90^\circ$, $\gamma = \gamma_{szyb} - 90^\circ$; H1: $\beta = \beta_{szyb} + 90^\circ$, $\gamma = \gamma_{szyb}$;
 powierzchnia V2: $\beta = 90^\circ$, $\gamma = \gamma_{szyb} + 90^\circ$; H2: $\beta = \beta_{szyb} - 90^\circ$, $\gamma = \gamma_{szyb}$

Rys. 4.12. Ideowe usytuowanie różnych powierzchni zewnętrznych ramy

Należy zauważyć, że wszystkie powierzchnie zewnętrzne ramy (od strony otoczenia zewnętrznego) są wystawione na oddziaływanie promieniowania słonecznego, co zostało wzięte pod uwagę przy tworzeniu bilansu cieplnego ramy. Poszczególne powierzchnie ramy są różnie usytuowane względem stron świata, a w konsekwencji względem kierunku padania promieniowania słonecznego. Prowadząc rozważania odnośnie pozyskiwania promieniowania słonecznego można uwzględnić różne usytuowanie poszczególnych powierzchni ramy. Cztery powierzchnie czołowe ramy (równoległe do szyby) są tak samo pochylone i zorientowane jak przeszklenie. Natomiast cztery powierzchnie są prostopadłe do szyby, co ilustruje rys. 4.12. Na rysunku 4.12 zaznaczono powierzchnie „pionowe” (V1 i V2), ich pochylenie jest takie same jak pochylenie przeszklenia, ale kąt azymutalny jest różny od kąta γ (azymutalnego) przeszklenia. Kąt ten dla powierzchni V_1 po lewej stronie jest równy

$\gamma_{szyb}-90^0$, a dla powierzchni V_2 po prawej stronie $\gamma_{szyb}+90^0$. Na rysunku 4.12 zaznaczono także powierzchnie „poziome” ($H1$ i $H2$), ich orientacja (kąt γ azymutalny) jest taka sama jak przeszklenia, natomiast pochylenie odpowiada pochyleniu przeszklenia $\beta+90^0$ dla powierzchni górnej i $\beta-90^0$ dla powierzchni dolnej. Zróżnicowane pochylenie i orientacja są istotne przy obliczaniu napromieniowania poszczególnych powierzchni ramy. Pozyskane ciepło, dzięki oddziaływaniu promieniowania słonecznego, jest traktowane jako wewnętrzne źródło ciepła w zewnętrznych granicznych objętościach ramy.

Rama jest umiejscowiona w murze. W rozważaniach przyjęto, że powierzchnia graniczna: mur - rama jest tak dobrze izolowana, iż można przyjąć, że nie ma wymiany ciepła pomiędzy ramą a murem. Rozważana powierzchnia graniczna jest więc powierzchnią adiabatyczną, oddzielającą wzajemne oddziaływanie cieplne sąsiadujących ze sobą ośrodków: mur - rama okienna. W związku z tym na granicznej powierzchni ramy od strony muru występuje warunek brzegowy o postaci:

$$\left. \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=y_{\min}} = 0 \quad (4.82)$$

W przypadku części powierzchni ramy (rozpórki), która graniczy ze szczeliną gazową wnętrza okna przyjmuje się, że powierzchnia ta jest izolowana i wymiana ciepła pomiędzy tą powierzchnią a szczeliną nie występuje. Warunek graniczny opisuje równanie dla współrzędnej $y=y_{\max}$ i w ograniczonym zakresie dla współrzędnej z , a mianowicie dla: $z_{szcz1} < z < z_{szczk}$, co można zapisać jako:

$$\left. \frac{\partial T_r(y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=y_{\max}, z_{szcz1} \leq z \leq z_{szczk}} = 0 \quad (4.83)$$

Warunki brzegowe występujące na powierzchniach granicznych pomiędzy szybą zewnętrzną a ramą i szybą wewnętrzną oraz ramą zostały opisane w poprzednim punkcie dotyczącym wymiany ciepła przez obrzeże przeszklenia. Są to warunki opisujące równość temperatury i strumieni ciepła na granicy ośrodków wymieniających ciepło, czyli przeszklenia i ramy. W tym przypadku w obu obszarach (teoretycznie o różnym współczynniku przewodności cieplnej) wymiana ciepła zachodzi przez przewodzenie, co zostało opisane równaniami dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej równaniami o postaci (4.47) i (4.47') odpowiednio.

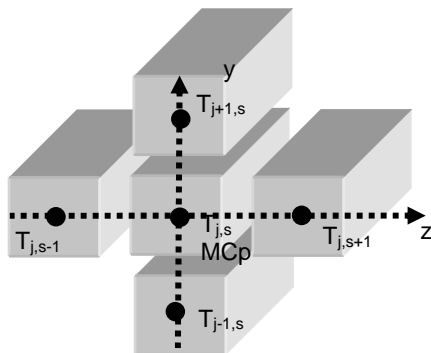
Mając sformułowane równanie przewodnictwa (równanie (4.76) i (4.76')) we wnętrzu ramy w stanie nieustalonym w układzie dwuwymiarowym wraz z jego warunkiem początkowym i warunkami brzegowymi na powierzchniach granicznych rozwiązano zagadnienie wymiany ciepła w ramie stosując metodę bilansów elementarnych. Uzyskano rozkład pola temperatury w ramie i wyznaczono przepływ ciepła przez ramę do wnętrza pomieszczenia, który w sposób ogólny opisuje równanie:

$$\sum_i^n Q_{ri} = \sum_i^n h_{wr} A_{ri} [T_{ri}(y, z, t)|_{w_i} - T_w(t)] \quad (4.84)$$

Symbol i - oznacza liczbę i powierzchni ramy wystawionych na oddziaływanie środowiska wewnętrznego modelowego pomieszczenia. Natomiast A_{ri} oznacza pole danej powierzchni ramy, przez które napływa do wnętrza pomieszczenia strumień ciepła wymieniany przez ramę z otoczeniem zewnętrznym.

4.3.6 Rozwiązanie zagadnienia przepływu ciepła przez ramę przy zastosowaniu metody bilansów elementarnych

W celu rozwiązania zagadnienia przepływu ciepła przez ramę metodą bilansów elementarnych dokonano podziału obszaru przestrzeni na warstwowe elementy przestrzenne (prostokątne). Każdy dowolny węzeł utworzonej siatki przestrzennej jest otoczony przez cztery sąsiednie węzły, znajdujące się w czterech sąsiednich elementarnych objętościach, tak jak pokazano to na rys. 4.13.



Rys. 4.13. Siatka przestrzeni ramy w układzie dwuwymiarowym

Wartość temperatury ramy $T_{rj,s}^{k+1}$ w węźle (j, s) znajdującym się we wnętrzu ramy otrzymuje się na podstawie wartości temperatury w węzłach siatki przestrzennej w poprzedniej płaszczyźnie czasowej, tj. temperatury $T_{rj,s}^k$ oraz temperatury w sąsiednich węzłach tj.: $T_{rj-1,s}^k$, $T_{rj+1,s}^k$, $T_{rj,s-1}^k$, $T_{rj,s+1}^k$. Krok czasowy $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ krok Δy wzdłuż współrzędnej y (wzdłuż szerokości ramy) przyjęto tak samo jak dla szyb, przy czym liczba węzłów jest inna (inne wymiary ramy i obrzeża przeszklenia). Krok przestrzenny Δz w ramie wzdłuż jej grubości różni się od kroku Δz przez przeszklenie, ale równy jest krokowi wzdłuż współrzędnej y w ramie i przeszkleniu, czyli $\Delta z = \Delta y = \Delta s$. Przeprowadzony podział obszaru ramy ilustrują rys. 4.9 i 4.10. Podobnie jak dla stworzonej siatki przestrzennej warstwowych elementów szyby, wprowadzono oprócz węzłów w ramie (rys. 4.9) węzły graniczne znajdujące się w najbliższym otoczeniu ramy, którym przypisano odpowiednie temperatury (rys. 4.10).

Jak wspomniano przy rozważaniach dotyczących szyb, trzecią współrzędną przestrzenną uwzględnia się pośrednio poprzez stosowanie odpowiedniej długości

obwodu. Sposób wyznaczania długości obwodu w sposób poglądowy zilustrowano na rys. 4.6, a w odniesieniu do obrzeża szyby matematycznie opisano to równaniem (4.71). Natomiast w przypadku ramy poszczególne długości obwodu opisuje następujące równanie:

$$l_r(y) = 2(X_{calk} + Y_{calk}) - 8h_{i,j} = 2(X_{calk} + Y_{calk}) - 8\Delta s((j-1) - 0,5) \quad (4.85)$$

Liczba $(j-1)$ oznacza numer (liczbę) węzła (węzłów) wzdłuż szerokości ramy (współrzędna y) od granicy obszaru brzegowego. Węzły znajdują się w środku elementarnych objętości, czyli w objętościach granicznych węzły są w odległości $0,5\Delta s$ od brzegu obszaru granicznego, a dowolna odległość h od wewnętrznego obwodu ramy zaznaczona na rys. 4.6 jest równa $h_i = (j-1)\Delta s - 0,5\Delta s$.

Sposób notacji węzłów i ideowe umiejscowienie węzłów dwuwymiarowej siatki przestrzennej w ramie są przedstawione na rys. 4.9, 4.10, 4.11 i 4.13. Obszar ramy podzielono na skończoną liczbę objętości elementarnych z węzłami (j,s) w środku. Wzdłuż współrzędnej y zgodnie z szerokością ramy liczba węzłów wynosi Y_R (we wnętrzu ramy), każdy w odległości od siebie o $\Delta y = \Delta s$, przy czym pierwszy i ostatni są w odległości $\Delta y/2$ od granicy obszaru obrzeża. Natomiast wzdłuż współrzędnej z zgodnie z grubością ramy liczba węzłów wynosi Z_R (we wnętrzu ramy), każdy w odległości od siebie o $\Delta z = \Delta s$, przy czym pierwszy i ostatni są w odległości $\Delta z/2$ od granicy obszaru ramy. Każdemu z węzłów we wnętrzu ramy przypisano określone parametry w tym: przewodność cieplną, gęstość, ciepło właściwe, które są stałe w czasie i przestrzeni. Poza ramą istnieją węzły zewnętrzne. Węzłom zewnętrznym i wewnętrznym przypisuje się określoną temperaturę, rozmiar siatki dla wszystkich węzłów temperaturowych jest większy niż w przypadku podziału obszaru wewnętrznego, co ilustruje rys. 4.10. Liczba węzłów temperatury wynosi:

$$J' \times S' = (Y_R + 2) \times (Z_R + 2).$$

W celu rozwiązania zagadnienia wymiany ciepła we wnętrzu ramy dla każdej objętości elementarnej we wnętrzu ramy z węzłem (j, s) w środku sformułowano równanie bilansu cieplnego. Skomplikowany układ przestrzenny ramy powoduje, iż zewnętrzne powierzchnie graniczne objętości elementarnych znajdują się w różnych warunkach otoczenia zewnętrznego. Co oznacza, że dla konkretnych wartości współrzędnych węzłów siatki przestrzennej występują szczególne warunki brzegowe wymiany ciepła.

Rama ma określony wymiar: głębokość i szerokość, w określonym miejscu rama kontaktuje się z szybami, co opisuje numerycznie odpowiedni numer węzła wzdłuż współrzędnej z w objętości elementarnej na granicy obszaru rama – szyba zewnętrzna lub rama - szyba wewnętrzna. Węzłami granicznymi dla ramy są węzły:

o określonej stałej współrzędnej z dla wszystkich y :

- $(j, 1)$ – węzły temperaturowe umiejscowione w otoczeniu zewnętrznym od strony czołowej (zewnętrznej) ramy;

- (j, S') – węzły temperaturowe umiejscowione w otoczeniu wewnętrznym od strony czołowej (wewnętrznej) ramy;

o określonej stałej współrzędnej $y=y_{max}$, ($j=J'$), dla pewnych określonych zakresów współrzędnej z :

- węzły temperaturowe w otoczeniu zewnętrznym od strony górnej (zewnętrznej) ramy umiejscowione od krawędzi czołowej ramy do obrzeża szyby zewnętrznej, na rys. 4.10 węzły: $1 \leq s \leq z_{RZ+1}$ dla $j=J'$;
- węzły temperaturowe w otoczeniu wewnętrznym od strony górnej (wewnętrznej) ramy umiejscowione od obrzeża szyby wewnętrznej do krawędzi czołowej ramy, na rys. 4.10 węzły: $z_{RW+1} < s \leq z_{R+2}$, ($z_{R+2}=S'$) dla $j=J'$;
- węzły temperaturowe umiejscowione w obrzeżu szyby zewnętrznej, są to na rys. 4.10 węzły: $s = z_{RSZ1+1}, z_{RSZ2+1}, \dots, z_{RSZK+1}$, dla $j=J'$, które odpowiadają jednemu (uśrednionemu) węzłowi obrzeża przeszklenia (co ilustruje rys. 4.11);
- węzły temperaturowe umiejscowione w obrzeżu szyby wewnętrznej, na rys. 4.10 węzły: $s = z_{RSW1+1}, z_{RSW2+1}, \dots, z_{RSWK+1}$, dla $j=J'$, które odpowiadają jednemu (uśrednionemu) węzłowi obrzeża przeszklenia;
- węzły temperaturowe umiejscowione w szczelinie powietrznej pomiędzy szybami, na rys. 4.10 węzły: $s = z_{RSZCZ1+1}, z_{RSZCZ2+1}, \dots, z_{RSZCZK+1}$ dla $j=J'$;

o określonej stałej współrzędnej $y=y_{min}$, ($j=I$) dla wszystkich z :

- (I, s) - węzły temperaturowe umiejscowione w murze.

Niektórym z powyższych węzłów można przypisać temperaturę w sposób niezależny od zjawisk zachodzących w oknie i jego elementach. Węzły te znajdują się w fikcyjnych objętościach granicznych nieposiadających pojemności cieplnych, na zewnątrz okna i odpowiadają im następujące temperatury:

dla $j=y_{max}=Y_R+2=J'$

$$T_{J',s}^k \Big|_{1 \leq s \leq z_{RZ+1}} = T_a^k \quad (4.86)$$

$$T_{J',s}^k \Big|_{z_{RW1} \leq s \leq z_{S'}} = T_w \quad (4.87)$$

dla $s=I$

$$T_{j,1}^k = T_a^k \quad (4.88)$$

dla $s=S'=z_{R+2}$

$$T_{j,S'}^k = T_w \quad (4.89)$$

Temperaturę w pozostałych węzłach należy obliczyć. W tym miejscu należy zaznaczyć, że występują pewne graniczne węzły temperaturowe, które nie są uwzględniane w obliczeniach bowiem przyjmuje się, że nie występuje wymiana ciepła z tymi węzłami. Dotyczy to węzłów brzegowych w szczelinie powietrznej między

szybami i węzłów w przegrodzie nieprzezroczystej - murze. Jednakże dla ułatwienie zapisu numerycznego, węzłom tym przyporządkowuje się taką samą wartość temperatury jak odpowiednim węzłom sąsiednim, zgodnie z następującymi zależnościami:

dla $j = J'$

$$T_{j,s}^k = T_{J',s}^k \Big|_{z_{szczk+1} \leq s \leq z_{szczk+1}} = T_{J'-1,s}^k \Big|_{z_{szczk+1} \leq s \leq z_{szczk+1}}$$

dla $j = I$

$$T_{j,s}^k = T_{1,s}^k \Big|_{1 < s < S'} = T_{2,s}^k \Big|_{1 < s < S'}$$

Mając określone temperatury w poszczególnych węzłach można wyznaczyć współczynniki proporcjonalności pomiędzy poszczególnymi węzłami. Dla każdej współrzędnej przestrzennej liczba współczynników U jest o jeden mniejsza od liczby węzłów temperaturowych. Podobnie jak w przypadku rozważań przeprowadzonych dla szyb, przy tworzeniu bilansów dla poszczególnych elementarnych objętości kontrolnych można skorzystać z rys. 4.9 - 4.11 i rys. 4.13 i wyznaczyć jednostkowe strumienie ciepła dopływające w czasie k do elementarnej objętości kontrolnej ramy wokół węzła (j,s) znajdującego się we wnętrzu ramy, w następujący sposób:

dla $1 < j < J'$ i $1 < s < S'$

$$q_{r,y,in} = U_{j-1,s}^k (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) \quad (4.90)$$

$$q_{r,y,out} = U_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j+1,s}^k) \quad (4.91)$$

$$q_{r,z,in} = U_{j,s-1}^k (T_{j,s-1}^k - T_{j,s}^k) \quad (4.92)$$

$$q_{r,z,out} = U'_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j,s+1}^k) \quad (4.93)$$

Rozważając współczynniki $U_{j-1,s}^k$, $U_{j,s}^k$, $U_{j,s-1}^k$, $U'_{j,s}^k$, [W/m²K] (z równań (4.90) – (4.93)) w przypadku wymiany ciepła we wnętrzu ramy, mamy do czynienia ze zjawiskiem przewodzenia. Współczynniki te można odpowiednio zapisać uwzględniając przyjęte założenie o stałości w czasie i w przestrzeni współczynnika przewodności cieplnej λ ramy oraz biorąc pod uwagę stały krok przestrzenny dla poszczególnych współrzędnych pomiędzy kolejnymi węzłami siatki (Δy , Δz i $\Delta y = \Delta z = \Delta s$). Współczynniki wymiany ciepła U , w ramie (pomiędzy węzłami w jej wnętrzu) można zapisać w następujący ogólny sposób:

dla $2 < j < J'-1$ i $2 < s < S'-1$

$$U_{j-1,s}^k = U_{j,s}^k = U_{j,s-1}^k = U'_{j,s}^k = \frac{\lambda_r}{\Delta s} = U_r \quad (4.94)$$

czyli :

$$U_{2,s}^k = U_{3,s}^k = U_{4,s}^k = \dots = U_{j,s}^k \dots = U_{j-2,s}^k = U_{j,2}^k = U_{j,3}^k = U_{j,4}^k = \dots = U'_{j,s}^k \dots = U_{j,s'-2}^k = \lambda/\Delta y \quad (4.94')$$

Oprócz węzłów wewnątrz ramy występują węzły graniczne. Węzły te znajdują się odpowiednio w odległości $\Delta y/2 = \Delta z/2 = \Delta s/2$ od krawędzi ramy. Wymiana ciepła pomiędzy węzłami granicznymi w ramie a węzłami w sąsiednim ośrodku: zewnętrznym, wewnętrznym, murze, obrzeżu szyby zewnętrznej, obrzeżu szyby wewnętrznej zachodzi przez przewodzenie w ramie na długości $\Delta s/2$ i wskutek innych złożonych procesów wymiany ciepła, co opisano poniżej.

Wymiana ciepła pomiędzy węzłami umiejscowionymi w otoczeniu zewnętrznym od strony czołowej (zewnętrznej) ramy a pierwszymi węzłami w ramie jest wynikiem:

- konwekcji, z reguły wymuszonej działaniem wiatru;
- promieniowania pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym (gruntem i obiektami w sąsiedztwie) i dalszym otoczeniem - nieboskłonem;
- przewodzenia w ramie.

Uwzględniając wymianę ciepła tylko z bezpośrednim otoczeniem, dla $1 < j < J'-1$ i $s=1$, graniczny współczynnik $U_{j,1}^k$ [W/(m²K)] ma postać:

$$U_{j,1}^k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sum h_j^k \text{kon}, r|_a} \right) + \left(\frac{\Delta s}{2} \right) \left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}|_a + R_o h_{ij}^k r|_a} \right) + \left(\frac{\Delta s}{\lambda_r} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sum h_j^k \text{kon}, r|_a} \right) + \left(\frac{\Delta s}{\lambda_r} \right)} \quad (4.95)$$

Rozważana powierzchnia ramy „widzi” zarówno bezpośrednie otoczenie zewnętrzne o temperaturze T_w , jak i nieboskłon o temperaturze T_{nieb} . Współczynnik „widoku” bezpośredniego otoczenia R_o jest określany jak współczynnik korekcji dla promieniowania odbitego (równanie (1.30)).

Kolejne współczynniki graniczne $U_{j,s'-1}^k$ [W/(m²K)] opisujące wymianę ciepła pomiędzy węzłami w otoczeniu wewnętrznym od strony czołowej (wewnętrznej) ramy a węzłami w objętościach granicznych w ramie. W tym przypadku na granicy dwóch obszarów wymiana ciepła zachodzi wskutek:

- konwekcji swobodnej;
- promieniowania pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a otoczeniem wewnętrznym (przegrodami wewnętrznymi);
- przewodzenia w ramie.

Dla węzłów $1 < j < J'-1$ i $s=S'-1$ wymiana ciepła jest opisana granicznym współczynnikiem $U_{j,s}^k$ [W/(m²K)] o postaci:

$$U_{j,S'-1}^k \Big|_{1 < j < J'-1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sum h_j^k \text{kon}, r|_w} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_j^k \text{kon}|_w + h_j^k r|_w} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} \quad (4.96)$$

Wymiana ciepła pomiędzy węzłami w otoczeniu zewnętrznym od strony górnej (zewnętrznej) ramy a węzłami w objętościach granicznych w ramie umiejscowionymi od krawędzi czołowej ramy (od strony zewnętrznej) do szyby zewnętrznej jest wynikiem:

- konwekcji, z reguły wymuszonej działaniem wiatru;
- promieniowania pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym (gruntem i obiektami w sąsiedztwie) i dalszym otoczeniem - nieboskłonem;
- przewodzenia w ramie.

Dla rozważanych węzłów, dla $j=J'-1$ i $1 < s < z_{RSZ1+1}$ graniczny współczynnik $U_{1,s}^k$ [W/(m²K)], zapisany tylko w odniesieniu do bezpośredniego otoczenia ma postać:

$$U_{J'-1,s}^k \Big|_{1 < s < z_{RSZ1+1}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sum h_j^k \text{kon}, r|_a} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h^k \text{kon}|_a + R_o h_j^k r|_a} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} \quad (4.97)$$

Z kolei od strony pomieszczenia wymiana ciepła pomiędzy węzłami w pomieszczeniu a węzłami w objętościach granicznych w ramie od góry, umiejscowionymi pomiędzy szybą wewnętrzną a krawędzią czołową ramy od strony pomieszczenia jest wynikiem:

- konwekcji swobodnej;
- promieniowania pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a otoczeniem wewnętrznym (przegrodami wewnętrznymi);
- przewodzenia w ramie.

Dla rozważanych węzłów $j=J'-1$ i $z_{RW+1} < s < S'$, graniczne współczynniki $U_{J'-1,s}^k$ [W/(m²K)] mają postać:

$$U_{J'-1,s}^k \Big|_{z_{RW+1} < s < S'} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sum h_j^k \text{kon}, r|_w} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h^k \text{kon}|_w + h_j^k r|_w} \right) + \left(\frac{\frac{\Delta s}{2}}{\lambda_r} \right)} \quad (4.98)$$

Jak wspomniano wcześniej, ze względu na różny krok podziału przestrzeni dwuwymiarowej przeszklenia i ramy węzeł graniczny dla przeszklenia (w ramie)

odpowiada czterem węzłom ramy (dla szyby zewnętrznej rys. 4.11). Wymiana ciepła pomiędzy węzłami granicznymi w ramie a węzłami wewnątrz szyby najbliższymi krawędzi szyby/ramy zachodzi przez przewodzenie teoretycznie w dwóch ośrodkach: w ramie na długości $\Delta y/2 = \Delta s/2$ i w szybie również na długości $\Delta y/2 = \Delta s/2$. Założono, że szyby „wchodzą” w ramę, w związku z tym wymiana ciepła pomiędzy rozważanymi węzłami granicznymi zachodzi w jednym ośrodku - szkle. Natomiast w ramie wzdłuż kierunku z występują dwa ośrodki, węzły temperaturowe (rys. 4.10) $z_{RSZ1+1} - z_{RSZK+1}$ i $z_{RSW1+1} - z_{RSWK+1}$ znajdują się w szkle, a węzły sąsiednie z_{RSZ1} , z_{RSZK+2} , z_{RSW1} , z_{RSWK+2} umieszczone są w ramie drewnianej. Głębokość, na jaką szyby „wchodzą” w ramę opisuje współrzędna y , która dotyczy określonej liczby węzłów temperaturowych o notacji $J_{sz} < j \leq J'$ (J_{sz} jest ostatnim węzłem w szkle). Graniczne współczynniki proporcjonalności dla rozważanych wewnętrznych objętości wzdłuż współrzędnej z można zapisać w następujący ogólny sposób:

$$U^k J_{sz-1 < j < J', s} \Big|_{z_{RSZ1}, z_{RSZK+1}, z_{RSW1}, z_{RSWK+1}} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta s}{\lambda_r} \right) + \left(\frac{\Delta s}{\lambda_{sz}} \right)} = \frac{2\lambda_r \cdot \lambda_{sz}}{\Delta s(\lambda_r + \lambda_{sz})} \quad (4.99)$$

Granica szkło drewno występuje pomiędzy węzłem J_{sz-1} a J_{sz} wzdłuż współrzędnej y (na głębokości szyby) i na grubości szyby, przy czym dotyczy to węzłów temperaturowych (o współrzędnej z) od z_{RSZ1+1} do z_{RSZK+1} dla szyby zewnętrznej i od z_{RSW1+1} do z_{RSWK+1} dla szyby wewnętrznej. Współczynniki $U_{j,s}$, [W/(m²K)] oznaczone odpowiednio dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej wynoszą:

$$U_{J_{sz-1}, s} \Big|_{z_{RSZ1+1} \leq s \leq z_{RSZK}} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta s}{\lambda_r} \right) + \left(\frac{\Delta s}{\lambda_{sz}} \right)} = \frac{2\lambda_r \cdot \lambda_{sz}}{\Delta s(\lambda_r + \lambda_{sz})} \quad (4.99')$$

$$U_{J_{sw-1}, s} \Big|_{z_{RSW1+1} \leq s \leq z_{RSWK}} = \frac{1}{\left(\frac{\Delta s}{\lambda_r} \right) + \left(\frac{\Delta s}{\lambda_{sz}} \right)} = \frac{2\lambda_r \cdot \lambda_{sz}}{\Delta s(\lambda_r + \lambda_{sz})} \quad (4.99'')$$

Jak można zauważyć współczynniki opisane równaniem (4.99), (4.99') i (4.99'') są sobie równe, i są stałe w czasie i przestrzeni, i odpowiadają współczynnikowi U_{SZR} z równania (4.54) czyli można je opisać jako:

$$U_{SZR} = \frac{2\lambda_r \cdot \lambda_{sz}}{\Delta s(\lambda_r + \lambda_{sz})} = \quad (4.99''')$$

$$= U_{J_{sz-1} < j < J', s} \Big|_{z_{RSZ1}, z_{RSZK+1}, z_{RSW1}, z_{RSWK+1}} = U_{J_{sz-1}, s} \Big|_{z_{RSZ1+1} \leq s \leq z_{RSZK}} = U_{J_{sw-1}, s} \Big|_{z_{RSW1+1} \leq s \leq z_{RSWK}}$$

W równaniu powyższym uwzględniono istnienie dwóch ośrodków poprzez odpowiednie współczynniki przewodności cieplnej λ_r i λ_{sz} .

Węzły temperaturowe ramy od $j=J_{sz}$ do $j=J'-1$ i od z_{RSZ1+1} do z_{RSZK+1} dla szyby zewnętrznej i od z_{RSW1+1} do z_{RSWK+1} dla szyby wewnętrznej znajdują się w jednym ośrodku – szkłe. Współczynniki U w tym obszarze są takie same jak w przeszkleeniu (wobec $\Delta y = \Delta s$), co opisano równaniem (4.53), czyli:

$$U_{j-1, s} \Big|_{J_{sz-1} < j < J'-1, z_{RSZ1+1} \leq s \leq z_{RSZK}} = U_{j-1, s} \Big|_{J_{sz-1} < j < J'-1, z_{RSW1+1} \leq s \leq z_{RSWK}} = \frac{\lambda}{\Delta s} = U_{sz}$$

Przyjęto istnienie izolacji na powierzchni granicznej w szczelinie gazowej pomiędzy szybami a ramą. W związku z tym powierzchnia ta jest adiabatyczna i występuje warunek brzegowy opisanym równaniem (4.83), co w odniesieniu do konkretnych węzłów granicznych w szczelinie, tj. dla węzłów $z_{RSZK+1} < s < z_{RSW1+1}$, można zapisać jako:

$$U_{J'-1, szcz} \Big|_{z_{RSZK+1} < s < z_{RSW1+1}} = 0 \quad (4.100)$$

Wprowadzono założenie, że powierzchnia graniczna oddzielająca ramę od przegrody nieprzezroczystej - muru jest tak dobrze izolowana, iż może być rozważana jako adiabatyczna, co opisuje równanie (4.82). W związku z tym dla węzłów granicznych o współrzędnej y odpowiadającej $j=J'-1$ i współrzędnej z : $I < s < S'$) warunek brzegowy można zapisać jako:

$$U_{1, mur} \Big|_{I < s < S'} = 0 \quad (4.101)$$

Mając określone podstawowe zależności na wewnętrzne i zewnętrzne współczynniki proporcjonalności U dla ramy sformułowano równania bilansowe dla elementarnych objętości jej struktury przestrzennej. Na wstępie określono sumę strumieni ciepła dopływających i odpływających z węzła (j, s) znajdującego się w środku rozważanej objętości elementarnej ramy. Poszczególne jednostkowe strumienie ciepła ($q_{y, in}$, $q_{y, out}$, $q_{z, in}$, $q_{z, out}$) przepływają przez powierzchnie kontrolne (A_y , A_z). Suma strumieni ciepła dopływających i odpływających z dowolnego węzła (j, s) we wnętrzu ramy składa się z czterech strumieni składowych (opisanych w sposób ogólny równaniami (4.90) – (4.93)) i odpowiada:

dla $I < j < J'$ i $I < s < S'$

$$\begin{aligned} \sum_{j,s} \dot{Q}_r^k &= A_y (q_{r,y,in}^k - q_{r,y,out}^k) + A_z (q_{r,z,in}^k - q_{r,z,out}^k) = \\ &= A_y \left(U_{j-1,s}^k (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) - U_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j+1,s}^k) \right) + \\ &+ A_z \left(U_{j,s-1}^k (T_{j,s-1}^k - T_{j,s}^k) - U_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j,s+1}^k) \right) \end{aligned} \quad (4.102)$$

gdzie: $A_y = \Delta s I_{ob}$; $A_z = \Delta s I_{ob}$, czyli $A_y = A_z$

Korzystając z równania (4.94) zależność (4.102) na sumę strumieni ciepła, dopływających do węzła (j,s) znajdującego się we wnętrzu ramy i nie mającego kontaktu z węzłami granicznymi, ani z tymi we wnętrzu ramy, które leżą bezpośrednio przy granicy dwóch ośrodków: drewniana rama – szkło oraz uwzględniając powierzchnie jednostkowe A_y i A_z , można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} \sum_{j,s} \dot{Q}_r^k &= (\Delta s \cdot 1_{ob}) \left(\frac{\lambda}{\Delta s} \right) (T_{j-1,s}^k + T_{j+1,s}^k - 2T_{j,s}^k) + \\ &+ (\Delta s \cdot 1_{ob}) \left(\frac{\lambda}{\Delta s} \right) (T_{j,s-1}^k + T_{j,s+1}^k - 2T_{j,s}^k) = \\ &= 1_{ob} \lambda (T_{j-1,s}^k + T_{j+1,s}^k + T_{j,s-1}^k + T_{j,s+1}^k - 4T_{j,s}^k) \end{aligned} \quad (4.103)$$

Zgodnie z przyjętymi założeniami, każda elementarna objętość $V_{el} = \Delta y \cdot \Delta z \cdot I_{ob} = \Delta s^2 \cdot I_{ob}$ ramy wokół węzła (j, s) charakteryzuje się określoną zdolnością do magazynowania ciepła. Oznacza to, że w opisie procesów wymiany ciepła należy uwzględniać także pojemność cieplną ramy. Parametry fizyczne ramy, choć różnią się między sobą w pewnych określonych objętościach elementarnych (w części ramy znajduje się szkło) są stałe w czasie i przestrzeni. Pojemność cieplna danej objętości elementarnej może być zapisana jako:

$$M_r(j, s) \cdot c_{pr}(j, s) = \rho_r(j, s) \cdot (\Delta s \cdot \Delta s \cdot I_{ob}) \cdot c_{pr}(j, s) = \rho_r(j, s) \cdot c_{pr}(j, s) \cdot ds^2 I_{ob} = M c_{pr}(j, s)$$

W części drewnianej ramy pojemność cieplna ramy, jest stała w czasie i przestrzeni, czyli: $M c_{pr}(j, s) = M c_{pr}$, tam gdzie szkło wchodzi w ramę analogicznie dla węzłów w „szklanej” części ramy można zapisać: $M c_{pr}(j, s) = M c_{psz}$. Przyjęto, że w węzłach temperaturowych granicznych znajdujących się w otoczeniu zewnętrznym – atmosferycznym i wewnętrznym pojemność cieplna jest równa zero $M c_p = 0$.

Uwzględniając strumienie ciepła dopływające i odpływające w dwóch kierunkach z węzła znajdującego się w środku danej objętości elementarnej ramy oraz pojemność cieplną danego elementu, a także biorąc pod uwagę istnienie wewnętrznych źródeł ciepła (założenie to dotyczy objętości wokół węzłów granicznych bezpośrednio kontaktujących się z otoczeniem zewnętrznym, co opisano w dalszej części), bilans cieplny dla dowolnego węzła ramy można zapisać w sposób ogólny jako:

dla $1 < j < J'$ i $1 < s < S'$

$$\left[\begin{aligned} &A_y \left(U_{j-1,s}^k (T_{j-1,s}^k - T_{j,s}^k) - U_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j+1,s}^k) \right) + \\ &A_z \left(U_{j,s-1}^k (T_{j,s-1}^k - T_{j,s}^k) - U'_{j,s}^k (T_{j,s}^k - T_{j,s+1}^k) \right) + \sum_{j,s} Q_{sV_{j,s}} \end{aligned} \right] = \quad (4.104)$$

$$= \frac{(Mc_{pr})_{j,s} (T_{j,s}^{k+1} - T_{j,s}^k)}{\Delta t}$$

Z powyższego równania (4.104) można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{j,s}^{k+1}$ w danym wewnętrznym węźle ramy (j,s) w czasie $k+1$, po przekształceniach otrzymuje się:

dla $1 < j < J'$ i $1 < s < S'$

$$T_{j,s}^{k+1} = T_{j,s}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})_{j,s}} \left(A_y (U_{j-1,s}^k + U_{j,s}^k) + A_z (U_{j,s-1}^k + U'_{j,s}^k) \right) \right) + \quad (4.105)$$

$$+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})_{j,s}} \left[\begin{aligned} &A_y \left((U_{j-1,s}^k \cdot T_{j-1,s}^k) + (U_{j,s}^k \cdot T_{j+1,s}^k) \right) + \\ &A_z \left((U_{j,s-1}^k \cdot T_{j,s-1}^k) + (U'_{j,s}^k \cdot T_{j,s+1}^k) \right) + \sum_{j,s} Q_{sV_{j,s}}^k \end{aligned} \right]$$

Dla węzła (j,s) znajdującego się we wnętrzu ramy i nie mającego kontaktu z węzłami granicznymi zewnętrznymi, czyli dla $2 < j < K'-1$ i $2 < s < S'-1$, oraz z węzłami granicznymi wewnętrznymi, które leżą w ramie, ale w innym ośrodku (przy granicy drewniana rama – szkło) równanie (4.105) można uprościć, wymiana ciepła zachodzi tylko wskutek przewodzenia w ramie (w drewnie lub szkło) i nie ma wewnętrznych źródeł ciepła. Otrzymuje się:

$$T_{j,s}^{k+1} = T_{j,s}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} (4 \cdot 1_{ob} \cdot \lambda) \right) + \quad (4.106)$$

$$+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} (1_{ob} \cdot \lambda) \left(T_{j-1,s}^k + T_{j+1,s}^k + T_{j,s-1}^k + T_{j,s+1}^k \right)$$

W przypadku wymiany ciepła zachodzącej z węzłami granicznymi postać równania bilansowego (1.104) odpowiednio komplikuje się, w zależności od procesu wymiany ciepła opisanego poprzez brzegowe współczynniki wymiany ciepła oraz od istnienia wewnętrznych źródeł ciepła w granicznych objętościach elementarnych.

W przypadku wymiany ciepła pomiędzy węzłami umiejscowionymi w otoczeniu zewnętrznym od strony czołowej (zewnętrznej) ramy a pierwszymi węzłami w ramie, obliczenie współczynników radiacyjnej wymiany ciepła jest względnie skomplikowane, bowiem wymiana ciepła zachodzi pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym (gruntem i obiektami w sąsiedztwie) i dalszym otoczeniem - nieboskłonem, przy czym oba te ośrodki mają różne

temperatury. W rozważaniach przyjęto, że wymiana konwekcyjna i radiacyjna zachodzą pomiędzy ramą a bezpośrednim otoczeniem o temperaturze T_a zmiennej w czasie, i obie wymiany są uwzględniane w zapisie współczynnika $U_{j,1}^k$ opisanego równaniem (4.105). Natomiast wymianę ciepła przez promieniowanie z dalszym otoczeniem zewnętrznym – nieboskłonem sprowadzono do zapisu w postaci wewnętrznej źródła ciepła w następujący sposób (dla $1 < j < J'$):

$$Q_{svRj,1}^k = \varepsilon_r \sigma \left[(T_{nieb}^k)^4 - (T_{rj,2}^k)^4 \right] (\Delta s \cdot 1_{ob}) R_d \quad (4.107)$$

Poza promieniowaniem cieplnym jako źródło wewnętrzne traktuje się zyski z promieniowania słonecznego docierającego do rozważanej (odpowiednio pochylonej i zorientowanej) powierzchni ramy. Wszystkie cztery czołowe powierzchnie ramy są tak samo usytuowane (jak przeszklenie), a rama charakteryzuje się określoną absorpcyjnością dla promieniowania słonecznego. Promieniowanie słoneczne pozyskiwane przez czołową powierzchnię ramy $G_{s\beta,\gamma}(t)$ traktowane jako źródło wewnętrzne w granicznych objętościach kontrolnych zostało zapisane jako:

$$Q_{ssRj,1}^k = \alpha_{rs} G_{s\beta,\gamma}^k \cdot \Delta s \cdot 1_{ob} \quad (4.108)$$

Wobec poczynionych założeń, równań (4.107) i (4.108) uwzględniających wewnętrzne źródła ciepła, równanie bilansowe (4.104) dla rozważanych węzłów granicznych dla powierzchni zewnętrznej czołowej ramy, dla $s=2$ i $1 < j < J'-1$ ma postać:

(4.109)

$$\left[\begin{aligned} & A_y \left(U_r (T_{j-1,2}^k - T_{j,2}^k) - U_r (T_{j,2}^k - T_{j+1,2}^k) \right) + \\ & A_z \left(U_{j,1}^k \left[\alpha (T_a^k - T_{j,2}^k) - U_r (T_{j,2}^k - T_{j,3}^k) \right] \right) + \\ & + (\Delta s \cdot 1_{ob}) \left[\varepsilon_r \sigma \left((T_{nieb}^k)^4 - (T_{j,2}^k)^4 \right) R_d - (\alpha_{r,s} G_{s1}^k) \right] \end{aligned} \right] = \frac{(Mc_{pr})(T_{j,2}^{k+1} - T_{j,2}^k)}{\Delta t}$$

Uwzględniając wprowadzone założenia, po przekształceniach z równania (4.109), można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{j,2}^{k+1}$ w rozważanym granicznym węźle ramy ($j,2$) dla $1 < j < J'$ w czasie $k+1$ o postaci:

$$\begin{aligned} T_{j,2}^{k+1} = & T_{j,2}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{Mc_{pr}} \left(1_{ob} (3\lambda + \Delta s \cdot U_{j,a}^k) + \varepsilon_r \sigma (T_{j,2}^k)^3 R_d \right) \right) + \\ & + \frac{\Delta t}{Mc_{pr}} \left[\begin{aligned} & 1_{ob} \left(\lambda (T_{j-1,2}^k + T_{j+1,2}^k + T_{j,3}^k) + (\Delta s \cdot U_{j,a}^k \cdot T_a^k) \right) + \\ & + \varepsilon_r \sigma ((T_{nieb}^k)^4) (\Delta s \cdot 1_{ob}) R_d + \alpha_{rs} G_{s1}^k (\Delta s \cdot 1_{ob}) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.110)$$

W przypadku wymiany ciepła pomiędzy węzłami granicznymi umiejscowionymi w otoczeniu wewnętrznym od strony czołowej ramy a węzłami granicznymi w ramie

zapis granicznego współczynnika $U_{j,S'-I}^k$ [W/(m²K)] jest wyrażony równaniem (4.96). Wymiana ciepła wskutek konwekcji swobodnej i promieniowania zachodzi z tym samym bezpośrednim ośrodkiem o temperaturze T_w stałej w czasie i przestrzeni (i w granicznych objętościach ramy nie ma wewnętrznych źródeł ciepła). Bilans cieplny dla rozważanych węzłów granicznych dla $I < j < J'$, opisany w sposób ogólny równaniem (4.104), otrzymuje postać:

$$\begin{aligned} & \left[(U_r (T_{j-1,S'-1}^k + T_{j+1,S'-1}^k + T_{j,S'-2}^k - 3T_{j,S'-1}^k)) - U_{j,w}^k (T_{j,S'-1}^k - T_w) \right] (\Delta s \cdot 1_{ob}) = \\ & = \frac{(Mc_{pr}) (T_{j,S'-1}^{k+1} - T_{j,S'-1}^k)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.111)$$

Po przekształceniach nowa wartość temperatury ramy $T_{j,S'-I}^{k+1}$ w danym granicznym węźle ramy ($j, S'-I$) dla $I < j < J'$ w czasie $k+1$ ma postać:

$$\begin{aligned} T_{j,S'-1}^{k+1} & = T_{j,S'-1}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} (\Delta s \cdot 1_{ob}) \cdot (3U_r + U_{j,w}^k) \right) + \\ & + \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left[(\Delta s \cdot 1_{ob}) \left(U_r (T_{j-1,S'-1}^k + T_{j+1,S'-1}^k + T_{j,S'-2}^k) + U_{j,w}^k \cdot T_w \right) \right] = \\ & = T_{j,S'-1}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} (1_{ob}) \cdot (3\lambda + \Delta s \cdot U_{j,w}^k) \right) + \\ & + \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left[(1_{ob}) \left(\lambda \cdot (T_{j-1,S'-1}^k + T_{j+1,S'-1}^k + T_{j,S'-2}^k) + \Delta s \cdot U_{j,w}^k \cdot T_w \right) \right] \end{aligned} \quad (4.112)$$

Kolejne rozważania dotyczą wymiany ciepła pomiędzy węzłami w otoczeniu zewnętrznym od strony górnej („poziomej”) ramy a węzłami w objętościach granicznych w ramie. W tym przypadku wymiana ciepła przez promieniowanie zachodzi pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a bezpośrednim otoczeniem zewnętrznym o temperaturze T_a i dalszym otoczeniem - nieboskłonem o temperaturze pozornej T_{nieb} . Dla rozważanych węzłów granicznych o $j=J'-1$ i $I < S < z_{RZK+1}$ współczynniki $U_{J'-1,a}^k$ [W/m²K] w odniesieniu do bezpośredniego otoczenia są opisane równaniem (4.97). Natomiast wymianę ciepła przez promieniowanie z dalszym otoczeniem – nieboskłonem sprowadzono do zapisu w postaci wewnętrznych źródeł ciepła zewnętrznych objętości granicznych ramy w następujący sposób:

$$Q_{svRn,J'-1,s}^k \Big|_{I < S < z_{RZK+1}} = Q_{svRn,J'-1,sa}^k = \varepsilon_r \sigma \left[(T_{nieb}^k)^4 - (T_{J'-1,sa}^k)^4 \right] (\Delta s \cdot 1_{ob}) R_d \quad (4.113)$$

Jako drugie źródło wewnętrzne traktuje się zyski z promieniowania słonecznego docierającego do rozważanej ramy. Zgodnie z przyjętym założeniem, chociaż rozważany model jest dwuwymiarowy, to w sposób pośredni jest wprowadzany trzeci

wymiar i to nie tylko poprzez odniesienie obliczeń do różnych długości obwodu ramy, ale także poprzez uwzględnienie różnego usytuowania płaszczyzn ramy względem padającego promieniowania słonecznego. W obliczeniach uwzględnia się odpowiednie kąty azymutalne i pochylenia w sposób opisany w punkcie 4.4. tego rozdziału. Zyski słoneczne $G_s(t)$ padające na powierzchnię ($\Delta s \cdot I_{ob}$) jednostkową rozważanej ramy o współczynniku absorpcyjności α_{rs} traktowane jako wewnętrzne źródło ciepła można zapisać jako:

$$Q_{svR_s, J'-1, sa}^k = \alpha_{rs} G_{s, J'-1}^k (\Delta s \cdot I_{ob}) \quad (4.114)$$

Ogólnie suma zysków wewnętrznych w granicznych objętościach elementarnych będzie wynosić:

$$\sum Q_{svR, J'-1, sa}^k = \left(\varepsilon_r \sigma \left[(T_{J'-1, s}^k)^4 - (T_{nieb}^k)^4 \right] R_d + \alpha_{rs} G_{s, J'-1}^k \right) (\Delta s \cdot I_{ob}) \quad (4.115)$$

Wobec poczynionych założeń równanie bilansowe dla rozważanych węzłów granicznych dla „górnej” (na rys. 4.10 i 4.11) powierzchni zewnętrznej ramy, dla węzłów $j=J'-1$ i $l < s < z_{RZK+1}$ ma postać:

$$\left[\begin{aligned} & A_y \left(U_r (T_{J'-2, s}^k - T_{J'-1, s}^k) - U_{J'-1, s} (T_{J'-1, s}^k - T_a^k) \right) + \\ & + A_z \left(U_r (T_{J'-1, s-1}^k - T_{J'-1, s}^k) - U_r (T_{J'-1, s}^k - T_{J'-1, s+1}^k) \right) + \sum Q_{svR, J'-1, sa}^k \end{aligned} \right] = \quad (4.116)$$

$$= \frac{(Mc_{pr}) (T_{J'-1, s}^{k+1} - T_{J'-1, s}^k)}{\Delta t}$$

Po przekształceniach można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{J'-1, s}^{k+1}$ w danym granicznym węźle ($J'-1, s$) dla $l < s < z_{RZK+1}$ w czasie $k+1$ o postaci:

$$(4.117)$$

$$\begin{aligned} T_{J'-1, s}^{k+1} &= \\ &= T_{J'-1, s}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left(1_{ob} \left(\left(\Delta s \cdot U_{J'-1, s}^k + 3\lambda \right) + \Delta s R_d \varepsilon_r \sigma (T_{J'-1, s}^k)^3 \right) \right) \right) + \\ &+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left[\begin{aligned} & 1_{ob} \left(\left(\Delta s U_{J'-1, s}^k \cdot T_a^k \right) + \left(\lambda (T_{J'-2, s}^k + T_{J'-1, s-1}^k + T_{J'-1, s+1}^k) \right) \right) + \\ & + (ds \cdot I_{ob}) \left(\varepsilon_r \sigma (T_{nieb}^k)^4 R_d + \alpha_{rs} G_{s, J'-1}^k \right) \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

Kolejnym równaniem bilansowym, które zostało sformułowane jest równanie dla węzłów w objętościach granicznych w ramie w otoczeniu wewnętrznym od strony powierzchni „górnej” ramy. W przypadku wymiany ciepła przez promieniowanie

uwzględnia się wymianę ciepła pomiędzy rozważaną powierzchnią ramy a otoczeniem wewnętrznym (przegrodami wewnętrznymi) o temperaturze T_w . Dla rozważanych węzłów granicznych o współrzędnych $j=J'-1$ i $z_{RSWK+1} < s < S'$, graniczny współczynniki $U_{J'-1,sw}^k$ [W/(m²K)] uwzględnia wymianę konwekcyjną i radiacyjną, które zachodzą pomiędzy ramą a otoczeniem wewnętrznym o temperaturze T_w i został opisany równaniem (4.98). Bilans cieplny dla elementarnej objętości dla rozważanych węzłów granicznych dla „górnjej” powierzchni wewnętrznej ramy, dla $j=J'-1$ i $z_{RSWK+1} < s < S'$, przyjmuje postać:

$$\left[A_y \left(U_r (T_{J'-2,s} - T_{J'-1,s}^k) - U_{J'-1,sw}^k (T_{J'-1,s}^k - T_w) \right) + \right. \\ \left. A_z \left(U_r (T_{J'-1,s-1}^k - T_{J'-1,s}^k) - U_r (T_{J'-1,s}^k - T_{J'-1,s+1}^k) \right) \right] = \frac{Mc_{pr} (T_{J'-1,s}^{k+1} - T_{J'-1,s}^k)}{\Delta t} \quad (4.118)$$

Po przekształceniach z równania (4.118) można wyznaczyć wartość temperatury w danym węźle ramy $T_{J'-1,s}^{k+1}$ w kolejnym kroku czasowym, dla $z_{RSWK+1} < s < S'$, w następujący sposób:

$$T_{J'-1,s}^{k+1} = T_{J'-1,s}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left(I_{ob} (\Delta s \cdot U_{J'-1,sw}^k + 3\lambda_r) \right) \right) + \\ + \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left[I_{ob} (\Delta s (U_{J'-1,sw}^k \cdot T_w) + \lambda_r (T_{J'-2,s}^k + T_{J'-1,s-1}^k + T_{J'-1,s+1}^k)) \right] \quad (4.119)$$

Kolejne rozważania dotyczą sformułowania warunków granicznych pomiędzy węzłami granicznymi w szybie zewnętrznej i ramie oraz szybie wewnętrznej i ramie. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami, na grubości szyby (wzdłuż współrzędnej z) w każdej z szyb występuje tylko jeden węzeł, natomiast w ramie na odcinku odpowiadającym grubości szyby występują cztery węzły umieszczone w czterech objętościach elementarnych, co ilustruje rys. 4.11. Wymiana ciepła zachodzi przez przewodzenie w obu kierunkach (wzdłuż osi z i y). Wzdłuż osi y przewodzenie w granicznych objętościach zachodzi w tym samym ośrodku – w szkło, ponieważ szyba wchodzi w ramę. Współczynniki graniczne dla tych węzłów opisują więc współczynniki przedstawione równaniem (4.53).

Dla współrzędnej y granica szkło - drewno występuje pomiędzy węzłem $J_{sz-1}=J_{Rsz}$ a J_{sz} na grubości szyby dla węzłów temperaturowych od z_{RSZ1+1} do z_{RSZk+1} dla szyby zewnętrznej i od z_{RSW1+1} do z_{RSWk+1} dla szyby wewnętrznej. Współczynniki graniczne dla szyby zewnętrznej i wewnętrznej odpowiadają U_{SZR} i są opisane równaniem (4.99) (równoważnym z równaniem (4.54)).

Natomiast bilans cieplny dla węzłów o współrzędnej (J_{Rsz}, s) leżących w części drewnianej ramy graniczącej z obszarem szkła w ramie, dla szyby zewnętrznej, będzie mieć postać:

dla $z_{RSZ1} < s < z_{RSZk+2}$:

$$\left[\begin{aligned} & A_y \left(U_r (T_{J_{RSz,-1,s}}^k - T_{J_{RSz,s}}^k) - U_{RSz} (T_{J_{RSz,s}}^k - T_{J_{RSz,+1,s}}^k) \right) + \\ & A_z \left(U_r (T_{J_{RSz,s-1}}^k - T_{J_{RSz,s}}^k) - U_r (T_{J_{RSz,s}}^k - T_{J_{RSz,s+1}}^k) \right) \end{aligned} \right] = \quad (4.120)$$

$$= \frac{(Mc_{pr}) (T_{J_{RSz,s}}^{k+1} - T_{J_{RSz,s}}^k)}{\Delta t}$$

Korzystając z równań (4.99''') (lub (4.54)) i (4.53) z powyższego równania można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{J_{RSz,s}}^{k+1}$ w danym wewnętrznym węźle ramy ($J_{RSz,s}$) w czasie $k+1$:

dla $z_{RSz1} < s < z_{RSzk+2}$,

$$T_{J_{RSz,s}}^{k+1} \Big|_{z_{RSz1} < s < z_{RSzk+2}} =$$

$$= T_{J_{RSz,s}}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(3 + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{SZ}}{\lambda_r + \lambda_{SZ}} \right) \right) \right) \right) + \quad (4.121)$$

$$+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(\left(T_{J_{RSz-1,s}}^k + T_{J_{RSz,s-1}}^k + T_{J_{RSz,s+1}}^k \right) + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{SZ}}{\lambda_r + \lambda_{SZ}} \right) T_{J_{RSz+1,s}}^k \right) \right)$$

Analogicznie można zapisać bilans cieplny dla węzłów granicznych leżących w części drewnianej ramy przy szybie wewnętrznej, a następnie wyznaczyć temperaturę ramy $T_{J_{Rsw,s}}^{k+1}$ w danym węźle ramy ($J_{Rsw,s}$), w czasie $k+1$, w następującej postaci:

dla $z_{Rsw1} < s < z_{Rswk+2}$

$$T_{J_{Rsw,s}}^{k+1} \Big|_{z_{Rsw1} < s < z_{Rswk+2}} =$$

$$= T_{J_{Rsw,s}}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(3 + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{SZ}}{\lambda_r + \lambda_{SZ}} \right) \right) \right) \right) + \quad (4.122)$$

$$+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(\left(T_{J_{Rsw-1,s}}^k + T_{J_{Rsw,s-1}}^k + T_{J_{Rsw,s+1}}^k \right) + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{SZ}}{\lambda_r + \lambda_{SZ}} \right) T_{J_{Rsw+1,s}}^k \right) \right)$$

Węzły temperaturowe w szkłe, które wchodzi w drewnianą ramę, tworzą obszar wyznaczony dla współrzędnej y odpowiednio od góry objętościami elementarnymi z węzłami $j=J'-1$, od dołu objętościami z węzłami J_{sz} , i dla współrzędnej po bokach obszaru z węzłami z_{RSZ1+1} i z_{RSZK+1} (dla szyby zewnętrznej) i z_{RSW1+1} i z_{RSWK+1} (dla szyby wewnętrznej). Bilans elementarny dla dowolnego węzła w ramie w części drewnianej o współrzędnej: z_{RSZ1} , z_{RSZK+2} , z_{RSW1} , z_{RSWK+2} , który graniczy z odpowiednim węzłem w szkłe (szyby zewnętrznej i wewnętrznej odpowiednio), można zapisać wykorzystując ogólną postać równania bilansowego (4.104) i odpowiednie graniczne współczynniki proporcjonalności, opisane równaniem (4.99'') i (4.94), i otrzymuje się np. dla:

$$z_{RSZ1} \text{ dla } J_{Rsz} < j < J'-1$$

$$\left[A_y \left(U_r (T_{j-1,RSZ1}^k - T_{j,RSZ1}^k) - U_r (T_{j,RSZ1}^k - T_{j+1,RSZ1}^k) \right) + \right. \\ \left. + A_z \left(U_r (T_{j,RSZ1-1}^k - T_{j,RSZ1}^k) - U_{Rsz} (T_{j,RSZ1}^k - T_{j,RSZ1+1}^k) \right) \right] = \\ = \frac{(Mc_{pr}) \left(T_{j,RSZ1}^{k+1} - T_{j,RSZ1}^k \right)}{\Delta t} \quad (4.123)$$

Powyższe równanie bilansowe ma taką samą postać dla odpowiednich węzłów szyby wewnętrznej o współrzędnej (j, z_{RSW1}) (zamiast (j, z_{RSZ1})). Po przekształceniach temperaturę ramy $T_{j,RSZ1}^{k+1}$ (lub analogicznie $T_{j,RSW1}^{k+1}$) w czasie $k+1$, wyznacza się z zależności:

$$\text{dla } J_{Rsz} < j < J'-1 \quad (4.124)$$

$$T_{j,RSZ1}^{k+1} \Big|_{2 < j < J_{sz}+1} = T_{j,RSZ1}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(3 + \frac{2 \cdot \lambda_{sz}}{(\lambda_r + \lambda_{sz})} \right) \right) \right) + \\ + \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(\left(T_{j-1,RSZ1}^k + T_{j+1,RSZ1}^k + T_{j,RSZ1-1}^k \right) + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{sz}}{(\lambda_r + \lambda_{sz})} \right) \cdot T_{j,RSZ1+1}^k \right) \right)$$

Natomiast bilans elementarny dla dowolnego węzła temperaturowego w ramie w części drewnianej o współrzędnej: z_{RSZK+2} , lub z_{RSWK+2} , który graniczy z odpowiednim węzłem w szkłe (szyby zewnętrznej i wewnętrznej odpowiednio), można zapisać dla z_{RSZK+2} w następujący sposób:

$$\text{dla } J_{Rsz} < j < J'-1$$

$$\left[\begin{aligned} & A_y \left(U_r (T_{j-1, Rszk+2}^k - T_{j, Rszk+2}^k) - U_r (T_{j, Rszk+2}^k - T_{j+1, Rszk+2}^k) \right) + \\ & + A_z \left(U_{Rsz} (T_{j, Rszk+1}^k - T_{j, Rszk+2}^k) - U_r (T_{j, Rszk+2}^k - T_{j, Rszk+3}^k) \right) \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{(Mc_{pr}) (T_{j, Rszk+2}^{k+1} - T_{j, Rszk+2}^k)}{\Delta t} \quad (4.125)$$

Z powyższego równania po przekształceniach temperaturę ramy $T_{j, szk+2}^{k+1}$ (lub analogicznie $T_{j, Rswk+2}^{k+1}$) w czasie $k+1$, wyznacza się z zależności:

$$T_{j, Rszk+2}^{k+1} \Big|_{J_{Rsz} < j < J'-1} = T_{j, Rszk+2}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(3 + \left(\frac{2 \cdot \lambda_{sz}}{\lambda_r + \lambda_{sz}} \right) \right) \right) \right) +$$

$$+ \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left((\lambda_r \cdot 1_{ob}) \cdot \left(\left(\frac{2 \cdot \lambda_{sz}}{\lambda_r + \lambda_{sz}} \right) \cdot T_{j, Rszk+1}^k \right) \right) \left(\left(T_{j-1, Rszk+2}^k + T_{j+1, Rszk+2}^k + T_{j, Rszk+3}^k \right) + \right) \quad (4.126)$$

Równanie bilansowe dla węzłów temperaturowych $j=J'-1$ i $z_{RSZl+1} \leq s \leq z_{RSZK+1}$ dla szyby zewnętrznej oraz $z_{RSWl+1} \leq s \leq z_{RSWK+1}$ dla szyby wewnętrznej ma ogólną opisaną równaniem (1.104). Wymiana ciepła zachodzi w tym przypadku w jednym ośrodku szkła i tylko wskutek przewodzenia (nie ma też wewnętrznych źródeł ciepła). Temperaturę w danym węźle granicznym ramy $T_{2,s}^{k+1}$ w kolejnym kroku czasowym, dla szyby zewnętrznej (dla współrzędnych $j=J'-1$ i $z_{RSZl+1} \leq s \leq z_{RSZK+1}$) oraz szyby wewnętrznej ($j=J'-1$ i $z_{RSWl+1} \leq s \leq z_{RSWK+1}$) opisuje równanie (4.106), w którym współczynnik przewodności cieplnej odnosi się do szkła.

Należy zaznaczyć, że występują jeszcze pojedyncze węzły „narożne”, dla których równania bilansów elementarnych zawierają współczynniki proporcjonalności U inne niż do tej pory opisywane, nie zostały one jednak przedstawione w tym rozdziale, jako mniej istotne dla obrazu całości procesów zachodzących w ramie, ale oczywiście są uwzględnione w obliczeniach numerycznych (całkowita liczba węzłów temperaturowych ramy przyjęta do obliczeń wynosi 7500).

Kolejne objętości graniczne, dla których tworzone są bilanse energii, umiejscowione są w ramie od strony szczeliny gazowej pomiędzy szybami, wokół węzłów $j=J'-1$ i $z_{RSZCZl+1} \leq s \leq z_{RSZCZK+1}$. Zgodnie z poczynionymi założeniami (izolacja na rozpórce w szczelinie) bilans energii dla rozważanych węzłów ma postać:

$$\left[\begin{aligned} & A_y \left(U_r (T_{J'-2,s}^k - T_{J'-1,s}^k) \right) + \\ & + A_z \left(U_r (T_{J'-1,s-1}^k - T_{J'-1,s}^k) - U_r (T_{J'-1,s}^k - T_{J'-1,s+1}^k) \right) \end{aligned} \right] = \frac{(Mc_{pr}) (T_{J'-1,s}^{k+1} - T_{J'-1,s}^k)}{\Delta t} \quad (4.127)$$

Po przekształceniach można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{J'-1,s}^{k+1}$ w danym granicznym węźle ramy ($J'-1,s$) w czasie $k+1$ o postaci:

$$\text{dla } z_{RSZCZ1+1} \leq s \leq z_{RSZCZK+1} \quad (4.128)$$

$$\begin{aligned} T_{J'-1,s}^{k+1} &= \\ &= T_{J'-1,s}^k \left(1 - \frac{3\Delta t \cdot 1_{ob} \cdot \lambda_r}{(Mc_{pr})} \right) + \frac{\Delta t \cdot 1_{ob} \cdot \lambda_r}{(Mc_{pr})} \left(T_{J'-2,s}^k + T_{J'-1,s-1}^k + T_{J'-1,s+1}^k \right) \end{aligned}$$

Kolejne graniczne objętości elementarne ramy znajdują się od strony mury. Równanie bilansowe dla węzłów ograniczonych tymi objętościami granicznymi, czyli dla $j=2$ i $1 < s < S'$ zgodnie z poczynionymi założeniami ma postać:

$$\begin{aligned} & \left[-A_y \left(U_r (T_{2,s}^k - T_{3,s}^k) \right) + A_z \left(U_r (T_{2,s-1}^k - T_{2,s}^k) - U_r (T_{2,s}^k - T_{2,s+1}^k) \right) \right] = \\ & = \frac{(Mc_{pr}) (T_{2,s}^{k+1} - T_{2,s}^k)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.129)$$

Z powyższego równania, po przekształceniach i wprowadzeniu zależności na współczynnik U_r , można wyznaczyć nową wartość temperatury ramy $T_{j,s}^{k+1}$ w danym węźle ramy (j,s) przy granicy z murem w czasie $k+1$, w następujący sposób:

$$(4.130)$$

$$T_{2s}^{k+1} = T_{2,s}^k \left(1 - \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left(3 \cdot 1_{ob} \cdot \lambda_r \right) \right) + \frac{\Delta t}{(Mc_{pr})} \left[(1_{ob} \cdot \lambda_r) \left(T_{3,s}^k + T_{2,s-1}^k + T_{2,s+1}^k \right) \right]$$

Mając sformułowane równania bilansowe we wnętrzu ramy oraz na jej obrzeżu, znając warunek początkowy, uzyskuje się rozkład pola temperatury w ramie. W konsekwencji można wyznaczyć przepływ ciepła przez ramę do wnętrza, który zgodnie z równaniem (4. 84) wyznacza się w następujący sposób:

$$(4.131)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j,s} \dot{Q}_{rj,s}^k &= \\ &= \sum_{j=2}^{J'-1} U_{j-1,S'-1}^k \left(\Delta s \cdot (T_{j,S'-1}^k - T_w) \right) \cdot l_{r,j} + \sum_{s=Z_{RW1+1}}^{S'-1} U_{J'-1,s-1}^k \left(\Delta s \cdot (T_{J'-1,s}^k - T_w) \right) \cdot l_{r,J'-1} \end{aligned}$$

Temperatura pomieszczenia i jego przegród wewnętrznych T_w została przyjęta jako stała w czasie i przestrzeni. Wymiana ciepła przez konwekcję jest odniesiona do różnicy temperatury warstwy przyściennej, która zależy od temperatury ramy i temperatury pomieszczenia, co opisano m.in. w kolejnym punkcie tego rozdziału.

4.4 Określenie współczynników wymiany ciepła i sformułowanie opisu wewnętrznych źródeł ciepła

4.4.1 Zakres rozważań

W tym punkcie rozdziału przedstawiono współczynniki konwekcyjnej i radiacyjnej wymiany ciepła zastosowane w modelu obliczeniowym. Rozważając poszczególne procesy wymiany ciepła zachodzące pomiędzy budynkiem (w tym ścianami zewnętrznymi i oknem) a otoczeniem, w którym budynek i jego elementy znajdują się, wzięto pod uwagę następujące współczynniki przejmowania ciepła:

- współczynniki opisujące wymianę ciepła wskutek konwekcji i promieniowania pomiędzy otoczeniem zewnętrznym a zewnętrzną obudową budynku, na którą składają się: przegroda zewnętrzna nieprzezroczysta – ściana i przegroda zewnętrzna przezroczysta – okno, które z kolei tworzą: nieprzezroczysta rama i przezroczysta szyba (zewnętrzna), składająca się z części centralnej i obrzeża przeszklenia, co opisano w punkcie 4.4.2;
- współczynniki opisujące wymianę ciepła przez konwekcję i promieniowanie w szczelinie gazowej pomiędzy dwoma szybami okna, co opisano w punkcie 4.4.5;
- współczynniki opisujące wymianę ciepła wskutek konwekcji i promieniowania pomiędzy otoczeniem wewnętrznym - pomieszczeniem a wewnętrzną stroną obudowy budynku: ścianą i oknem, w skład którego z kolei wchodzi szyba (wewnętrzna) składająca się z części centralnej i obrzeża przeszklenia oraz nieprzezroczysta rama, co opisano w punkcie 4.4.6.

Jednocześnie w punkcie 4.4.3 opisano sposób wyznaczania temperatury otoczenia zewnętrznego, a w punkcie 4.4.4 modelowania wewnętrznych źródeł ciepła, w granicznych objętościach elementarnych obudowy budynku, pochodzących z energii promieniowania słonecznego.

4.4.2 Współczynniki wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym

W przypadku konwekcyjnej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym rozważa się zagadnienie konwekcji wymuszonej działaniem wiatru. Rzadko warunki otoczenia zewnętrznego są takie, aby rozważać jedynie konwekcję swobodną. Przez szereg lat w analizach z zakresu energetyki słonecznej dość powszechnie stosowano prostą zależność Mac Adamsa z 1954 roku na współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła w funkcji prędkością wiatru, która w 1977 roku została zmodyfikowana przez Watmuffa [75]. W 1976 roku Mitchel zaproponowała stosowanie zależności uogólnionej do całego budynku traktowanego jako powierzchnia sferyczna owiewana wiatrem [75]. Obecnie w analizach energetycznych budynków zaleca się (ISO 2003, [115]) korzystanie z uproszczonej zależności na współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję wymuszoną, która uwzględnia standardowe uśrednione warunki otoczenia zewnętrznego w następujący sposób:

$$\text{zimą: } h_{kon}=20 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (4.132)$$

$$\text{latem: } h_{kon}=8 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (4.132')$$

W obliczeniach, jako okres zimowy traktuje się przedział czasu od listopada do końca marca, jako okres letni przedział czasu od maja do końca września. Wprowadzono też okres przejściowy dla miesiąca kwietnia i października, dla których wartość współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła odpowiada:

$$\text{okres przejściowy: } h_{kon}=12 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (4.132'')$$

Wymianę ciepła przez promieniowanie pomiędzy zewnętrzną obudową budynku: ścianą zewnętrzną i oknem (w tym: przeszklenie i rama) rozważa się uwzględniając istnienie dwóch ośrodków: bezpośredniego otoczenia zewnętrznego (grunt i obiekty w sąsiedztwie) i dalszego otoczenia, którym jest nieboskłon. Oba te ośrodki traktuje się jako ciała doskonale czarne ograniczające całkowicie rozważany budynek. Ściany zewnętrzne, szyba zewnętrzna i rama charakteryzują się różnymi określonymi współczynnikami emisyjności, które przyjęto jako stałe w czasie (dla danej powierzchni). Powierzchnie elementów obudowy budynku mają różne zmienne w czasie temperatury, niektóre z nich zależą także od położenia na danej powierzchni. Współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła rozważanych powierzchni z bezpośrednim otoczeniem wyznacza się w pracy z zależności o postaci ogólnej:

$$h_{i,r,za}(y,t) = \varepsilon_{i,o} \sigma \left((T_{i,z}(y,t)^2 + T_a(t)^2)(T_{i,z}(y,t) + T_a(t)) \right) R_o \quad (4.133)$$

Przy czym indeks i oznacza odpowiedni element obudowy, tj. nieprzezroczystą ścianę zewnętrzną, część centralną szyby, obrzeże przeszklenia i ramę. W zależności od tego, który element jest rozważany współczynnik wymiany ciepła i temperatura mogą być zmienne w czasie lub w czasie i przestrzeni (współrzędna y). Sposób wyznaczania rozkładu temperatury $T_{i,z}(y,t)$ (lub $T_{i,z}(t)$) powierzchni zewnętrznej poszczególnych przegród został opisany w poprzednich punktach tego rozdziału. Natomiast w kolejnym punkcie tego rozdziału opisano sposób określania temperatury otoczenia bezpośredniego – atmosferycznego.

W literaturze z zakresu energetyki słonecznej [89] można znaleźć uśrednione wartości współczynnika radiacyjnej wymiany ciepła z otoczeniem zewnętrznym traktowanym łącznie jako otoczenie bezpośrednie i dalsze, tj. nieboskłon. Uśrednione wartości tego współczynnika odnoszą się do warunków bezchmurnego nieba i wahają się w granicach: $h_{r,z}=5-6 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$.

Wymiana ciepła zachodzi pomiędzy elementami obudowy a nieboskłonem, którego temperatura jest niższa niż temperatura bezpośredniego otoczenia atmosferycznego, a więc warunki wymiany ciepła są inne. W niniejszych rozważaniach wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy elementami obudowy budynku, a dalszym otoczeniem – nieboskłonem została rozważona w odniesieniu do zmieniającej się w czasie pozornej temperatury nieboskłonu i uwzględniono ją w postaci istnienia wewnętrznych źródeł ciepła w objętościach granicznych poszczególnych elementów obudowy, co na przykład w odniesieniu do ramy okiennej opisują równania (4.107) i (4.113). Wymiana ciepła z nieboskłonem staje się bardziej znacząca (niż z otoczeniem

bezpośrednim) przy zmniejszaniu pochylenia powierzchni względem poziomu, osiągając maksimum dla powierzchni poziomych. Sposób wyznaczania temperatury nieboskłonu jest opisany w kolejnym punkcie.

4.4.3 Wyznaczanie temperatury otoczenia zewnętrznego

Rozważania odnośnie wyznaczania temperatury otoczenia zewnętrznego dotyczą określenia temperatury bezpośredniego otoczenia atmosferycznego i otoczenia dalszego reprezentowanego przez pozorny nieboskłon.

Przy określaniu temperatury T_a otoczenia atmosferycznego wykorzystano średnie dzienne wartości temperatury dla poszczególnych miesięcy roku $T_{\text{śred}}(t_m)$, średnie dzienne amplitudy $A_{mp}(t_m)$ i sformułowano model dziennej zmienności temperatury w postaci niesymetrycznej sinusoidy. Zgodnie z obserwacjami pogodowymi [15], [58] przyjęto, że maksymalna wartość temperatury w ciągu doby występuje około godziny 14³⁰, natomiast minimalna przed wschodem słońca. Do wyznaczania temperatury powietrza atmosferycznego T_a w kolejnych godzinach dnia (t_h) dla danego miesiąca (t_m) roku sformułowano następującą zależność:

$$T_a(t_h, t_m) = T_{\text{śred}}(t_m) + [A_{mp}(t_m) \cdot \sin(\pi \cdot (F(t_h, t_m)))] \quad (4.134)$$

$T_{\text{śred}}(t_m)$ średnia temperatura powietrza atmosferycznego w danym miesiącu roku,

$A_{mp}(t_m)$ średnia amplituda temperatury powietrza zewnętrznego w m -tym miesiącu roku

$F(t_h, t_m)$ poprawka temperatury powietrza atmosferycznego w m -tym miesiącu roku, będąca również zmienną godzinową.

Poprawka temperatury dla poszczególnych pór dnia została sformułowana w następujący sposób:

$$F(t_h, t_m) = \frac{0,5 + t_h - t_{\text{min us}}(t_m)}{(t_{\text{wsch}}(t_m) - 1) - t_{\text{min us}}(t_m)} \quad \text{dla } t_h < t_{\text{wsch}}(t_m) \quad (4.135a)$$

$$F(t_h, t_m) = \frac{-0,5 + t_h - (t_{\text{wsch}}(t_m) - 1)}{t_{\text{max}} - (t_{\text{wsch}}(t_m) - 1)} \quad \text{dla } t_{\text{wsch}}(t_m) \leq t_h < t_{\text{max}} \quad (4.135b)$$

$$F(t_h, t_m) = \frac{0,5 + t_h - t_{\text{max}}}{t_{\text{plus}}(t_m) - t_{\text{max}}} \quad \text{dla } t_h \geq t_{\text{max}} \quad (4.135c)$$

Do obliczeń poprawki temperatury $F(t_h, t_m)$ powietrza atmosferycznego wykorzystuje się godzinę wschodu $t_{\text{wsch}}(t_m)$, która jest zależna od długości dnia słonecznego $T_d(t_m)$ (opisanej równaniem (1.24)), i którą wyznacza się z następującej zależności:

$$t_{\text{wsch}}(t_m) = 12 - T_d(t_m) / 2 \quad (4.136)$$

Przyjęto także inne następujące wielkości:

$$\begin{aligned}
 t_{\max} &= 14,5 && \text{odpowiada godzinie } 14^{30}, \text{ o której zwykle} && (4.137) \\
 & && \text{występują maksymalne dzienne temperatury;} \\
 t_{\min us}(t_m) &= t_{\max} - 24 && \text{odpowiada czasowi (godzinie) występowania} && (4.137') \\
 & && \text{maksymalnej dziennej temperatury jeden dzień} \\
 & && \text{wcześniej;} \\
 t_{\text{plus}}(t_m) &= && \text{odpowiada czasowi (godzinie) występowania} && (4.137'') \\
 & = (t_{\text{wsch}}(t_m) - 1) + 24 && \text{minimalnej dziennej temperatury jeden dzień} \\
 & && \text{później.}
 \end{aligned}$$

Temperatura nieboskłonu jest wyznaczana w funkcji temperatury powietrza atmosferycznego, określonej powyżej. W uproszczonych obliczeniach stosuje się zwykle [75] prostą zależność, wg której temperatura nieboskłonu jest o sześć stopni wyższa od temperatury otoczenia atmosferycznego.

W rozprawie zagadnienie potraktowano bardziej szczegółowo. Nieboskłon rozważono jako ciało doskonale czarne o temperaturze $T_{nieb}(t)$ [K], które emituje promieniowanie cieplne o gęstości strumienia L_{nieb} [W/m^2] [60], czyli:

$$L_{nieb}(t) = \sigma(T_{nieb}(t))^4 \quad (4.138)$$

Strumień promieniowania nieboskłonu zależy od stanu zachmurzenia atmosfery. Gęstość strumienia promieniowania nieboskłonu L_{czyst} [Wm^{-2}] dla warunków czystego nieba (bezchmurnego) można wyznaczyć w funkcji temperatury otoczenia zewnętrznego $T_a(t)$ [K] z formuły Swinbanka [218] o postaci:

$$L_{czyst}(t) = 5,31 \cdot 10^{-13} (T_a(t))^6 \quad (4.139)$$

W modelu Swinbanka przyjmuje się, że chmury mają temperaturę o pięć stopni niższą od temperatury otoczenia zewnętrznego i ich emisyjność ε_c dla promieniowania długofalowego wynosi $\varepsilon_c = 0,96$. Gęstość strumienia promieniowania nieboskłonu L_{chm} [W/m^2] dla nieba zachmurzonego wyznacza się z zależności:

$$L_{chm}(t) = \varepsilon_c \cdot \sigma(T_a(t) - 5)^4 \quad (4.140)$$

Rzeczywisty stan nieba jest stanem pośrednim pomiędzy niebem czystym a zachmurzonym. Strumień promieniowania nieboskłonu zbliżonego do stanu rzeczywistego jest aproksymowany [60] zależnością o postaci:

$$L_{nieb}(t) = (1 - c(t)) \cdot L_{czyst}(t) + c(t) \cdot L_{chm}(t) \quad (4.141)$$

Współczynnik c określa stan atmosfery, a przede wszystkim stopień pokrycia nieba chmurami i jest określany w funkcji współczynnika K_d opisującego udział promieniowania dyfuzyjnego w promieniowaniu całkowitym. Współczynnik K_d jest określany na podstawie zależności aproksymacyjnych lub pomiarów w funkcji indeksu przejrzystości nieba K_T , jego uśrednione wartości dla różnych szerokości geograficznych można też znaleźć w literaturze [75]. W formule Swinbanka przy

czystym niebie udział promieniowania dyfuzyjnego jest określany na poziomie 16,5% ($K_d=0,165$) i współczynnik c w funkcji K_d jest wyznaczany jako:

$$c(t) = (K_d(t) - 0,165) / 0,835 \quad (4.142)$$

Po przekształceniach, wykorzystując równania (4.139) – (4.42), temperaturę pozorną nieboskłonu otrzymuje się z równania (4.138), w postaci:

$$T_{nieb}(t) = \sqrt[4]{\frac{\left(1 - \frac{K_d(t) - 0,165}{0,835}\right) \left(5,31 \cdot 10^{-13} \cdot T_a(t)^6\right) + \frac{K_d(t) - 0,165}{0,835} \left(\varepsilon_c \sigma (T_a(t) - 5)^4\right)}{\sigma}} \quad (4.143)$$

W literaturze z zakresu energetyki słonecznej [213] można spotkać uproszczoną formułę Swinbanka (T_{nieb} i T_a [K]) o postaci: $T_{nieb}(t) = 0,0552 \cdot (T_a(t))^{1,5}$. W pracy do obliczeń wykorzystano zależność (4.143).

4.4.4 Wewnętrzne źródło ciepła jako efekt oddziaływania promieniowania słonecznego

Oddziaływanie promieniowania słonecznego na powierzchnię zewnętrzną przegrody nieprzezroczystej – ściany, okna w tym części przezroczystej - przeszklenia i nieprzezroczystej - rami uwzględniono w postaci istnienia wewnętrznych źródeł ciepła o określonej mocy $Q_{sv,Rt}(t)$ w zewnętrznych granicznych elementarnych objętościach przegród. Przyjęto, że wewnętrzne źródło ciepła powstaje w wyniku pochłaniania w danej elementarnej objętości strumienia energii promieniowania słonecznego $G_s(t, \beta, \gamma)$ podającego w danym czasie na jednostkowe pole powierzchni zewnętrznej tej przegrody A_{pi} . W celu wyznaczenia strumienia energii, jaką niesie promieniowanie słoneczne docierające w danym czasie do powierzchni zewnętrznej przegrody o określonym usytuowaniu, korzysta się z równania (1.42) przyjmując model anizotropowy HDKR promieniowania słonecznego. Powierzchnie obudowy budynku, takie jak nieprzezroczyste ściany, szyby i powierzchnie czołowe rami okiennej są wszystkie tak samo usytuowane względem Słońca, co opisuje ich kąt pochylenia β i kąt azymutalny γ . Natomiast boczne wewnętrzne powierzchnie rami okiennej są usytuowane w różny sposób, co ilustruje rys. 4.12. Na rysunku tym zaznaczono dwie powierzchnie boczne wewnętrzne „pionowe” (V1 i V2) rami i dwie „poziome” (H1 i H2). Dla powierzchni tych zachodzą następujące zależności kątowe względem parametrów (kątowych) określających ich usytuowanie:

$$\begin{array}{ll} \text{V1:} & \beta = 90^\circ, & \gamma_1 = \gamma_{szyb} - 90^\circ; \\ \text{V2:} & \beta = 90^\circ, & \gamma_2 = \gamma_{szyb} + 90^\circ; \\ \text{H1:} & \beta = \beta_{szyb} + 90^\circ & \gamma = \gamma_{szyb}; \\ \text{H2:} & \beta = \beta_{szyb} - 90^\circ, & \gamma = \gamma_{szyb}. \end{array}$$

Powierzchnie boczne rami V1 i V2 są równoległe do siebie, zawsze pionowe, niezależnie od lokalizacji okna, zwrócone w przeciwne strony, ich kąt azymutalny jest

o $\pm 90^\circ$ różny od kąta powierzchni czołowej, a one same zawsze różnią się o kąt $\pm 180^\circ$. W przypadku powierzchni bocznych „poziomych” $H1$ i $H2$ mają one ten sam kąt azymutalny, co powierzchnia czołowa, czy szyba, ale inne pochylenie różne o $\pm 90^\circ$. Pochylenie tych powierzchni względem siebie zawsze różni się o kąt $\pm 180^\circ$.

Obie powierzchnie pionowe ramy łącznie „widzą” tę samą część pozornego nieboskłonu, co powierzchnia czołowa ramy, czy przeszklenia (każda z pionowych bocznych powierzchni „widzi” tylko połowę). Taka sama sytuacja zachodzi w przypadku „poziomych” powierzchni ramy. W związku z tym przy wyznaczaniu promieniowania dyfuzyjnego docierającego z pozornego nieboskłonu do powierzchni bocznych ramy przyjęto, że gęstość strumienia padającego na powierzchnie „pionowe” i „poziome” ramy odpowiada połowie gęstości strumienia promieniowania dyfuzyjnego padającego na powierzchnię czołową ramy, czy przeszklenia. Promieniowanie dyfuzyjne w tym przypadku dotyczy izotropowego promieniowania rozproszonego atmosfery, promieniowania rozproszonego jaśniejącego horyzontu i promieniowania odbitego. Korzystając z równania (1.42) można godzinne napromieniowanie powierzchni bocznych „pionowych” i „poziomych” ramy (w określonym czasie) zapisać w następujący ogólny sposób (kąty β i γ są kątami opisującymi usytuowanie powierzchni czołowych ramy):

$$I_{d, rV/H}(t) = \frac{1}{2} \left[I_d(t) (1 - A_i(t)) \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \left[1 + f(t) \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + I(t) \rho_g \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right] \quad (4.144)$$

W przypadku promieniowania bezpośredniego i dyfuzyjnego okołosłonecznego sytuacja jest bardziej skomplikowana. Promieniowanie bezpośrednie i okołosłoneczne dociera do okna, jeżeli dla powierzchni czołowej ramy (i szyby) $\cos(\theta)$ kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego (opisany równaniem (1.4)) jest większy od zera (powierzchnia czołowa ramy i szyby „widzi” Słońce) i jeżeli współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego R_b (dla powierzchni czołowych), opisany w sposób ogólny równaniem (1.31), a w sposób szczegółowy równaniem (1.32), jest większy od zera. Jednocześnie, gdy promieniowanie bezpośrednie dociera do przegrody jedna z powierzchni „pionowych” i jedna z „poziomych” „widzi” Słońce (druga nie) i dla nich liczony jest odpowiedni kąt padania promieniowania $\cos(\theta_i)$ z równania (1.4) uwzględniając jej kąt pochylenia β_i i kąt azymutalny γ_i (liczona jest wartość bezwzględna wobec równości $\cos(\theta_i) = -\cos(\theta_2)$), co można wyprowadzić z równania (1.4) podstawiając odpowiednie kąty β , γ . Ponadto liczony jest współczynnik korekcyjny R_{bV} i R_{bH} dla odpowiedniej części „pionowej” i „poziomej” ramy, które widzą Słońce (równoległe przeciwne powierzchnie nie widzą) z odpowiednio uproszczonej postaci równania (1.32). Następnie liczone jest godzinne napromieniowanie promieniowaniem bezpośrednim i okołosłonecznym danej powierzchni ramy, co korzystając z równania (1.42), odpowiednio dla powierzchni „pionowej” V i „poziomej” H można zapisać jako:

$$I_{br,V}(t) = \frac{1}{2} \left(I_b(t) + I_d(t) A_i(t) \right) R_{b,V}(t) \quad (4.145)$$

$$I_{br,H}(t) = \frac{1}{2} \left(I_b(t) + I_d(t) A_i(t) \right) R_{b,H}(t) \quad (4.145')$$

Promieniowanie półsferyczne docierające do bocznych powierzchni ramy jest obliczane jako średnia ważona napromieniowania poszczególnych płaszczyzn ramy na ich powierzchni (X szerokość szyby odpowiada długości ramy „poziomej”, Y wysokość szyby odpowiada długości ramy „pionowej”). Uwzględniając równanie (4.144) – (4.145') napromieniowanie półsferyczne bocznej powierzchni ramy odpowiada:

$$I_{r,C}(t) = \frac{Y_{sz} \left(I_{br,V}(t) + I_{dr}(t) \right) + X_{sz} \left(I_{br,H}(t) + I_{dr}(t) \right)}{Y_{sz} + X_{sz}} \quad (4.146)$$

Traktując zyski z promieniowania słonecznego jako źródło wewnętrzne w granicznych objętościach kontrolnych rozpatrywanych powierzchni ramy o współczynniku absorpcyjności α_{rs} i korzystając z równania (4.114), otrzymuje się (stosując notację uproszczoną:

$$\begin{aligned} Q_{svRs,j,1sa}^k &= \alpha_{rs} I_{r,C}^k \cdot (\Delta s \cdot 1_{ob}) = \\ &= (\alpha_{rs} \cdot (\Delta s \cdot 1_{ob})) \frac{Y_{sz} \left(I_{br,V}^k + I_{dr}^k \right) + X_{sz} \left(I_{br,H}^k + I_{dr}^k \right)}{Y_{sz} + X_{sz}} \end{aligned} \quad (4.147)$$

Jak wspomniano zyski z promieniowania słonecznego dla pozostałych elementów obudowy określa się wykorzystując obliczone z równania (1.42) napromieniowanie półsferyczne danej powierzchni obudowy budynku. Dana powierzchnia obudowy i jej elementy składowe mają taki sam kąt pochylenia i kąt azymutalny, z wyjątkiem rozważonych powyżej powierzchni bocznych ramy.

4.4.5 Współczynniki wymiany ciepła w szczelinie powietrznej między szybami

W przypadku konwekcyjnej wymiany ciepła w szczelinie gazowej (powietrznej) można znaleźć w literaturze [107] zależności związane z różnym pochyleniem szczeliny i powierzchni ją ograniczających. Współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła w szczelinie w sposób ogólny opisuje zależność tego współczynnika od liczby kryterialnej Nusselta o postaci:

$$h_{k,szcz}(t) = Nu(t) \frac{\lambda_{szcz}}{L}$$

gdzie wymiar charakterystyczny L oznacza szerokość szczeliny d_{szcz} gazowej.

W rozważaniach z zakresu energetyki słonecznej dla powierzchni pochylonych pod kątem β mniejszym niż 60° stosuje się zależność Hollandsa [105] o postaci:

$$Nu = 1 + 1,446 \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right)^+ \left(1 - \frac{(\sin(1,8\beta))^{1,6} 1708}{Ra \cdot \cos \beta} \right) + \left(\left(\frac{Ra \cdot \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right)^+ \quad (4.148)$$

Znak+ oznacza, że tylko wartości dodatnie wyrażeń znajdujących się w nawiasach są brane pod uwagę, a kąt β oznacza pochylenie szczeliny. Równanie (4.148) jest spełnione, jeśli wysokość szczeliny, odpowiadająca w rozważaniach wysokości szyby Y_{sz} , jest co najmniej 20 razy większa od szerokości szczeliny, czyli:

$$Y_{sz} / d_{szcz} \geq 20$$

Jednocześnie równanie kryterialne (4.148) obowiązuje dla warunków przepływu ciepła z wewnątrz na zewnątrz, czyli gdy temperatura szyby wewnętrznej jest większa niż szyby zewnętrznej. Jeżeli sytuacja jest odwrotna zamiast kąta β wprowadza się do równania (4.148) kąt $(180^{\circ} - \beta)$. Występująca w równaniu liczba Nusselta jest określana w funkcji liczby kryterialnej Rayleigha, która ma następującą postać:

$$Ra(t) = \frac{g\beta\rho^2 c_p L^3}{\lambda\mu} \Delta T(t)$$

Występująca w powyższym równaniu różnica temperatur ΔT w poprzek szczeliny odnosi się do różnicy temperatury pomiędzy szybą zewnętrzną i wewnętrzną w ich centralnej części (wartość bezwzględna).

Poszczególne własności powietrza w szczelinie są wyznaczane dla średniej temperatury powietrza w szczelinie $\bar{T}_{szcz}(t)$, która jest przyjmowana jako średnia arytmetyczna temperatura centralnej części obu szyb w danym czasie, co można zapisać jako:

$$\bar{T}_{szcz}(t) = \frac{1}{2} (T_{szC}(t) + T_{swC}(t))$$

Zakłada się przy tym, że poszczególne własności powietrza zmieniają się w sposób liniowy w funkcji temperatury, co przykładowo dla lepkości dynamicznej powietrza może być wyrażona jako:

$$\mu(t) = a + b \cdot \bar{T}_{szcz}(t) \quad (4.149)$$

Współczynniki a i b odpowiadają wartości lepkości (lub innej własności powietrza) odpowiednio w temperaturze 250 i 350 K.

Dla powietrznej szczeliny pionowej można stosować zależność kryterialną opracowaną przez Shewena (1996) [211] o postaci:

$$Nu = \left[1 + \left(\frac{0,0665 Ra^{1/3}}{1 + (9000/Ra)^{1/4}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Wright [243] na podstawie powyższej zależności opracował w postaci graficznej zależność $Nu = f(Ra)$ dla szczelin gazowych, dla których stosunek wysokości do szerokości szczeliny jest większy od 20. Następnie stworzył zależności korelacyjne dla powietrznych szczelin pionowych w oknach [244] o następującej postaci:

$$Nu_{1,90} = 0,06738 Ra^{1/3} \quad 5 \cdot 10^4 < Ra \quad (4.150)$$

$$Nu_{1,90} = 0,02815 Ra^{0,4134} \quad 10^4 < Ra \leq 5 \cdot 10^4 \quad (4.150')$$

$$Nu_{1,90} = 1 + 1,75967 \cdot 10^{-10} Ra^{2,2985} \quad Ra \leq 10^4 \quad (4.150'')$$

$$Nu_{2,90} = 0,242 \left(\frac{Ra}{\left(\frac{H}{L} \right)} \right)^{0,272} \quad (4.151)$$

Ostatecznie wartość liczby Nusselta oblicza się jako:

$$Nu_{90} = (Nu_{1,90}, Nu_{2,90})_{max} \quad (4.152)$$

Współczynnik konwekcyjnej wymiany dla szczeliny pionowej odpowiada:

$$h_{k,90} = Nu_{90} \frac{\lambda_{szcz}}{L} \quad (4.153)$$

W przypadku szczeliny pochylonej pod kątem β w zakresie: $60^\circ \leq \beta < 90^\circ$ przy przepływie ciepła z wewnątrz na zewnątrz (temperatura szyby wewnętrznej jest wyższa niż szyby zewnętrznej) można korzystać z zależności kryterialnej El Sherbiny [79] wyznaczającej liczbę Nuselta w następujący sposób:

$$G = \frac{0,5}{\left[1 + \left(\frac{Ra}{3160} \right)^{20,6} \right]^{0,1}} \quad (4.154)$$

Dla pochylenia 60° liczbę Nu wyznacza się z równania:

$$Nu_{1,60} = \left[1 + \left(\frac{0,093 Ra^{0,314}}{1 + G} \right)^7 \right]^{1/7} \quad (4.155)$$

$$Nu_{2,60} = \left(0,104 + \frac{0,175}{\frac{H}{L}} \right) Ra^{0,283} \quad (4.156)$$

przy czym $H = Y_{sz}$ i $L = d_{szcz}$.

Dla szczeliny pochylonej pod kątem równym 60° , liczba Nu odpowiada większej wartości obliczonej z równań (4.155) i (4.156), czyli analogicznie jak dla (4.152):

$$Nu_{60} = (Nu_{1,60}, Nu_{2,60})_{\max} \quad (4.157)$$

Współczynnik konwekcyjnej wymiany dla szczeliny pochylonej pod kątem $\beta = 60^\circ$ (dla $L_{szcz} = d_{szcz}$) oblicza się jako:

$$h_{k,60} = Nu_{60} \frac{\lambda_{szcz}}{L_{szcz}} \quad (4.158)$$

Dla szczelin pochylonych pod kątem β w zakresie: $60^\circ < \beta < 90^\circ$ El Sherbiny zaleca korzystanie z bezpośredniej interpolacji liniowej równań (4.153) i (4.158), kiedy to współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła otrzymuje postać:

$$h_{k,\beta} = h_{k,90} + (h_{k,60} - h_{k,90}) \cdot \left(\frac{90 - \beta}{30} \right) \quad (4.159)$$

Zależność powyższa jest prawdziwa dla:

$$10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7 \quad \text{i} \quad 5 < (H/L) < 100$$

Jeżeli przepływ ciepła odbywa się od zewnątrz do wewnątrz (temperatura szyby zewnętrznej jest wyższa niż wewnętrznej) wtedy dla dowolnej szczeliny pochylonej pod kątem $\beta < 90^\circ$ można stosować zależność Arnolda [8] o postaci:

$$Nu_\beta = 1 + (Nu_{90} - 1) \sin \beta \quad (4.160)$$

W obliczeniach konwekcji swobodnej, w zależności od usytuowania okna, a więc pochylecia szczeliny powietrznej, oraz kierunku przepływu ciepła wykorzystano zależności opisane równaniami (4.148), (4.150) – (4.160).

W szczelinie powietrznej wymiana ciepła zachodzi również na drodze promieniowania (która w tradycyjnych oknach ma większy udział niż skutek konwekcji) i opisuje ją następujący współczynnik przejmowania ciepła:

$$h_{r,sz}(y,t) = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_o} + \frac{1}{\varepsilon_o} - 1} \frac{(T_{sz,w}(y,t)^4 - T_{sz,z}(y,t)^4)}{(T_{sz,w}(y,t) - T_{sz,z}(y,t))} \quad (4.161)$$

Szyby są traktowane jako dwa identyczne równoległe względem siebie ciała szare o współczynniku emisyjności ε_o każde.

4.4.6 Współczynniki wymiany ciepła z otoczeniem wewnętrznym

W odniesieniu do powierzchni wewnętrznej obudowy budynku rozważa się wymianę ciepła przez konwekcję swobodną i promieniowanie.

W przypadku konwekcji swobodnej w pomieszczeniach można znaleźć w literaturze zależności kryterialne dla powierzchni pionowych, np. Awbiego [16], Baylea Churchilla i Chu, Holmana [107]. Przepływem ciepła w wyniku konwekcji swobodnej w przypadku powierzchni pochylonych grzanych od dołu lub od góry zajmowali się m.in. Fugi i Imura (1972 r.), a uproszczone zależności dla powierzchni pochylonych wymieniających ciepło poprzez konwekcje swobodną z powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym podał też Holman [107]. Proponowane przez niego zależności pozwalają wyznaczyć współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła w zależności od liczby Ra i rodzaju powierzchni.

Przy tworzeniu modelu zjawisk zachodzących w rozważanym pomieszczeniu skorzystano z nowych (1995 r.) zależności Curcija i Gossa [67] specjalnie sformułowanych dla konwekcyjnej wymiany ciepła na powierzchni wewnętrznej okien. W zależnościach kryterialnych Curcija i Gossa w liczbie Nu i liczbie Ra wymiar charakterystyczny odnosi się do wysokości przeszklenia. Liczbę Ra wyznacza się dla własności warstwy przyściennej powietrza przy oknie od strony wewnętrznej, przy uśrednionej temperaturze tej warstwy. Biorąc pod uwagę poszczególne elementy okna od wewnątrz: centralną część szyby wewnętrznej, obrzeże szyby wewnętrznej, ramę wewnętrzną, a także przegrodę nieprzezroczystą – ścianę od strony wewnętrznej, uśrednioną temperaturę warstwy przyściennej zapisaną w sposób ogólny dla wszystkich z wymienionych powierzchni, oblicza się w następujący sposób:

$$\bar{T}_{pi,wp}(y, z, t) = 0,75 \cdot T_w + 0,25 \cdot T_{pi}(y, z, t)$$

przy czym temperatury poszczególnych powierzchni przegród są funkcją następujących zmiennych:

- centralnej części szyby wewnętrznej: $T_{sz,wC}(t)$;
- obrzeża szyby wewnętrznej: $T_{sz,w}(y, t)$;
- ramy wewnętrznej: $T_{r,w}(y, z, t)$;
- przegrody nieprzezroczystej - ściany: $T_{p,w}(t)$.

Poszczególne własności powietrza w warstwie przyściennej są wyznaczone dla średniej temperatury $\bar{T}_{pi,wp}$ tej warstwy w danym czasie i są obliczane analogicznie jak w przypadku szczeliny powietrznej między szybami, tzn. przyjmuje się, że zmieniają się one w sposób liniowy w funkcji temperatury warstwy (współczynniki a i b równania są wyznaczone dla ustalonych skrajnych możliwych do występowania temperatur przegrody), co np. w odniesieniu do lepkości dynamicznej powietrza opisano równaniem (4.149).

Zależności kryterialne opisujące liczbę Nu w funkcji liczby Ra mają postać zależną od pochylecia rozważanej powierzchni i kierunku przepływu ciepła, co szczegółowo opisano poniżej.

Dla powierzchni poziomych okien i pochyłych pod niewielkim kątem, tj. pod kątem β w zakresie: $0^0 \leq \beta < 15^0$, gdy przepływ ciepła następuje z wewnątrz budynku do zewnątrz, Curcij i Goss zalecają korzystanie z zależności kryterialnej:

$$Nu = 0,13 (Ra_H)^{1/3} \quad (4.162)$$

Dla pochyłych powierzchni $15^0 \leq \beta \leq 90^0$ i przepływu ciepła z wewnątrz na zewnątrz liczbę Nusselta wyznacza się w zależności od wielkości liczby Rayleigha w następujący sposób:

$$Nu = 0,56(Ra_H \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } Ra_H \leq Ra_{cv} \quad (4.163)$$

$$Nu = 0,13(Ra_H^{1/3} - Ra_{cv}^{1/3}) + 0,56(Ra_{cv} \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } Ra_H > Ra_{cv} \quad (4.164)$$

$$Ra_{cv} = 2.5 \cdot 10^5 \left(\frac{e^{0,72\beta}}{\sin \beta} \right)^{1/5} \quad (4.165)$$

Jeżeli natomiast przepływ ciepła następuje z zewnątrz do wewnątrz to zaleca się [115] stosować dla powierzchni poziomych następującą zależność:

$$Nu = 0,58(Ra_H)^{1/5} \quad \text{dla } Ra_H \leq 10^{11} \quad (4.166)$$

Dla powierzchni pochyłych, tak jak w równaniu (4.166) przy przepływie ciepła z zewnątrz do wewnątrz zaleca się korzystać z zależności o postaci równania (4.163) przy czym ograniczenie dla liczby Rayleigha zapisuje się w następującej postaci:

$$Nu = 0,56(Ra_H \cdot \sin \beta)^{1/4} \quad \text{dla } 10^5 \leq Ra_H \sin \beta \leq 10^{11} \quad (4.167)$$

W pomieszczeniu zachodzi także wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy wnętrzem a szybą wewnętrzną (z uwzględnieniem jej poszczególnych elementów), ramą i wewnętrzną powierzchnią przegrody nieprzezroczystej – ściany. Radiacyjny współczynnik wymiany ciepła dla tych powierzchni wyznacza się z ogólnej zależności o postaci:

$$h_{i,r,w}(y,t) = \varepsilon_{i,o} \sigma \left((T_{i,w}(y,t))^2 + T_w^2 \right) (T_{i,w}(y,t) + T_w) \quad (4.168)$$

Traktuje się wnętrze jako ciało doskonale czarne, które całkowicie otacza przegrodę. Indeks i występujący w równaniu (4.168) oznacza odpowiedni element obudowy, tj. ścianę zewnętrzną (od strony wewnętrznej), szybę wewnętrzną (część centralną i przeszklenie), ramę. Temperatura tych powierzchni jest zawsze zmienna w czasie i może być zmienna w przestrzeni (współrzędna y). Sposób wyznaczania rozkładu temperatury $T_{i,w}(t)$ powierzchni wewnętrznych poszczególnych przegród został opisany w poprzednich punktach tego rozdziału.

4.5 Szczegółowy bilans cieplny dla reprezentatywnego pomieszczenia

Wykorzystując sformułowane do tej pory zależności na poszczególne strumienie energii przepływające w danym czasie do rozpatrywanego pomieszczenia, czyli:

- równanie (4.131), opisujące przepływ strumienia ciepła przez ramę ;
- równanie (4.75), opisujące przepływ strumienia przez szyby, który jest sumą strumienia ciepła docierającego przez centralną część szyby, strumienia ciepła docierającego przez obrzeże przeszklenia i strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego w sposób bezpośredni przez przeszklenie;
- równanie (4.29), opisujące przepływ strumienia ciepła przez przegrody zewnętrzne, nieprzezroczyste;
- równanie (4.4'), opisujące zapotrzebowanie na moc grzewczą/klimatyzacyjną do celów wentylacyjnych;

równanie bilansowe o postaci (4.5) przyjmuje ostatecznie postać:

(4.169)

$$\begin{aligned}
 \sum_n \dot{Q}_{h/c}(t) &= \sum_{j,s} \dot{Q}_{rj,s}^k + \sum \dot{Q}_{in,swCalc}^k + \sum_i \dot{q}_{inp,i}^k A_{i,p} + \dot{Q}_{WEN}^k = \\
 &= \sum_{j=2}^{J'-1} U_{j-1,S'-1}^k (\Delta s \cdot (T_{j,S'-1}^k - T_w)) \cdot l_{r,j} + \sum_{s=z_{RW1+1}}^{S'-1} U_{J'-1,s-1}^k (\Delta s \cdot (T_{J'-1,s}^k - T_w^k)) \cdot l_{r,J'-1} + \\
 &+ U_w^k \Big|_{j=J-1} \cdot (T_{J,sw}^k - T_w) ((X_{szyby} - 2 \cdot h_{ob}) \cdot (Y_{szyby} - 2 \cdot h_{ob})) + \\
 &+ \sum_{j=2}^{J-1} (U_{w,j-1}^k \cdot (T_{j,sw}^k - T_w) \cdot \Delta s \cdot l_{ob,j-1}) + \\
 &+ (X_{szyby} \cdot Y_{szyby}) \cdot (G_s^k \tau_{c,sz}) + U_{N-1}^k (T_{N-1}^k - T_w) \cdot A_{c,p} + \\
 &+ (1 - \eta) \cdot (V_{wen} \rho \cdot c_p (T_w - T_a^k))
 \end{aligned}$$

W zależności od warunków panujących w otoczenia i w przegrodach może występować zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania lub chłód do klimatyzacji rozważanego pomieszczenia. Podstawą przeprowadzonych rozważań jest przyjęcie założenia, iż instalacja grzewczo/klimatyzacyjna cały czas funkcjonuje, aby utrzymać stałe warunki cieplne danego rozpatrywanego pomieszczenia.

5. Wpływ energii promieniowania słonecznego na bilans cieplny pomieszczeń

5.1 Zastosowanie opracowanego modelu matematycznego do obliczeń symulacyjnych

Sformułowany model matematyczny i jego zapis numeryczny pozwalają na prowadzenie obliczeń symulacyjnych procesów zachodzących w obudowie budynku i jego otoczeniu w zmieniających się w czasie warunkach, i dla różnych parametrów konstrukcyjno-materiałowych obudowy budynku. Równania opisujące przepływ energii przez przegrody budynku są równaniami cząstkowymi parabolicznymi dla obszarów wewnętrznych, dla których sformułowano warunki początkowe i brzegowe. Do obliczeń przyjęto dla każdego miesiąca te same dzienne rozkłady temperatury otoczenia zewnętrznego i strumienia energii promieniowania słonecznego, powtarzające się cyklicznie w kolejnych dniach danego miesiąca. Bilanse dobowe energii dla kolejnych dni zmieniają się dążąc do pewnych ustalonych wartości w kolejnych przedziałach czasowych, zgodnie z twierdzeniem o asymptotycznych własnościach rozwiązań równań parabolicznych. W celu osiągnięcia powtarzalnych wartości bilansów dobowych obliczenia prowadzono w sekwencjach 10 dniowych. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie MATLAB [92]. Opracowano kilka programów symulacyjnych, które mogą być wykorzystywane zarówno niezależnie, jak i wspólnie uzupełniając się nawzajem.

Do programów niezależnych należą programy obliczające:

- 1) temperaturę otoczenia atmosferycznego i pozornego nieboskłonu;
- 2) podstawowe parametry i zależności geometrii sferycznej Słońca i Ziemi, a także napromieniowanie półsferyczne i jego składowe dla dowolnie usytuowanej powierzchni;
- 3) napromieniowanie półsferyczne i jego składowe dla ramy okiennej.

Do programów, które korzystają z danych wyjściowych innych programów należą programy obliczające:

- 4) przepływ ciepła przez przegrody nieprzezroczyste (wykorzystywany jest program 1) i 2));
- 5) przepływ energii przez okno (wykorzystywany jest program 1), 2) i 3);
- 6) zapotrzebowanie na ciepło/chłód do celów grzewczych/klimatyzacyjnych przez dane pomieszczenie budynku (wykorzystywany jest program 1), 4) i 5).

Stworzone programy zostały wykorzystane do przeprowadzenia obliczeń bilansów energetycznych różnych wariantów pomieszczeń pod względem ich usytuowania względem stron świata, pochylenia przegród zewnętrznych obudowy i wielkości okien. Opracowany model obliczeniowy zastosowany w programach numerycznych pozwala symulować zjawiska zachodzące w przegrodach zewnętrznych, otoczeniu zewnętrznym i wewnętrznym. W efekcie określa się dostępność i oddziaływanie

energii promieniowania słonecznego na budynek, wyznacza się pola temperatury w poszczególnych elementach obudowy budynku, przepływ ciepła pomiędzy różnymi ośrodkami tworzącymi ustrój budynku i jego otoczenie, a ostatecznie zapotrzebowanie na ciepło/chłód do celów grzewczych/klimatyzacyjnych w różnych okresach czasu, przy założeniu stałości w czasie i przestrzeni temperatury wewnętrznej pomieszczeń. Możliwe jest prowadzenie obliczeń dla różnych parametrów materiałowych (różne materiały budowlane) i rozwiązań przegród (jedno lub kilkuwarstwowe) i różnych wielkości pomieszczeń. Obliczone zapotrzebowanie na energię do celów grzewczych i klimatyzacyjnych świadczy o energochłonności danego pomieszczenia budynku. Opracowany model matematyczny i programy mogą być przydatnym narzędziem przy tworzeniu koncepcji architektonicznej budynku i przy jego projektowaniu, przy opracowywaniu oceny jakości energetycznej danego budynku i tworzeniu jego charakterystyki energetycznej.

Wybrane wyniki przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych zostały przedstawione w sposób graficzny w kolejnych punktach tego rozdziału i w sposób tabelaryzowany w Dodatku 4. Do obliczeń symulacyjnych przyjęto pewne założenia odnośnie stanu termicznego wnętrza budynku i jego otoczenia, co opisano w rozdziale 4, oraz pewne wartości parametrów materiałowych i konstrukcyjnych przegród zewnętrznych nieprzezroczystych i przezroczystych opisane w Dodatku 3. Parametry fizyczne materiałów budowlanych i struktura obudowy zostały tak przyjęte, aby budynek spełniał obowiązujące wymagania energooszczędności. Do analizy wybrano pomieszczenia zorientowane w czterech podstawowych kierunkach (stronach) świata. Wszystkie pomieszczenia mają taką samą obudowę zewnętrzną pod względem materiałowym i konstrukcyjnym, o takiej samej powierzchni całkowitej przegród zewnętrznych: pionowych lub pochylonych. Przegrody pochylone (45° względem poziomu) tworzą obudowę zewnętrzną pomieszczeń na poddaszach użytkowych z oknami połączonymi. Wszystkie pomieszczenia mają taką samą objętość. Zamieszczone w pracy wyniki, oprócz różnego zorientowania pomieszczeń i pochylenia przegród obudowy, dotyczą dwóch wariantów wielkości okien: małych okien ($1 \times 1 \text{ m}^2$) i dużych ($2 \times 2 \text{ m}^2$).

Przyjęto dwa warianty wielkości okna. Zgodnie z rozporządzeniem odnośnie „Warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie” z 2002 r. [234] w *pomieszczeniu przeznaczonym na pobyt ludzi stosunek powierzchni okien, liczonej w świetle ościeżnic, do podłogi powinien wynosić co najmniej 1: 8*. W obliczeniach symulacyjnych w pierwszym wariantcie powierzchnia okna jest mniejsza niż wymagana rozporządzeniem (stosunek powierzchni okien do podłogi: 1:16), w drugim wariantcie większa (1:4). Takie dwa warianty obliczeń zostały specjalnie wybrane do analizy symulacyjnej, bowiem dla celów porównawczych różnica w przepływie energii jest bardziej widoczna. Ponadto w budynkach w rzeczywistości występują pomieszczenia o różnym charakterze ich użytkowania i wielkość okien powinna być różna. Jednocześnie przyjęte dwa warianty okien mają wykazać, że wielkość okna powinna być rozpatrywana nie tylko pod kątem

oświetlenia światłem dziennym w odniesieniu do powierzchni okna i długości czasu dostępu bezpośredniego promieniowania słonecznego, ale i pod kątem usytuowania okna i pomieszczenia, z uwzględnieniem ich orientacji i pochylenia przegród zewnętrznych. Opracowany program symulacyjny stwarza możliwości przeprowadzenia wielowariantowych analiz materiałowych i strukturalnych obudowy budynku, uwzględniających różnorodne usytuowania okien i pomieszczeń, a także wielkości okna.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników opisano poniżej podstawowe obserwacje dotyczące energetycznego zachowania się wybranych do rozważań pomieszczeń i elementów obudowy budynku, w zmieniających się warunkach otoczenia zewnętrznego. Opracowano wnioski odnośnie wpływu energii promieniowania słonecznego na bilans cieplny rozważanych pomieszczeń i warunki komfortu cieplnego w nich panujące w odniesieniu do warunków Polski centralnej, które w sposób ogólny odnoszą się także do całego kraju.

5.2 Dostępność promieniowania słonecznego padającego na zewnętrzną obudowę budynku

Przeprowadzone rozważania i wyniki obliczeń symulacji numerycznej pozwalają stwierdzić, jak istotną rolę w kształtowaniu zapotrzebowania na energię budynku pełni oddziaływanie energii promieniowania słonecznego i jak ważne jest odpowiednie projektowanie bryły budynku w celu zwiększenia lub zmniejszenia dostępności energii promieniowania słonecznego.

Na rysunku 5.1a-h przedstawiono rozkład w czasie doby natężenia promieniowania półsferycznego (wartości natężenia są zmienne co godzinę) docierającego do powierzchni zewnętrznych obudowy: pionowych i pochylonych względem poziomu (pod kątem 45°), zwróconych w czterech podstawowych kierunkach (stronach) świata. Uzyskane wyniki potwierdzają spostrzeżenia opisane szczegółowo w rozdziale 2 odnośnie napromieniowywania różnie usytuowanych powierzchni i pokrótce są przedstawione poniżej. Szczególna uwaga ze względu na napromieniowanie słoneczne powinna być zwrócona na południową fasadę budynku, co jest w pewnym sensie oczywiste, ale także na zachodnią, co praktycznie jest już mniej znane. Powierzchnie pionowe obudowy budynku są najlepiej napromieniowywane w lecie od strony zachodniej, natomiast w pozostałych porach roku, a szczególnie w zimie od strony południowej.

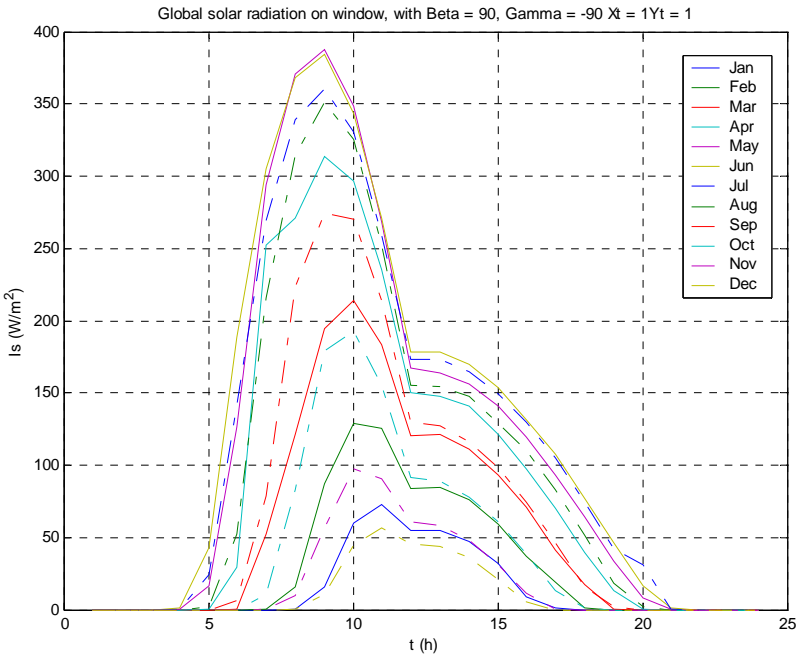
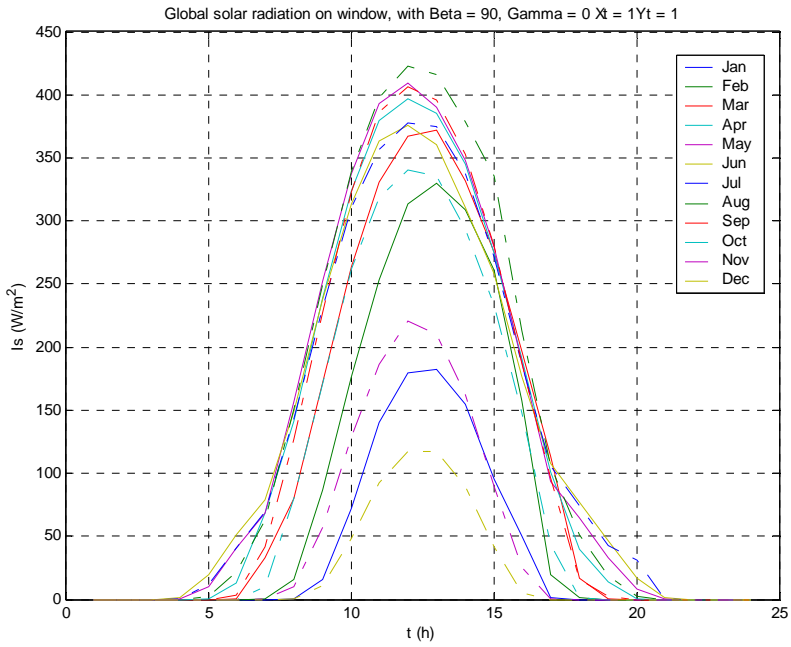
W zależności od zorientowania danej powierzchni obudowy budynku maksimum rozkładu natężenia promieniowania słonecznego przesuwają się na odpowiednią porę dnia, kiedy to dana powierzchnia „widzi” bezpośrednio Słońce, a więc dla pomieszczeń wschodnich największe napromieniowanie występuje przed południem, dla zachodnich po południu. Charakterystyczny jest rozkład natężenia promieniowania w lecie dla powierzchni północnych, do których promieniowanie słoneczne dociera bezpośrednio w godzinach rannych i popołudniowych (Słońce

wschodzi i zachodzi przed linią wschód – zachód). Poziom natężenia promieniowania słonecznego jest szczególnie wysoki w godzinach południowych, co powoduje charakterystyczny gwałtowny wzrost natężenia promieniowania docierającego do pionowej powierzchni północnej, gdy ponownie w ciągu dnia zaczyna „widzieć” Słońce (na rys. 5.1 pik natężenia w lecie około godziny 18-tej). Gwałtowne zmiany w rozkładzie natężenia promieniowania, występujące także na pionowej powierzchni wschodniej i zachodniej, są wynikiem nagłej zmiany dostępności promieniowania bezpośredniego i promieniowania dyfuzyjnego okołosłonecznego w poszczególnych porach dnia.

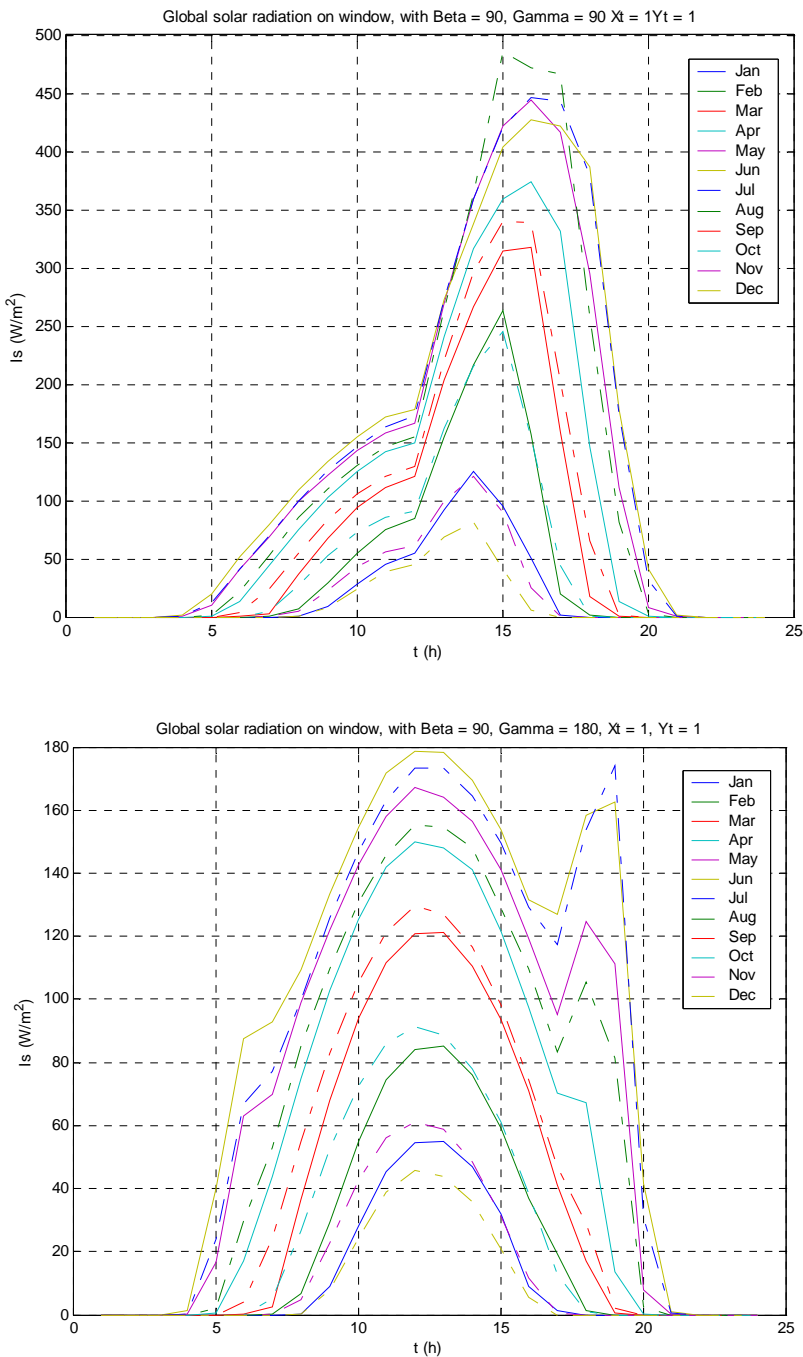
Zmniejszenie pochylenia przegród względem poziomu powoduje, że zmiany natężenia promieniowania przebiegają względnie łagodnie, promieniowanie słoneczne dociera bowiem w sposób bardziej równomierny w ciągu dnia, powierzchnie o małych pochyleniach „dłużej widzą” Słońce w porównaniu z analogicznie zorientowanymi powierzchniami o dużych pochyleniach, a szczególnie pionowymi. Zmniejszenie pochylenia przegród obudowy budynku zwiększa okres dostępności promieniowania słonecznego dla wszystkich orientacji, zarówno latem jak i zimą.

Zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku ze względu na napromieniowywanie promieniowaniem słonecznym zostały przedstawione już w rozdziale 2. Można tu tylko jeszcze raz podkreślić, że ze względu na duże napromieniowanie latem zachodniej części budynku należy zwrócić szczególną uwagę na jej kształt, strukturę i zastosowane materiały. Konieczne jest uwzględnienie stosowania elementów zacieniających. Fasada południowa ma dobre warunki do pozyskiwania energii promieniowania słonecznego zimą i powinna zawierać elementy helioaktywne i heliopasywne, w tym okresie powinna być otwarta na oddziaływanie promieniowania słonecznego.

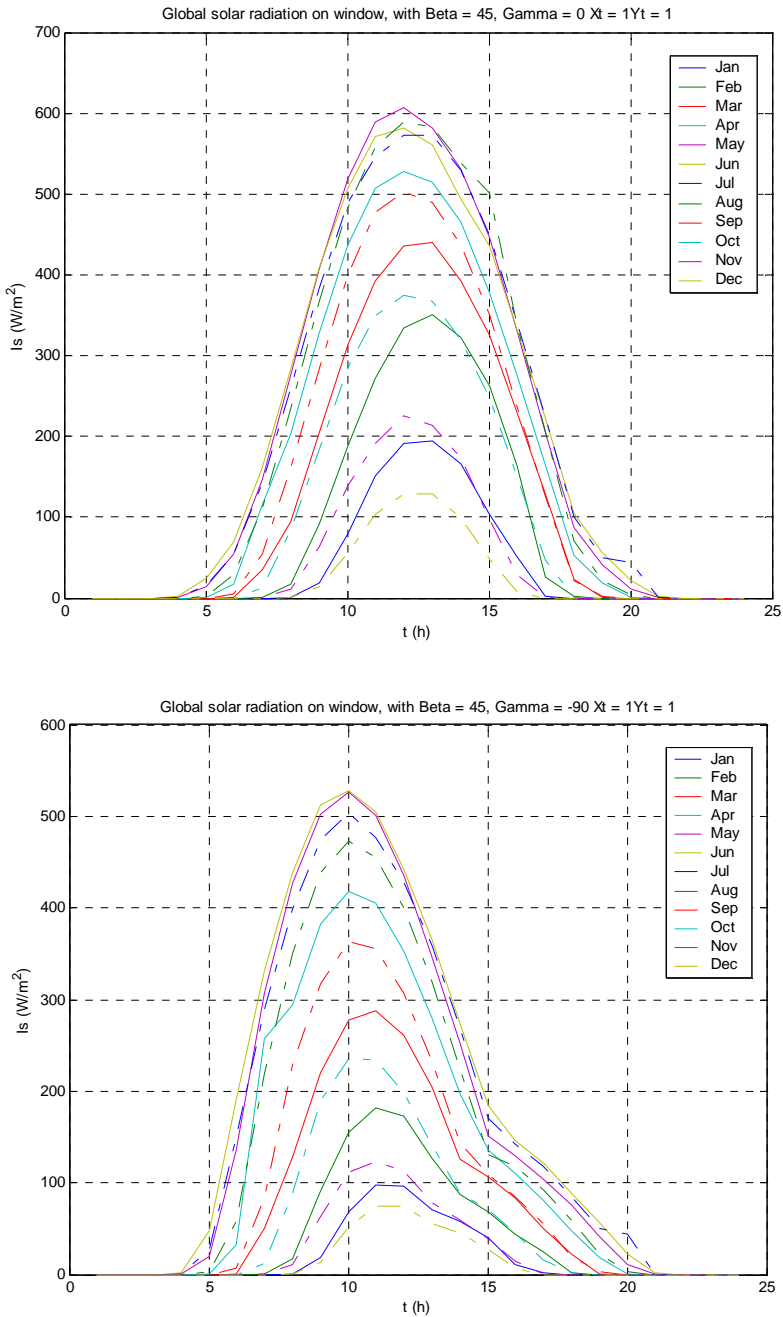
Natomiast latem, choć dla przegród pionowych południowych przez kilka miesięcy napromieniowanie promieniowaniem słonecznym jest mniejsze niż dla przegród pionowych zachodnich, to południowa fasada budynku powinna być także zaopatrzona w elementy zacieniające. Zmniejszenie pochylenia powierzchni obudowy - połaci dachu, zwiększa ich napromieniowanie, powodując przegrzewanie pomieszczeń.



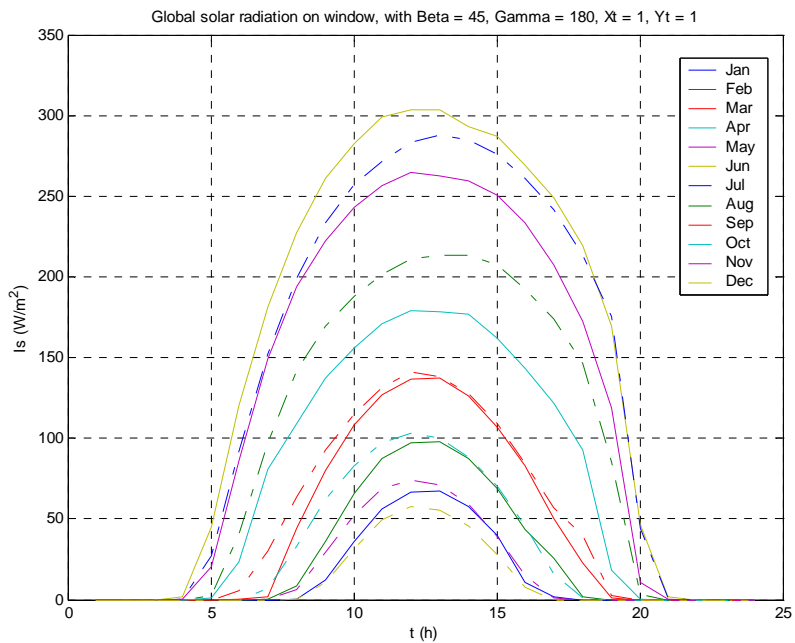
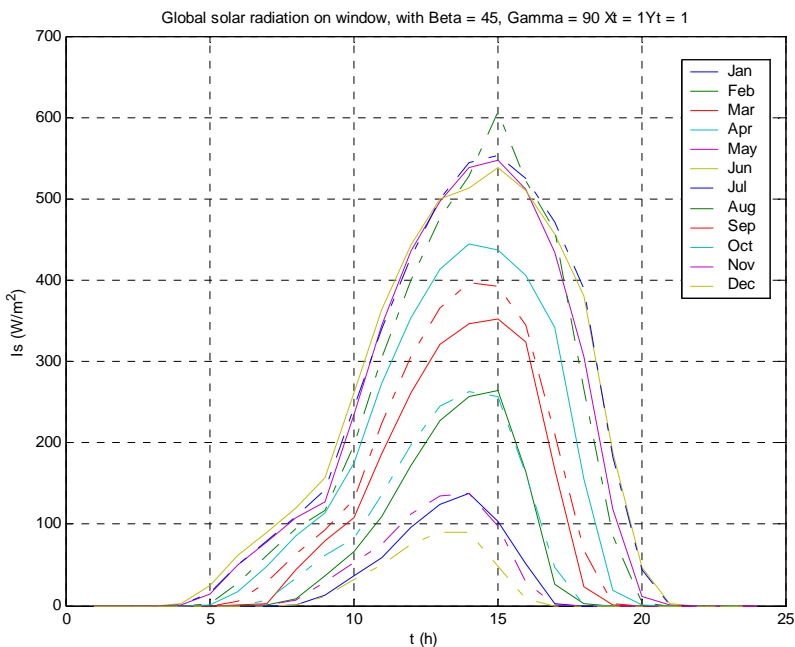
Rys. 5.1a-b. Dobowy rozkład natężenia promieniowania słonecznego na pionowej powierzchni południowej i wschodniej



Rys. 5.1c-d. Dobowy rozkład natężenia promieniowania słonecznego na pionowej powierzchni zachodniej i północnej



Rys. 5.1e-f Dobowy rozkład natężenia promieniowania słonecznego na pochylonej powierzchni południowej i wschodniej



Rys. 5.1g-h Dobowy rozkład natężenia promieniowania słonecznego na i pochylonej powierzchni zachodniej i północnej

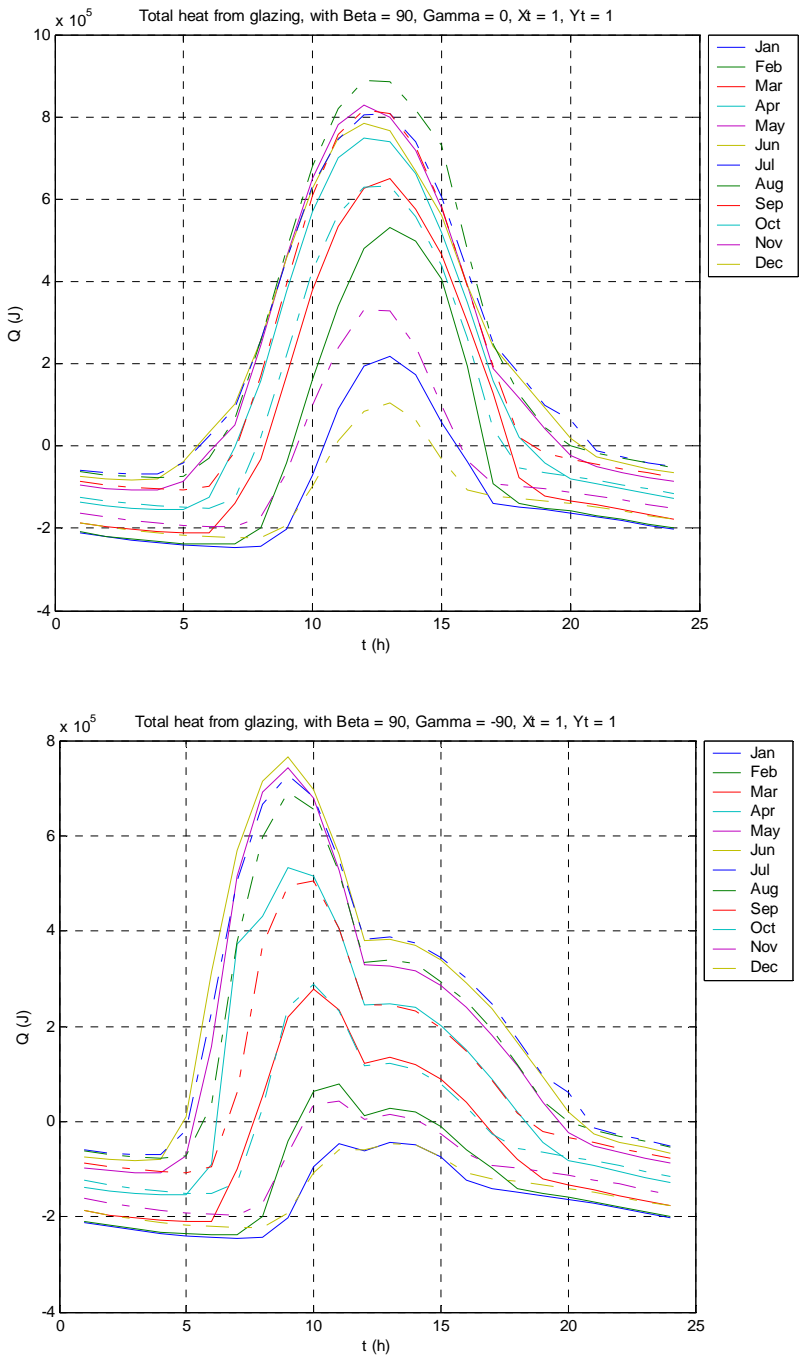
5.3 Przepływ energii przez okno

Szczególne uwagi przy projektowaniu budynku powinna być zwrócona na okna. Okno jest tym elementem obudowy budynku, który w największym stopniu jest związany z oddziaływaniem środowiska zewnętrznego, a przede wszystkim w największym stopniu ulega oddziaływaniu energii promieniowania słonecznego. W związku z coraz lepszą izolacyjnością nieprzezroczystych przegród zewnętrznych, udział przepływu ciepła przez te przegrody odgrywa coraz mniejszą rolę w bilansie cieplnym pomieszczenia (budynku), a newralgicznym punktem w projektowaniu i wykonaniu budynków stają się okna.

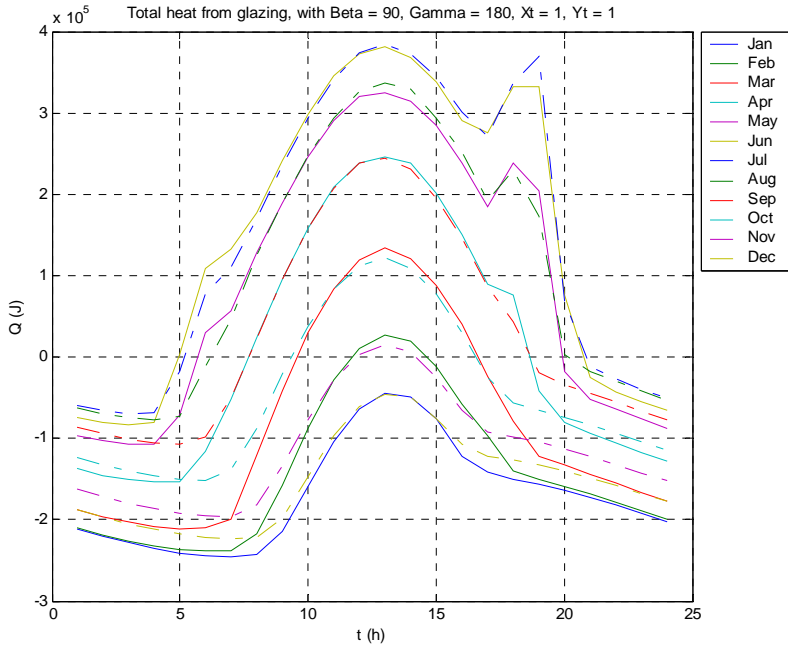
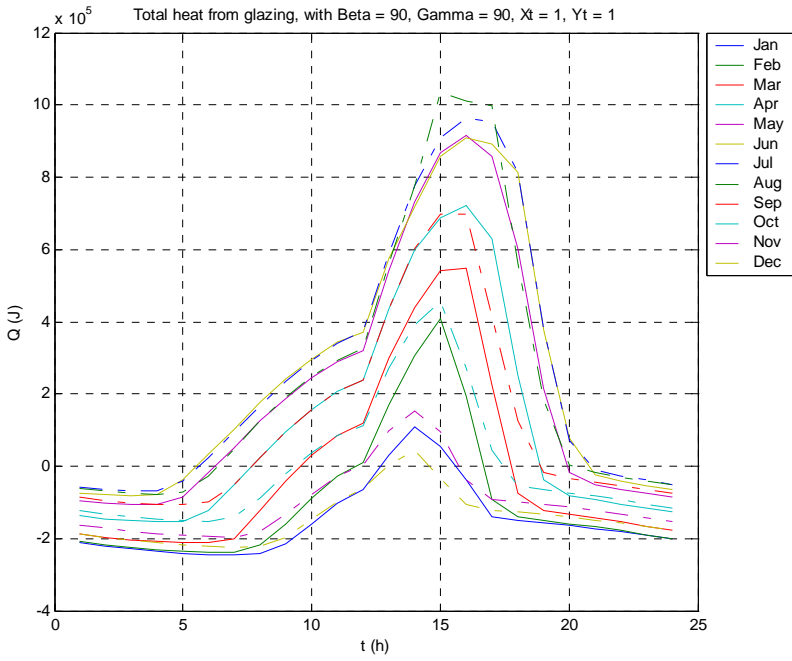
Przepływ energii przez okno, do lub z pomieszczenia, jest wynikiem oddziaływania środowiska zewnętrznego, opisanego zmiennymi w czasie jego podstawowymi parametrami takimi jak: temperatura powietrza, temperatura nieboskłonu i natężenie promieniowania słonecznego. Charakter zmian przepływu energii przez przezroczyste przeszklenie i ramę różni się.

Na rysunkach 5.2a-h i 5.3a-h przedstawiono zmiany przepływu energii $Q=f(t_h)$ przez przeszklenie (z uwzględnieniem oddziaływania ramy) w ciągu reprezentatywnego dnia kolejnych miesięcy roku. Wartość energii przepływającej przez przeszklenie uwzględnia zarówno przepływ ciepła przez część centralną szyb i obrzeże, jak i transport energii promieniowania słonecznego przez te oba ośrodki. Przepływ energii odbywa się do lub z wnętrza pomieszczenia. Wartości energii są nanoszone na wykresy co jedną godzinę, nie są one funkcją ciągłą, lecz schodkową i powinny być przedstawione w postaci np. diagramu słupkowego. Jednakże, ze względu na dużą liczbę danych wartości energii (sum godzinnych), prezentacja graficzna wyników obliczeń symulacyjnych w postaci słupkowej na jednym wykresie przy ograniczonym rozmiarze rysunku nie jest możliwa. Dane są połączone linią ciągłą dla łatwiejszej interpretacji wyników. Rysunek 5.2 a-h przedstawia przepływ energii przez pionowe przeszklenia, rys. 5.3a-h przez pochylone względem poziomu. Uwzględnione jest zorientowanie pomieszczeń w czterech podstawowych kierunkach (stronach świata) i różna wielkość okien.

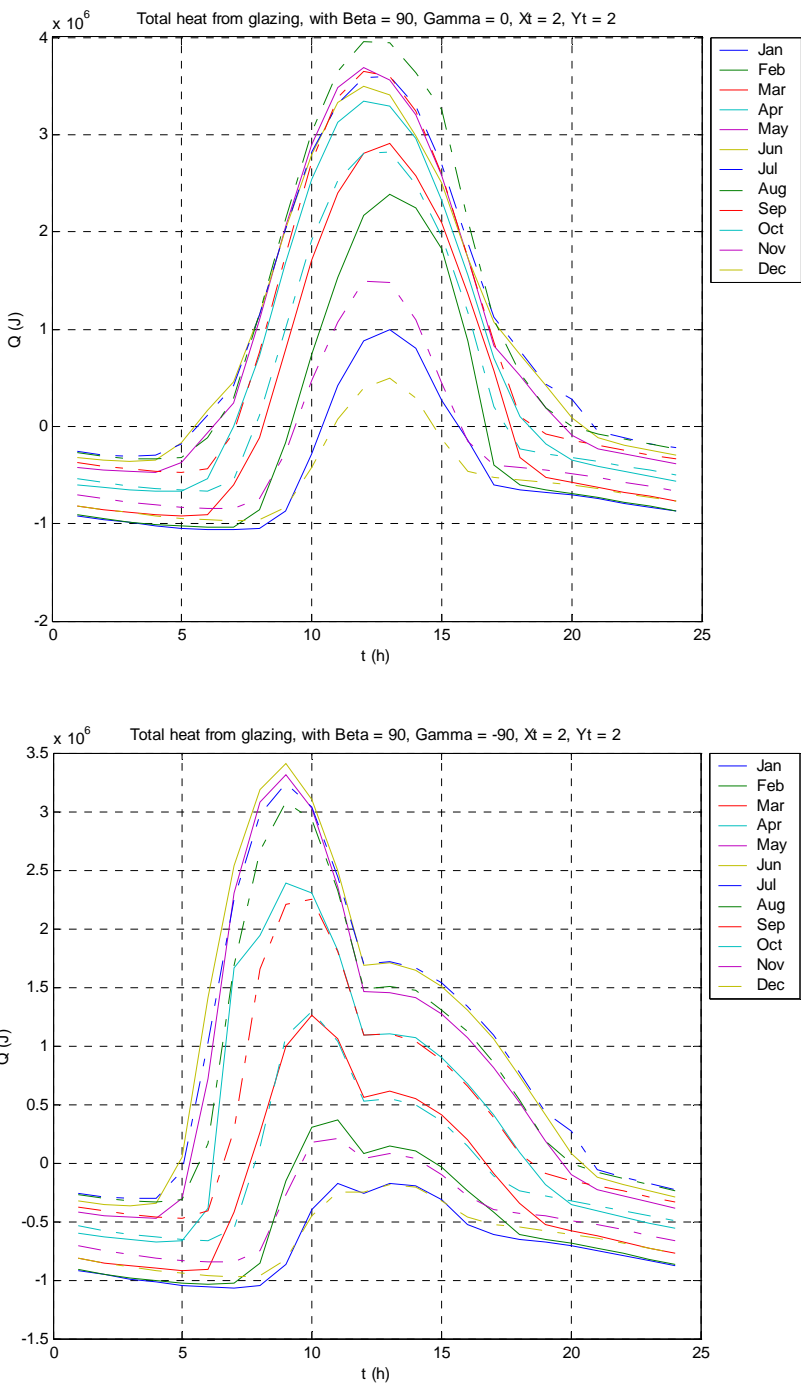
Szczególne cechy przepływu energii do lub z pomieszczenia przez przeszklenie jest silna zależność zmian przepływu energii w czasie dnia od zmian natężenia promieniowania słonecznego półsferycznego docierającego do rozważanych przeszkleń w danym czasie. Największy przepływ energii z otoczenia zewnętrznego do pomieszczenia występuje latem i późną wiosną. W przypadku przeszkleń pionowych największy przepływ energii występuje przez przeszklenia zachodnie i południowe, następnie wschodnie, przy czym dla różnych orientacji na różne miesiące i pory dnia przypadają największe zyski energetyczne. Zmniejszenie nachylenia powierzchni (np. stosowanie okna połaciowego) powoduje zwiększenie przepływu energii do wnętrza w ciągu dnia (w związku ze zwiększeniem dostępności promieniowania słonecznego). Przy pochylonej powierzchni przeszklenia największy przepływ energii występuje dla orientacji południowej.



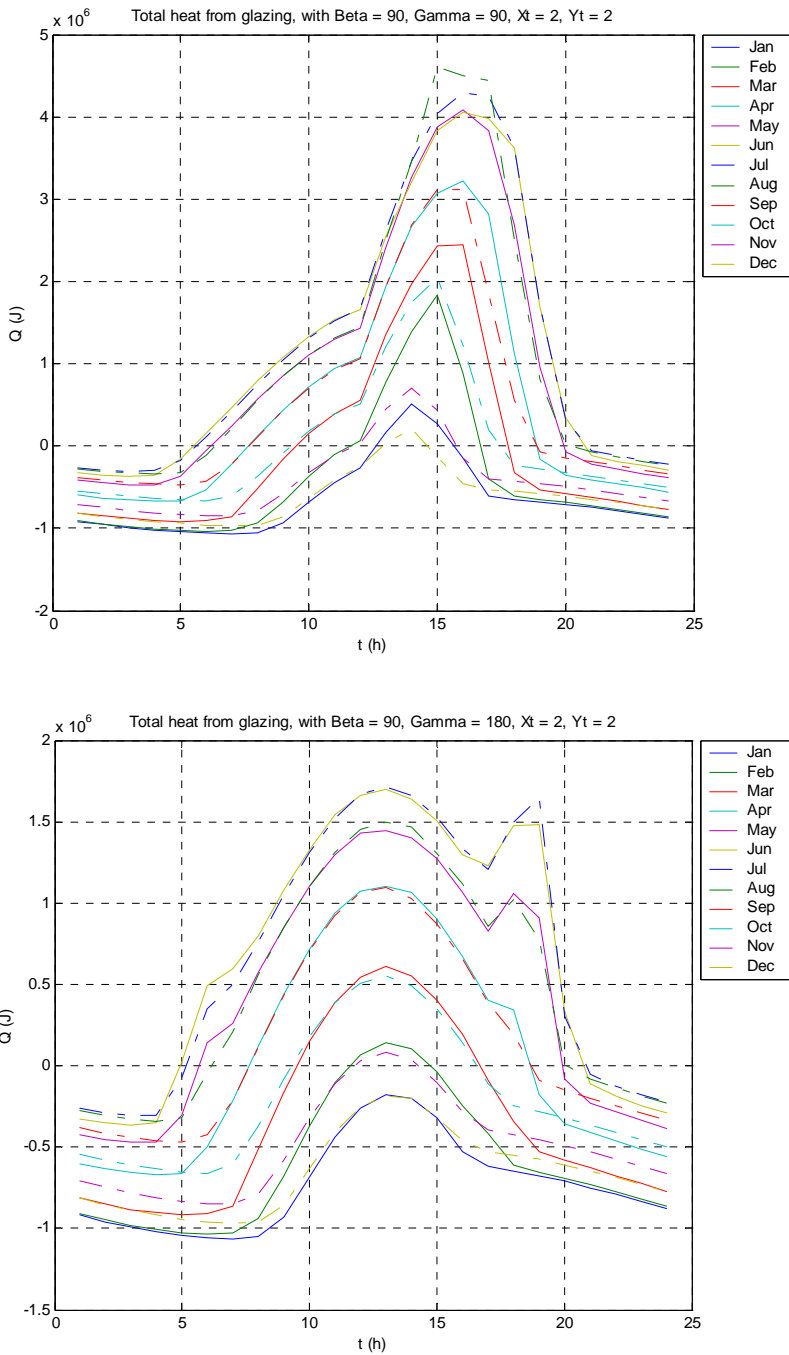
Rys. 5.2a-b. Dobowy rozkład przepływu energii przez pionową szybę (okno 1x1 m²) o orientacji: południowej, wschodniej



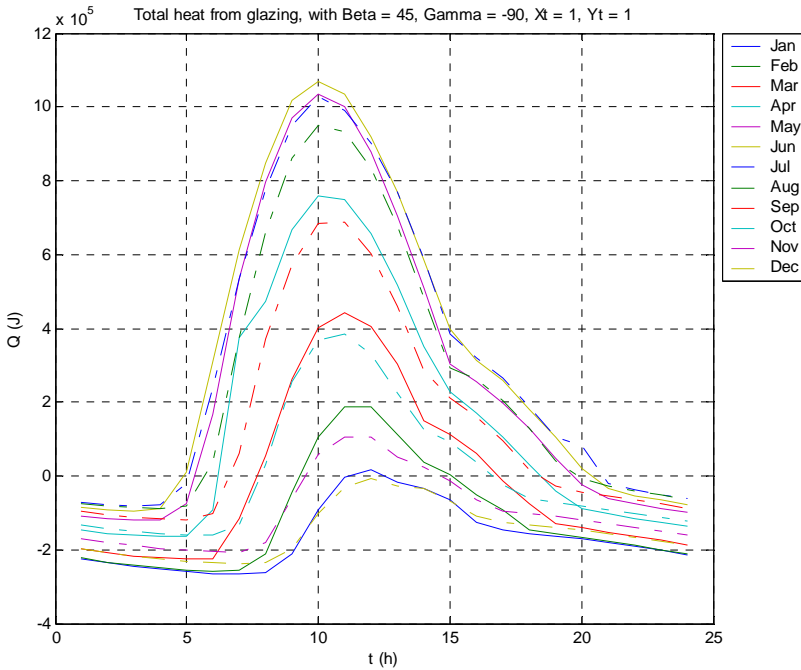
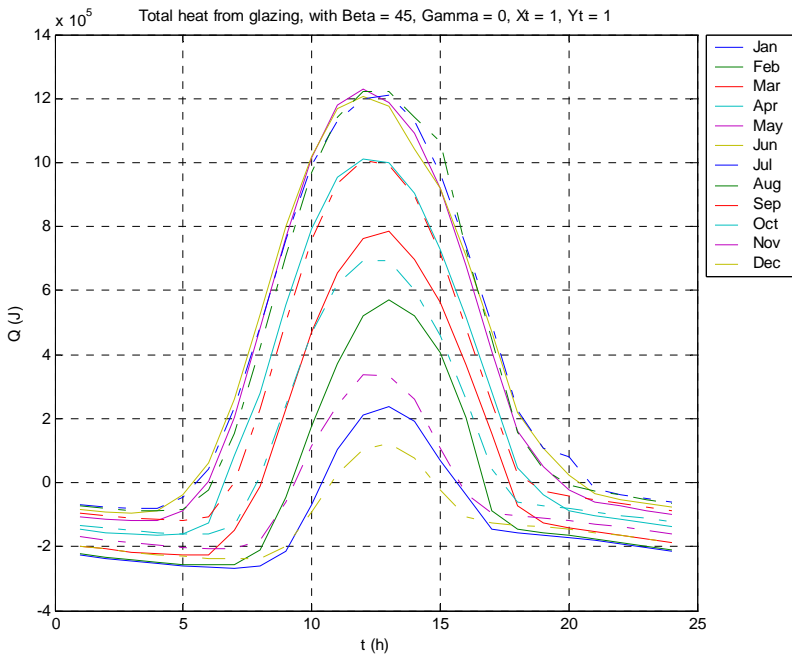
Rys.5.2 c-d. Dobowy rozkład przepływu energii przez pionową szybę (okno 1x1 m²) o orientacji: zachodniej i północnej



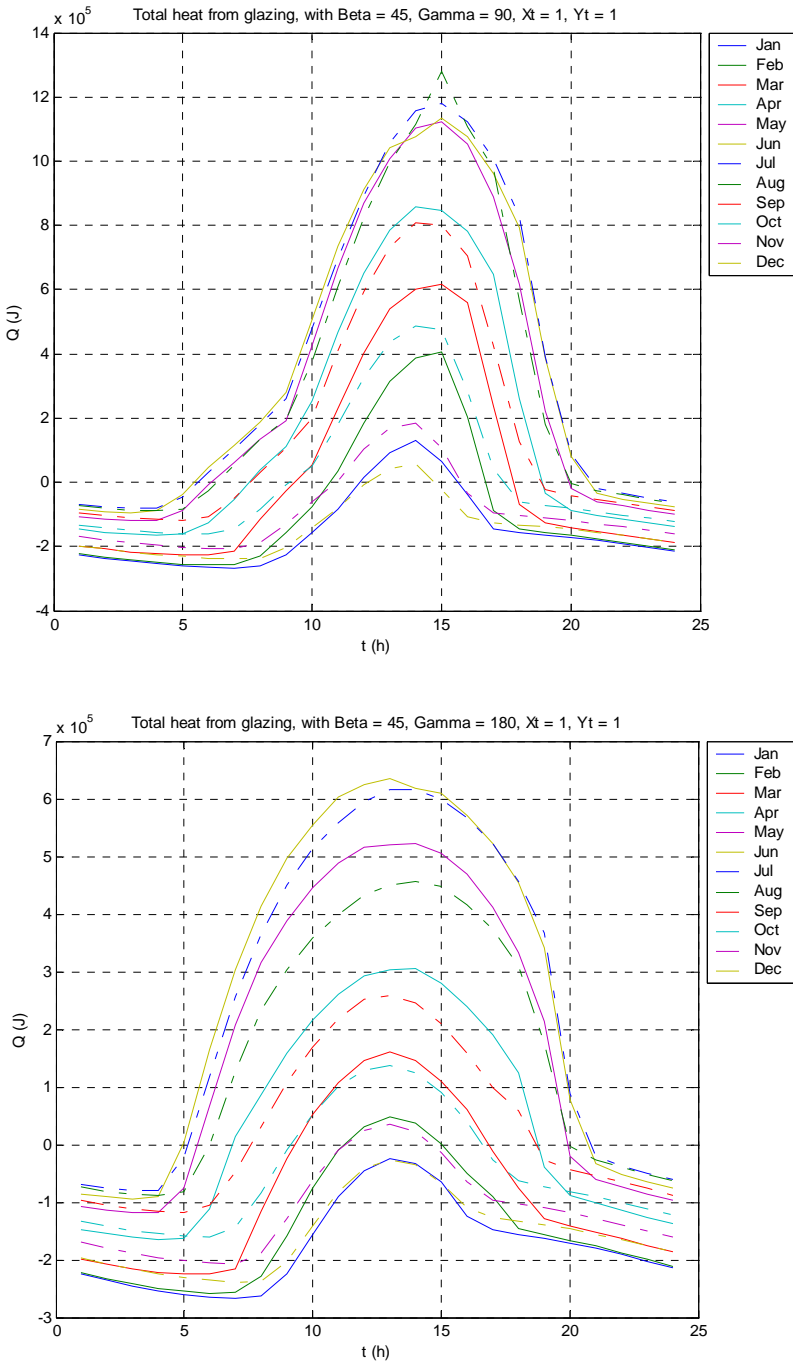
Rys. 5.2 -f Dobowy rozkład przepływu energii przez pionową szybę (okno 2x2 m²) o orientacji południowej i wschodniej



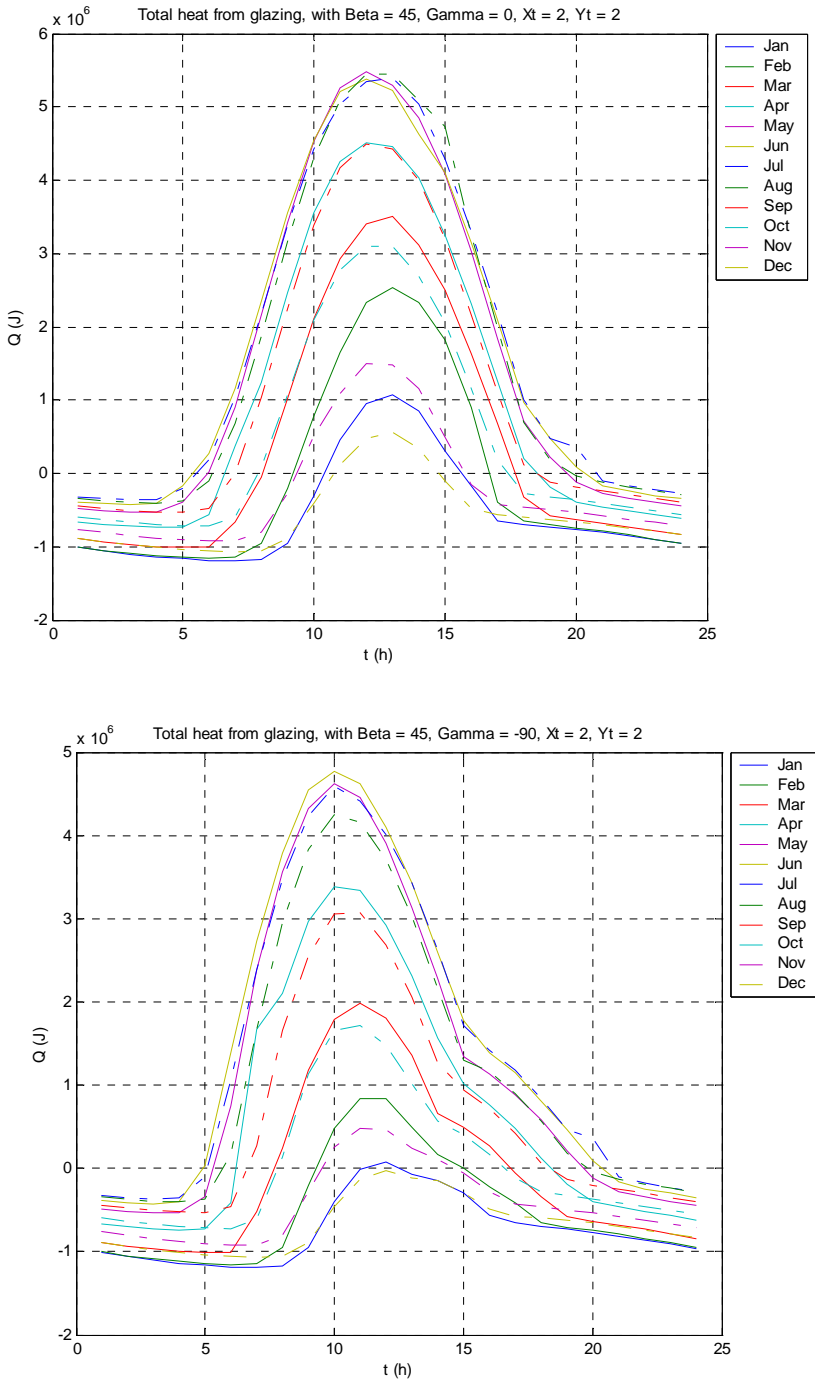
Rys.5.2 g-h. Dobowy rozkład przepływu energii przez pionową szybę (okno $2 \times 2 \text{ m}^2$) o orientacji zachodniej i północnej



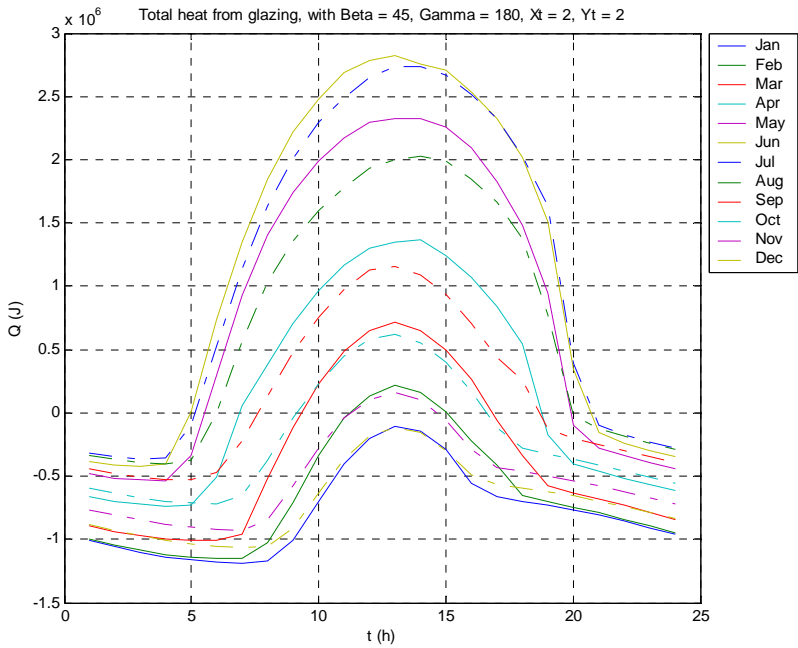
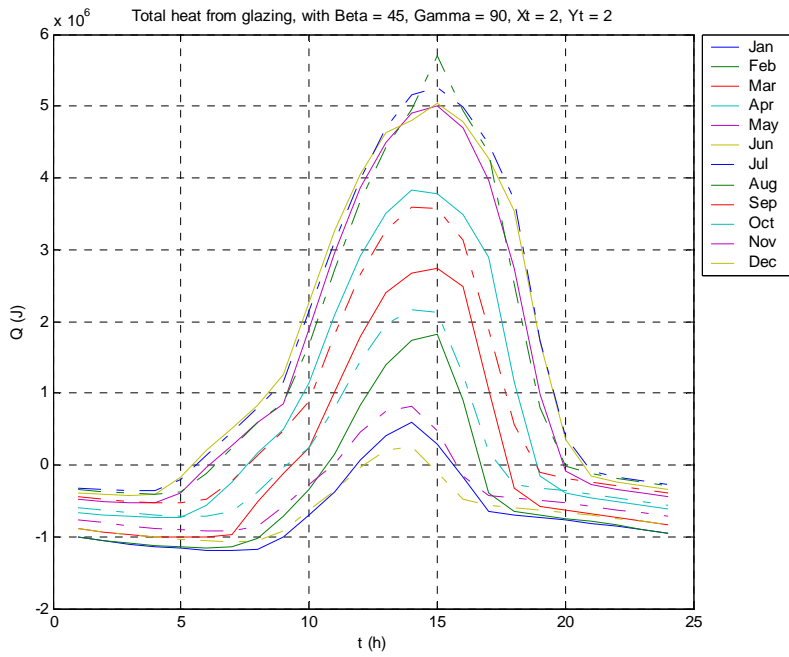
Rys. 5.3a-b. Dobowy rozkład przepływu energii przez pochyloną szybę (okno 1x1 m²) o orientacji: południowej, wschodniej



Rys. 5.3c-d. Dobowy rozkład przepływu energii przez pochyloną szybę (okno 1x1 m²) o orientacji: zachodniej i północnej



Rys. 5.3e-f. Dobowy rozkład przepływu energii przez pochyloną szybę (okno 2x2 m²) o orientacji południowej i wschodniej



Rys. 5.3g-h. Dobowy rozkład przepływu energii przez pochyloną szybę (okno 2x2 m²) o orientacji zachodniej i północnej

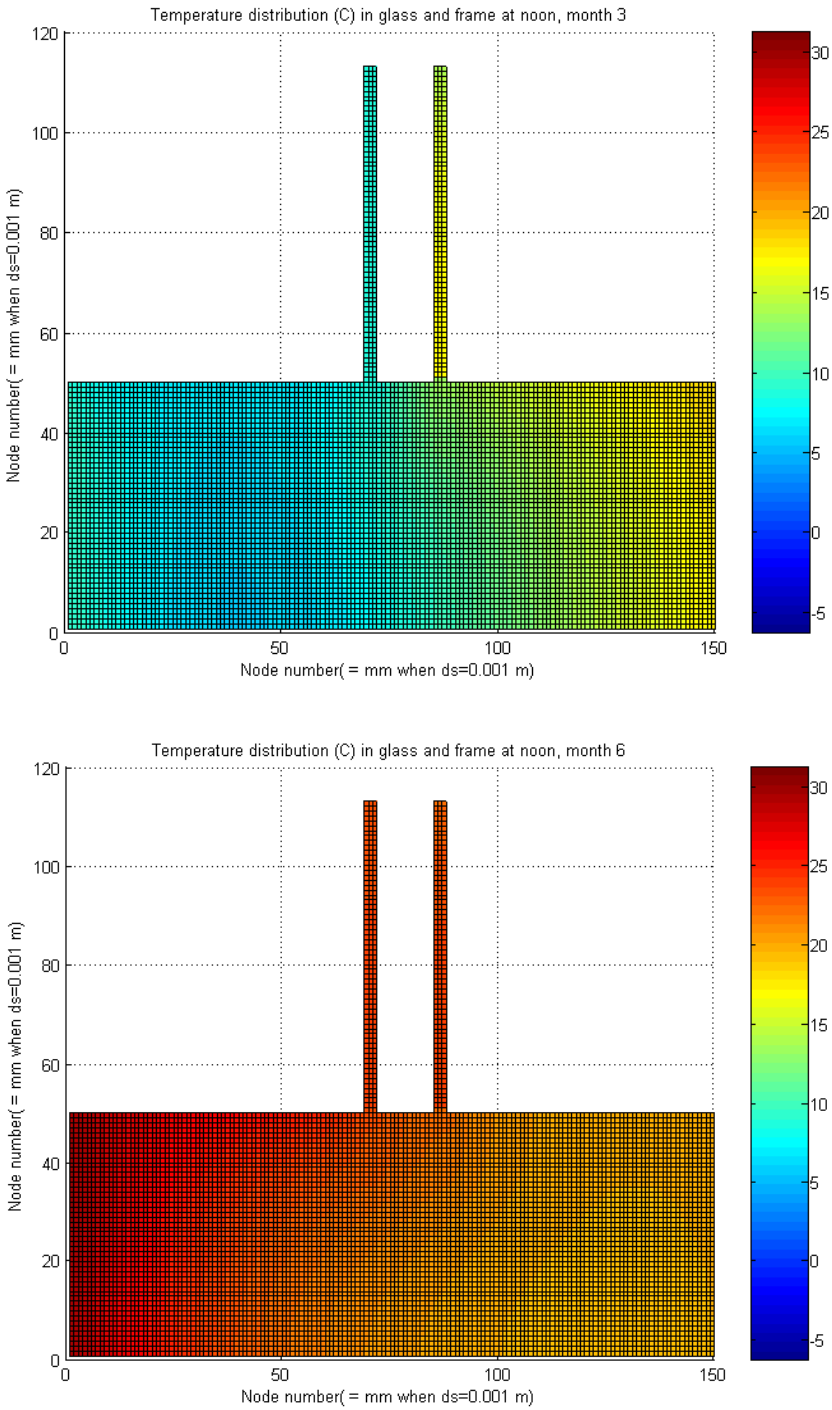
Porównując rys. 5.2 i 5.3 można zauważyć, że nocą przy pochylaniu powierzchni okna ma miejsce natomiast nieznaczny wzrost strat ciepła w porównaniu z przeszkleniem pionowym. Zjawisko to jest związane m.in. z większą wymianą ciepła przez promieniowanie cieplne z nieboskłonem (o temperaturze niższej od temperatury bezpośredniego otoczenia), jest to tzw. „chłodzenie nocne” obudowy budynku. Zjawisko „chłodzenia nocnego” jest szczególnie intensywne dla dachów i przeszkleń poziomych, dla których wymiana ciepła przez promieniowanie zachodzi przede wszystkim z nieboskłonem (gdy nie ma wyższych budynków w otoczeniu, wtedy tylko z nieboskłonem). Współczynnik „widoku” nieboskłonu maleje ze wzrostem pochylenia powierzchni.

W czasie zimy w ciągu dnia przy dużym napromieniowaniu słonecznym może występować przepływ ciepła do pomieszczenia przez przeszklenia południowe, nawet przez kilka godzin dziennie, a także przez przeszklenie zachodnie, ale tylko po południu i to w znacznie krótszym okresie czasu. Charakter zmian przepływu ciepła w nocy jest bardziej łagodny niż w ciągu dnia i jest ściśle związany z rozkładem temperatury powietrza zewnętrznego. Gdyby miał miejsce gwałtowny spadek temperatury w nocy wymiana ciepła uległaby oczywiście intensyfikacji. Straty ciepła osiągają maksimum przed wschodem Słońca (zgodnie z założonym rozkładem temperatury powietrza atmosferycznego).

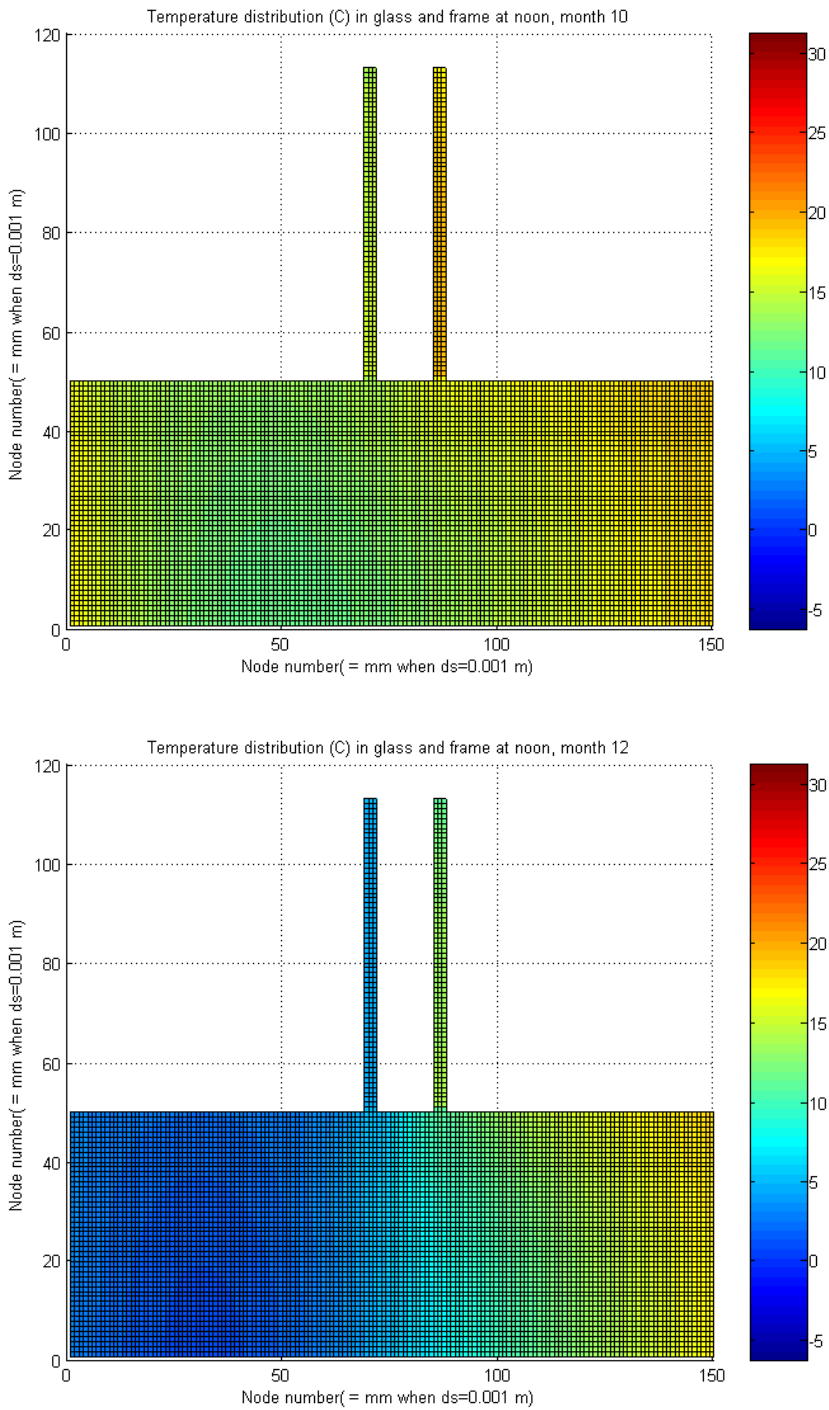
W przypadku ramy okiennej przebieg zmian przepływu ciepła z lub do pomieszczenia odwzorowuje charakter zmian stanu termicznego otoczenia, zdeterminowany przede wszystkim zmianami temperatury powietrza zewnętrznego w ciągu doby, a także choć w mniejszym stopniu oddziaływaniem promieniowania słonecznego. Ten nieznaczny wpływ przede wszystkim uwidacznia się mniejszymi stratami ciepła przez ramę do otoczenia przy lepszych warunkach nasłonecznienia, tj. przy „lepszej” orientacji ramy i mniejszym jej pochyleniu. Jednakże, przy mniejszym pochyleniu, w nocy straty cieplne są nieznacznie większe, co jak już wspomniano, jest m.in. wynikiem większej wymiany ciepła przez promieniowanie z pozornym nieboskłonem.

Charakterystyczną cechą przepływu ciepła przez ramę jest jego zależność od zmian temperatury otoczenia atmosferycznego. Rama charakteryzuje się określoną pojemnością cieplną, oddziaływanie środowiska zewnętrznego na wnętrze pomieszczenia jest przesunięte w czasie (kilka godzin). Przez większą część roku występują straty ciepła z pomieszczenia przez ramę do otoczenia zewnętrznego. Przepływ ciepła z zewnątrz do pomieszczenia występuje tylko okresowo latem.

Należy zaznaczyć, że rama jest przestrzennie najbardziej złożonym elementem okna, jej powierzchnie zewnętrzne (i wewnętrzne) są różnie ułożone względem siebie, w konsekwencji oddziaływanie promieniowania słonecznego dotyczy różnie zorientowanych i pochylonych (względem Słońca) powierzchni ramy, co zostało wzięte pod uwagę przy tworzeniu modelu matematycznego napromieniowywania ramy.



Rys. 5.4a-b Pole temperatury: rama i obrzeże, okno południowe pionowe 1x1m², 12⁰⁰, III, VI



Rys. 5.4c-d Pole temperatury: rama i obrzeże, okno południowe pionowe 1x1m², 12⁰⁰, X, XII

Przepływ ciepła przez ramę z reguły odnosi się do sumarycznego ciepła wymianianego przez wszystkie powierzchnie ramy, które są względem siebie różnie usytuowane (mają różną orientację i pochylenie), a więc także położone względem Słońca. Stąd też przy sumarycznie potraktowanym przepływie ciepła przez ramę, oddziaływanie promieniowania słonecznego jest również ujęte sumarycznie z uwzględnieniem odpowiedniego usytuowania elementów ramy.

Rama i przeszklenie oddziałują na siebie. Stworzony model obliczeniowy pozwala symulować zjawiska zachodzące w oknie i jego otoczeniu, i w efekcie m.in. wyznaczyć pole temperatury w ramie i przeszkleniu w dowolnym czasie. Na rysunkach 5.4a-d przedstawiono rozkład temperatury w ramie i obrzeżu szyb okna południowego pionowego o wymiarach $1 \times 1 \text{ m}^2$, o godzinie 12-tej w południe w uśrednionych dniach w wybranych miesiącach roku, tj. w marcu, czerwcu, październiku i grudniu. Na zamieszczonych rysunkach widać jak różne warunki termiczne istnieją na powierzchniach granicznych ramy, na obrzeżach przeszklenia szyby wewnętrznej i zewnętrznej, i w nich samych.

Ze względu na zastosowaną skalę kolorów (na wszystkich rysunkach dla różnych miesięcy taka sama) i rozmiar rys. 5.4 nie jest widoczne zróżnicowanie temperatury obrzeża ramy na jej wysokości. Dlatego też zamieszczono rys. 5.5a-d. i 5.6a-h, które przedstawiają zróżnicowanie pomiędzy stanem termicznym ramy, obrzeża szyb, części centralnej szyb oraz otoczenia wewnętrznego i zewnętrznego dla dwóch miesięcy stycznia (rys. 5.5) i czerwca (rys. 5.6), reprezentujących skrajne warunki napromieniowania słonecznego. Rysunki dotyczą okien ($1 \times 1 \text{ m}^2$) zorientowanych w podstawowych czterech kierunkach. Jednakże wobec małego wpływu pochylenia na rozkład temperatury różnych elementów okna w styczniu, wykresy zamieszczone na rys. 5.5a-d dotyczą tylko okien pionowych. Natomiast w związku z większym zróżnicowaniem danych w lipcu, rysunki 5.6a-h dotyczą zarówno okien pionowych, jak i pochylonych pod kątem 45° . Na rysunkach umieszczonych na jednej stronie legenda jest często wspólna dla obu.

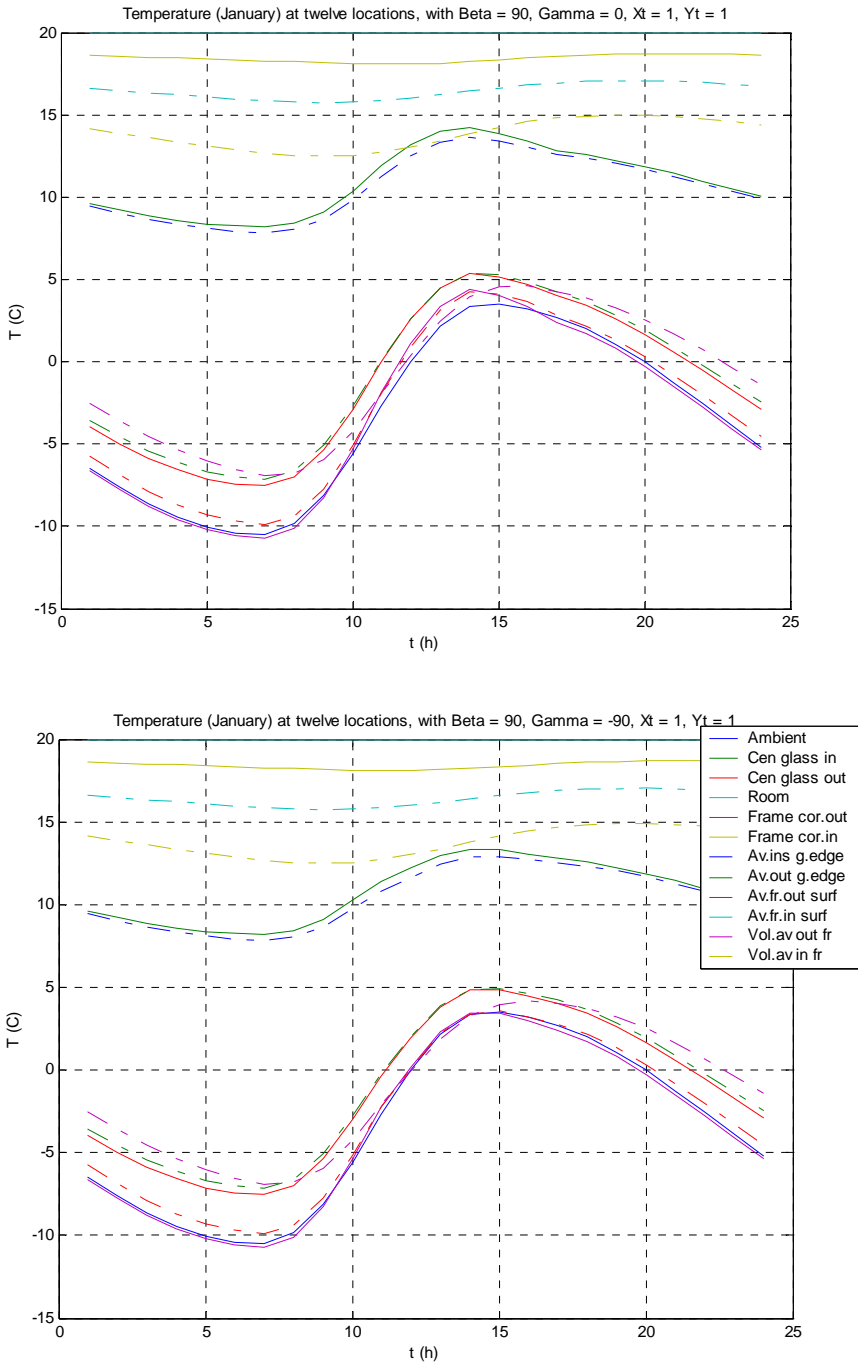
Rysunki 5.5 i 5.6 przedstawiają wybrane zmiany dobowe następujących temperatur różnych ośrodków: otoczenia zewnętrznego i wewnętrznego, i elementów okna:

- temperatura powietrza zewnętrznego (*Ambient*),
- temperatura centralnej części przeszklenia wewnętrznego (*Cen.glass in*),
- temperatura centralnej części przeszklenia zewnętrznego (*Cen.glass out*),
- temperatura powietrza wewnętrznego (*Room*),
- temperatura narożnika ramy zewnętrznej (*Frame cor.out*),
- temperatura narożnika ramy wewnętrznej (*Frame cor.in*),
- średnia temperatura obrzeża szyby zewnętrznej (*Av.out. g.edge*),
- średnia temperatura obrzeża szyby wewnętrznej (*Av.ins. g.edge*),
- średnia temperatura powierzchni zewnętrznej ramy (*Av.fr. out surf.*),
- średnia temperatura powierzchni wewnętrznej ramy (*Av.fr. in surf.*),
- średnia temperatura całej zewnętrznej części ramy (*Vol. av. out fr.*),
- średnia temperatura całej wewnętrznej części ramy (*Vol. av. in fr.*).

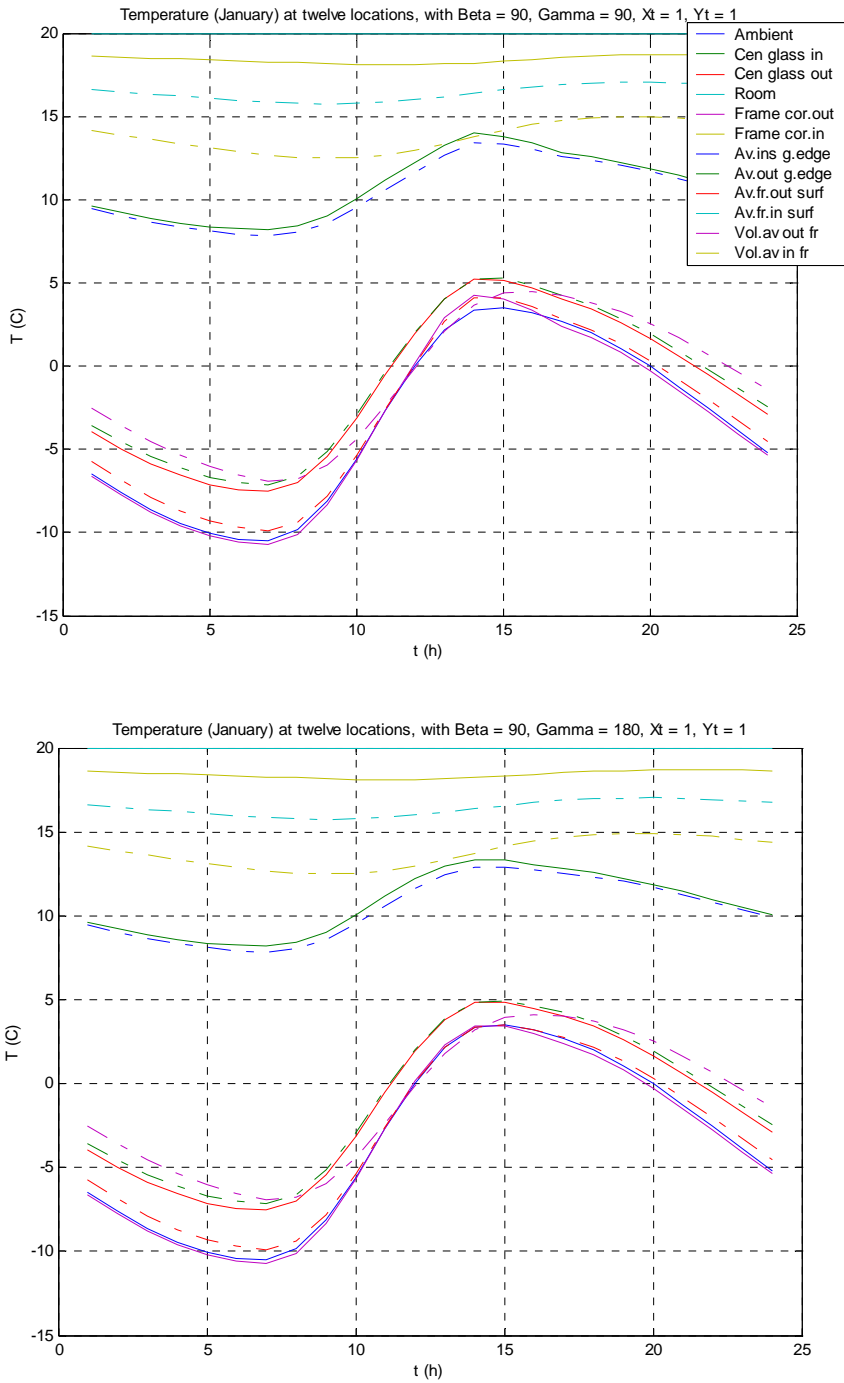
W styczniu, w przypadku całej zewnętrznej części okna, tzn. przeszklenia i ramy, ich stan termiczny jest ściśle związany ze zmieniającymi się warunkami otoczenia zewnętrznego. Jak już wspomniano, w zimie napromieniowanie jest niewielkie, parametrem środowiska zewnętrznego decydującym o procesach cieplnych zachodzących w ramie jest temperatura powietrza zewnętrznego i niebosłonu. Temperatura zewnętrznej części ramy zmienia się podobnie jak temperatura powietrza zewnętrznego. Podobnie zmienia się również temperatura części centralnej zewnętrznej szyby i jej obrzeża, przy czym są one wyższe od temperatury zewnętrznej powierzchni ramy. Okno tłumi oddziaływanie środowiska zewnętrznego. Różnice temperatur pomiędzy poszczególnymi elementami okna od wewnątrz są większe niż od zewnątrz. Temperatura wewnętrznej powierzchni ramy jest wyższa od temperatury części centralnej przeszklenia, która jest z kolei cały czas nieznacznie wyższa od temperatury obrzeża. Na temperaturę obrzeża szyby wewnętrznej okna poprzez ramę wyraźnie wpływają zjawiska zachodzące w otoczeniu zewnętrznym, które są przekazywane przez ramę zachowującą się jak swoisty mostek cieplny.

W okresie zimy poziom napromieniowania powierzchni obudowy budynku jest niewielki, w konsekwencji niewielka część promieniowania słonecznego jest pochłaniania w szybach powodując nieznaczny wzrost ich temperatury. Jednakże znaczna część promieniowania słonecznego (około 80%) dzięki dużej transmisyjności szyb przechodzi przez przeszklenie bezpośrednio do wnętrza. Należy więc zaznaczyć, że nawet jeśli poziom natężenia promieniowania słonecznego jest mały to korzystanie jedynie z różnicy temperatur pomiędzy szybami i ich otoczeniem przy opisie przepływu energii przez okno znacznie upraszcza obraz zachodzących zjawisk i prowadzi do nieuwzględnienia wszystkich składników bilansu energetycznego pomieszczenia.

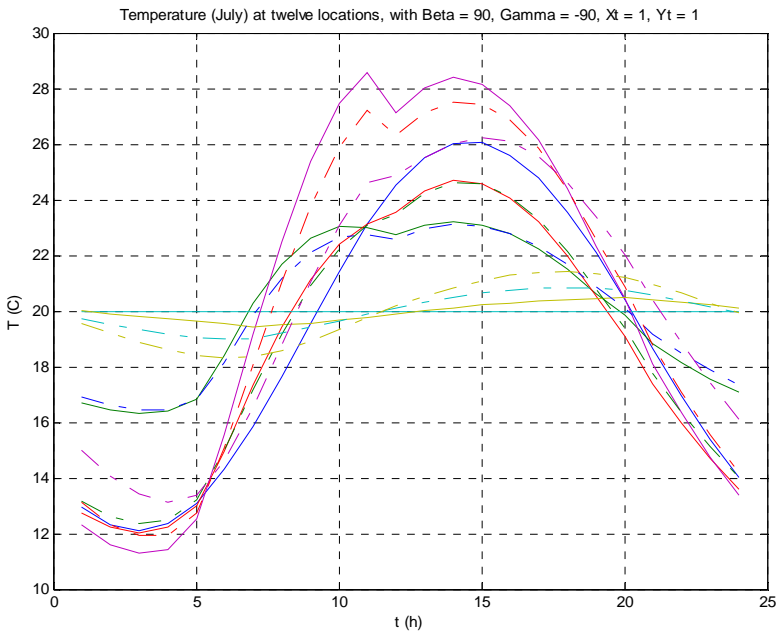
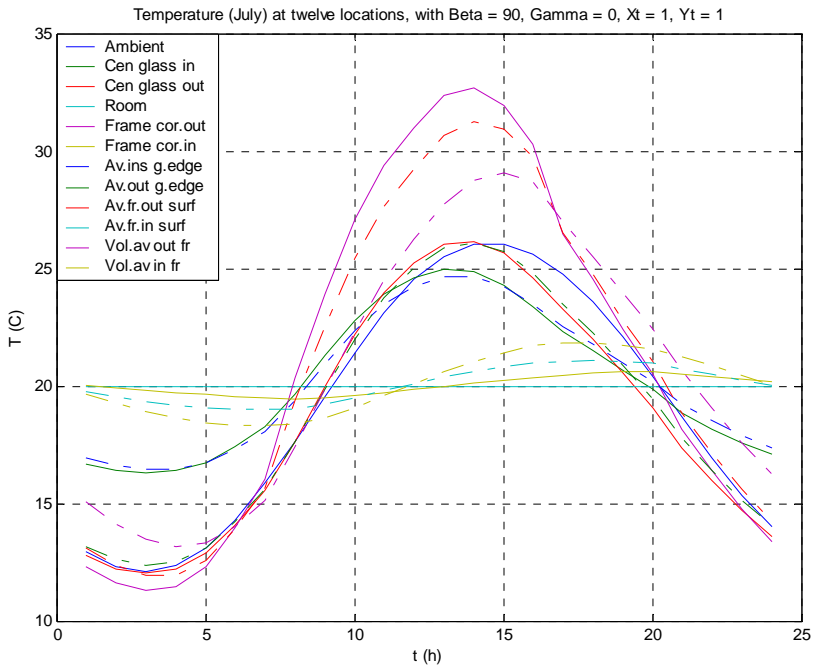
Na kolejnych rysunkach 5.6a-h wykresy przedstawiają zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach różnych ośrodków w lipcu. Wykresy te różnią się wyraźnie przebiegiem od rozkładów dobowych temperatur w styczniu. Wpływ oddziaływania promieniowania słonecznego na rozkład temperatury elementów okna jest bardzo widoczny (latem poziom napromieniowania jest wysoki). Rozkład temperatury szyby zewnętrznej w ciągu dnia jest kompilacją oddziaływania temperaturowego bezpośredniego środowiska zewnętrznego i promieniowania słonecznego. Z jednej strony rozkład temperatury szyby zewnętrznej odwzorowuje w sposób przybliżony rozkład temperatury powietrza zewnętrznego, z drugiej rozkład natężenia promieniowania słonecznego, który zależy od zorientowania i nachylenia powierzchni, na którą pada promieniowanie



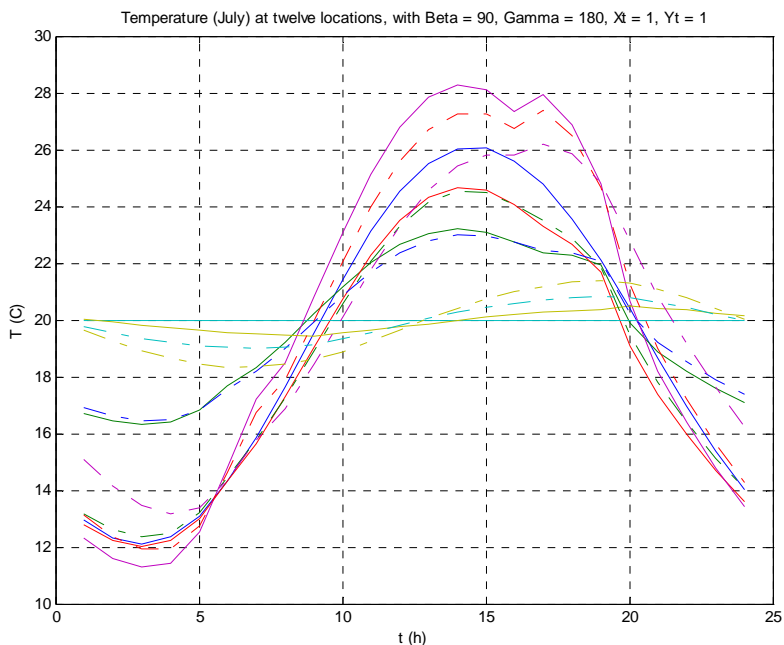
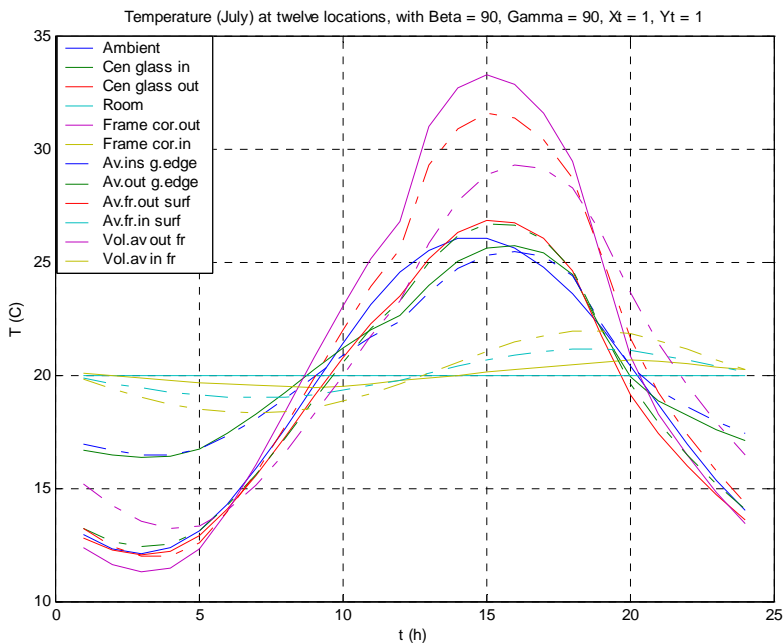
Rys. 5.5a-b Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach pionowego okna południowego i wschodniego, i ich otoczenia w styczniu.



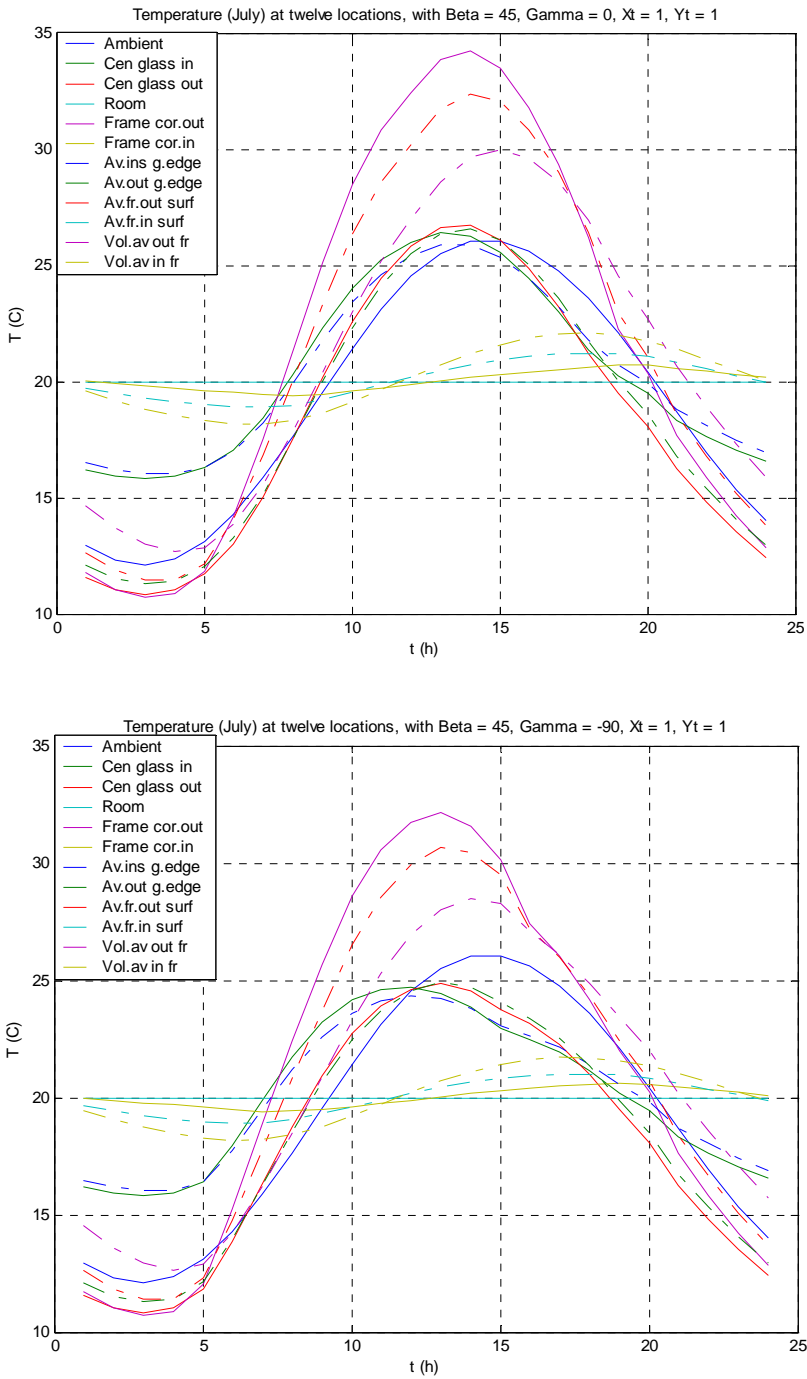
Rys. 5.5 c-d Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach pionowego okna zachodniego i północnego, i w ich otoczenia w styczniu



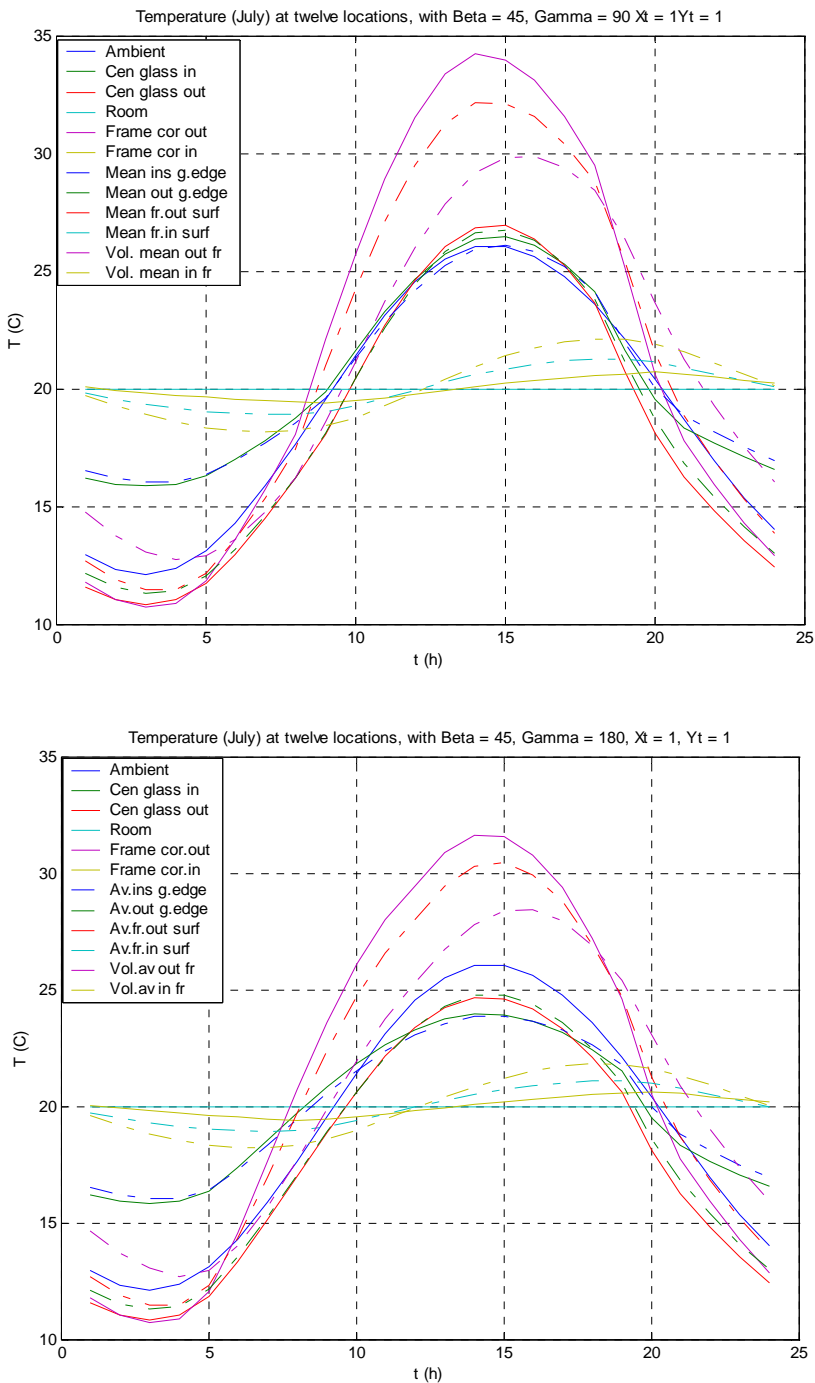
Rys. 5.6a-b Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach pionowego okna południowego i wschodniego, i ich otoczenia w lipcu



Rys. 5.6 c-d Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach okna pionowego zachodniego i północnego, i w ich otoczenia w lipcu



Rys. 5.6 e-f Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach pochylonego południowego i wschodniego, oraz ich otoczenia w lipcu



Rys. 5.6g-h Zmiany dobowe temperatury w wybranych miejscach okna pochylonego zachodniego i północnego oraz ich otoczenia w lipcu

Temperatura przeszklenia zewnętrznego może ulegać istotnym wahaniom w krótkim okresie czasu, jeśli występują duże i nagłe zmiany w jej napromieniowywaniu. Wahania temperatury szyby zewnętrznej z pewnym opóźnieniem czasowym „przenoszą się” na szybę wewnętrzną. Szyba zewnętrzna „reaguje” względnie szybko na zmiany zachodzące w środowisku zewnętrznym zdeterminowane temperaturą powietrza zewnętrznego i natężeniem promieniowania słonecznego. Natomiast „reakcja” szyby wewnętrznej jest stłumiona, wyraźna jest rola konstrukcji okna w wymianie energii pomiędzy ośrodkiem zewnętrznym i wewnętrznym.

W lecie temperatura ramy od strony wewnętrznej oscyluje względnie blisko temperatury pomieszczenia wewnętrznego. Temperatura szyby wewnętrznej w części centralnej w ciągu dnia jest z reguły niższa od temperatury otoczenia zewnętrznego, w nocy wyższa. Temperatura obrzeża przeszklenia jest bardzo zbliżona do temperatury części centralnej szyby, przy czym w nocy temperatura ta jest nieznacznie wyższa, a w ciągu dnia niższa.

Zwiększanie rozmiaru okna nie wpływa na rozkład temperatury w elementach okna. Natomiast pochylanie powierzchni okna ma wpływ na rozkład temperatury. Przy zmniejszeniu pochylecia temperatura poszczególnych elementów okna zmienia się w ciągu dnia w sposób względnie łagodny, co wynika z napromieniowywania tych powierzchni promieniowaniem bezpośrednim przez dłuższy okres czasu, niż w przypadku powierzchni pionowych. Wzrasta wyraźnie temperatura przeszklenia, co jest związane ze wzrostem pochłaniania promieniowania słonecznego w wyniku lepszej dostępności promieniowania słonecznego przy tak pochylonych powierzchniach. Najwyższe temperatury powierzchni zewnętrznej osiąga szyba południowa (przy pionowych przegrodach jest to szyba zachodnia). Temperatura szyby wewnętrznej przez dłuższy okres czasu jest wyższa od temperatury otoczenia zewnętrznego, co wskazuje na wzrost tendencji do przegrzewania pomieszczeń z oknami połaciowymi. Ponadto, jak już wspomniano analizowany wzrost temperatury jest efektem tylko wzrostu temperatury otoczenia zewnętrznego i pochłaniania energii promieniowania słonecznego w szybach. Pomieszczenie ulega również oddziaływaniu promieniowania słonecznego, które bezpośrednio dociera do wnętrza przez szyby o określonej transmisyjności, co znacznie intensyfikuje efekt przegrzewania pomieszczeń.

5.4 Zapotrzebowanie na ciepło i chłód

Budynek ulega oddziaływaniom różnych czynników środowiska zewnętrznego i wewnętrznego. Analizowany budynek został przyjęty jako obiekt wykonany zgodnie z obowiązującymi zasadami energooszczędności. Nieprzezroczyste przegrody (trójwarstwowe) charakteryzują się dobrą izolacyjnością cieplną. Instalacja wentylacyjna (mechaniczna) jest wyposażona w urządzenia rekuperacyjne. Zapotrzebowanie na ciepło w wyniku przepływu ciepła przez przegrody nieprzezroczyste i na cele wentylacyjne jest więc znacznie ograniczone. Okna są standardowe, dobrej jakości, z wkładką izolacyjną w szczelinie gazowej między

szybami (w rozpórce). W rozważaniach przyjęto, że temperatura pomieszczeń jest utrzymywana na stałym poziomie w ciągu całego roku, dzięki odpowiedniemu sterowaniu automatyką funkcjonowania urządzeń grzewczo /klimatyzacyjnych.

Na podstawie stworzonego modelu matematycznego i przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych procesów zachodzących w obudowie budynku i jego otoczeniu, dla wybranych przykładowych pomieszczeń i ich rozwiązań materiałowo – konstrukcyjnych, uzyskano przebieg zmienności w czasie zapotrzebowania na ciepło chłód oraz innych składowych bilansu energetycznego budynku. Przykładowe wyniki zostały przedstawione poniżej w sposób graficzny i w postaci tabelaryzowanej w Załączniku 3.

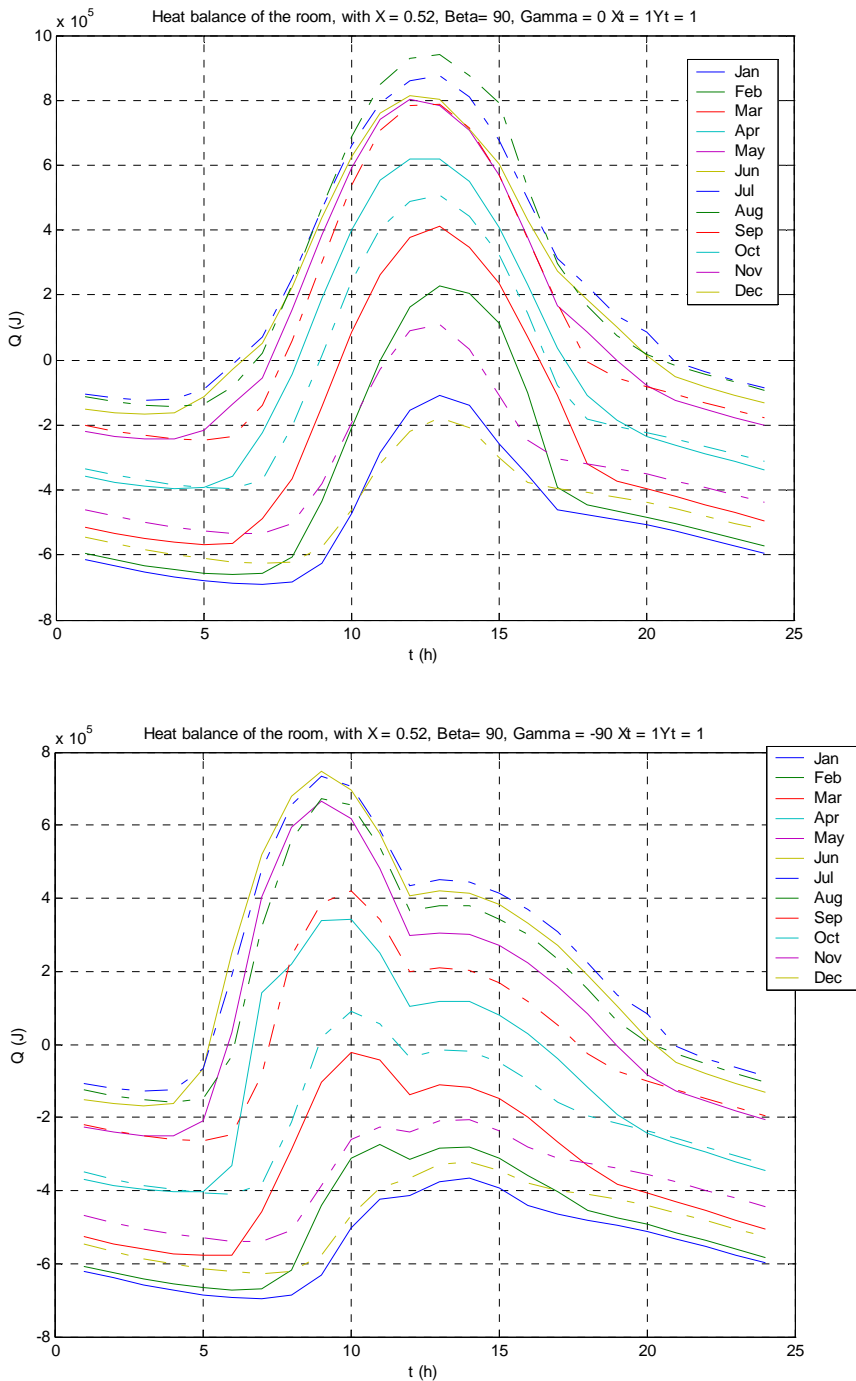
Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że rzeczywiście zgodnie z poczynionymi założeniami odnośnie rozwiązań materiałowych przegród nieprzezroczystych budynku, udział wymiany ciepła przez te przegrody jest bardzo mały i stanowi z reguły najmniej istotny element bilansu energetycznego pomieszczenia w skali roku. Dla przyjętych w rozważaniach rozwiązań materiałowo – strukturalnych modelowych pomieszczeń udział ten wynosi zwykle zaledwie kilka procent w całkowitym rocznym bilansie energetycznym i nawet w przypadku najmniej dogodnej orientacji pomieszczeń, tj. północnej, nie przekracza 10%. Zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych, pomimo zastosowania rekuperacji ciepła w układach wentylacyjnych, stanowi nadal ważny element rocznego bilansu pomieszczenia. Waha się on w skali roku od kilkunastu procent, w przypadku najlepiej napromieniowywanych pomieszczeń, do 40% w przypadku pomieszczeń północnych. Zdecydowanie największy wpływ na roczny bilans cieplny pomieszczenia ma okno, które staje się podstawowym i newralgicznym elementem bilansu cieplnego pomieszczenia, a przez to projektu budynku.

Należy jednak zaznaczyć, że odnoszenie się do udziału rocznego poszczególnych składowych bilansu znacznie upraszcza obraz zachodzących zjawisk i nie oddaje ich rzeczywistej istoty. Rola okna w bilansie energetycznym rośnie ze wzrostem jego powierzchni i ściśle zależy od pory roku. W najzimniejszych miesiącach sezonu grzewczego, przy małej powierzchni okien pionowych (mniejszej niż obowiązująca ze względów oświetleniowych) ich udział w bilansie miesięcznym jest poniżej 30% dla okien południowych i wynosi około 35% dla północnych. W tym okresie dominującym składnikiem obciążeń jest zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych, które waha się od 40 do 45% (pomimo rekuperacji), a udział strat ciepła przez przegrody nieprzezroczyste wynosi około 25%. Przy wzroście powierzchni okien (powyżej obowiązującej minimalnej powierzchni ze względów oświetleniowych) udział zapotrzebowania na ciepło wynikające z przepływu energii przez okno jest bardzo duży i stanowi ponad 60% w przypadku okien południowych i ponad 70% w przypadku północnych. Udział przegród nieprzezroczystych spada poniżej 10%, a zapotrzebowanie do celów wentylacyjnych jest na poziomie 25 i 20% odpowiednio. Przy odchylaniu okien od pionu ich udział w bilansie energetycznym jeszcze wzrasta, odpowiednio o kilka procent.

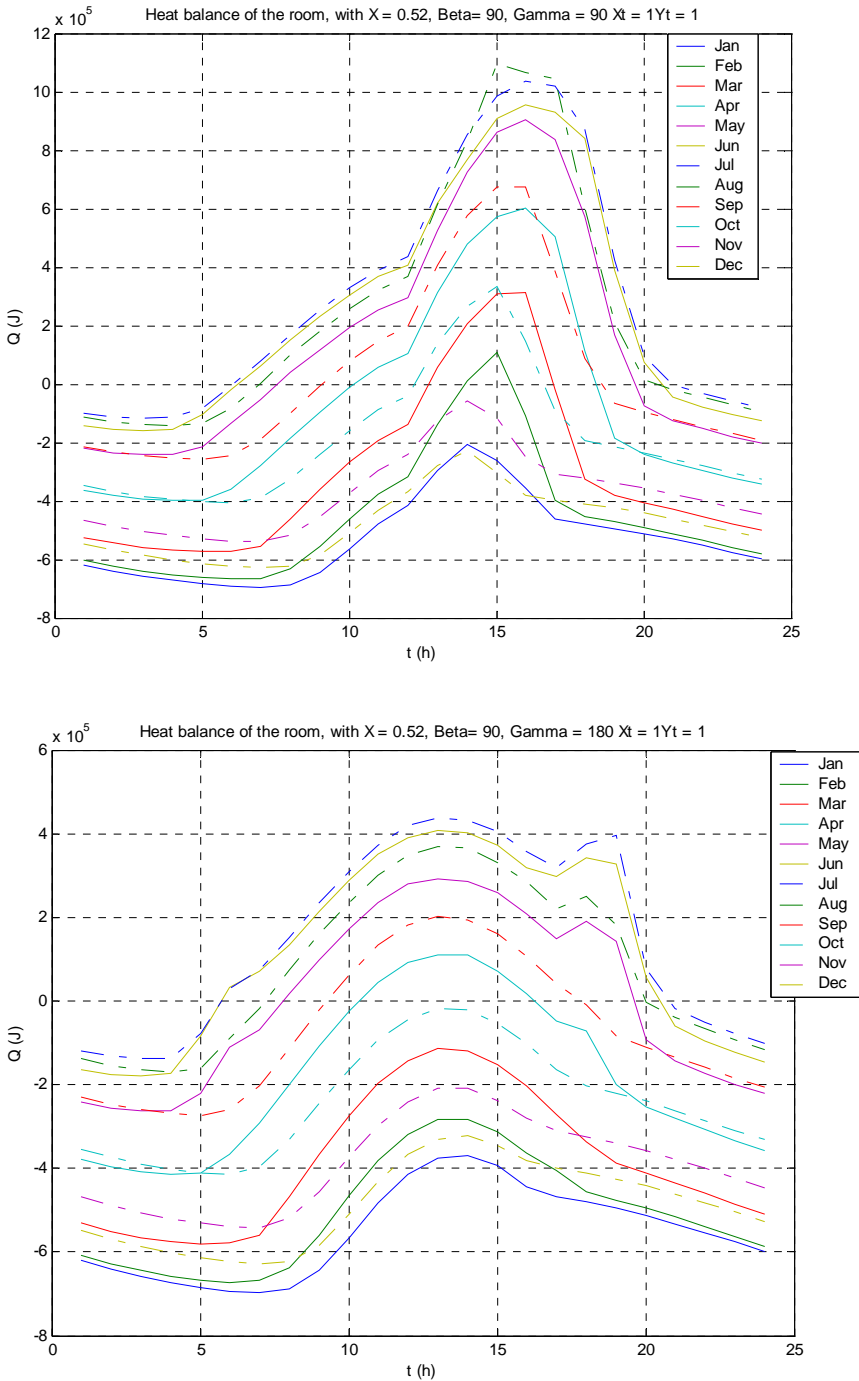
Szczególnie wyraźny wpływ okna na bilans cieplny pomieszczenia występuje w okresie letnim, kiedy pozostałe składowe bilansu, takie jak wymiana ciepła przez przegrody nieprzezroczyste i do celów wentylacyjnych jest na niewielkim poziomie. Pochylenie powierzchni okna i innych przegród zewnętrznych zwiększa znacznie przepływ energii do wnętrza pomieszczenia. W czasie lata zapotrzebowanie na chłód wynika przede wszystkim z powodu istnienia okien. Należy zaznaczyć, że przy dużej powierzchni okien dla wszystkich podstawowych orientacji, poza północną, do rozważanych pomieszczeń w ciągu roku więcej ciepła napływa przez okna niż odpływa. Można, więc stwierdzić, że podstawowym elementem bilansu energetycznego pomieszczenia jest zapotrzebowanie na chłód i ciepło wynikające z istnienia okien, które wzrasta z ich powierzchnią i odchyleniem od pionu (w stronę poziomą). Jednocześnie, nadal nawet przy zapewnieniu rekuperacji ciepła z układów wentylacyjnych, istotnym elementem bilansu cieplnego pomieszczenia pozostaje zapotrzebowanie na ciepła do celów wentylacyjnych.

Na rysunkach 5.7a-h i 5.8a-h przedstawiono przebiegi zmian zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu jednego reprezentatywnego dnia w kolejnych miesiącach roku. Wykresy przedstawiają rozkład zapotrzebowania na ciepło/chłód pomieszczeń zorientowanych w czterech podstawowych kierunkach (stronach świata). Rysunki 5.7a-h dotyczą pomieszczeń ograniczonych przegrodami pionowymi, natomiast rys. 5.8a-h pomieszczeń ograniczonych przegrodami pochylonymi (45° względem poziomu). Podobnie jak na poprzednich rysunkach, tak i na tych uwzględniono dwie wielkości okien, okna o wymiarze $1 \times 1 \text{ m}^2$ i $2 \times 2 \text{ m}^2$. Należy zaznaczyć, że rozkład wartości energii nie jest funkcją ciągłą, lecz schodkową, ale ze względu na dużą liczbę danych wartości energii (godzinne) dla wyraźniejszej prezentacji wyników obliczeń, wartości energii poszczególnych obciążeń są połączone linią ciągłą.

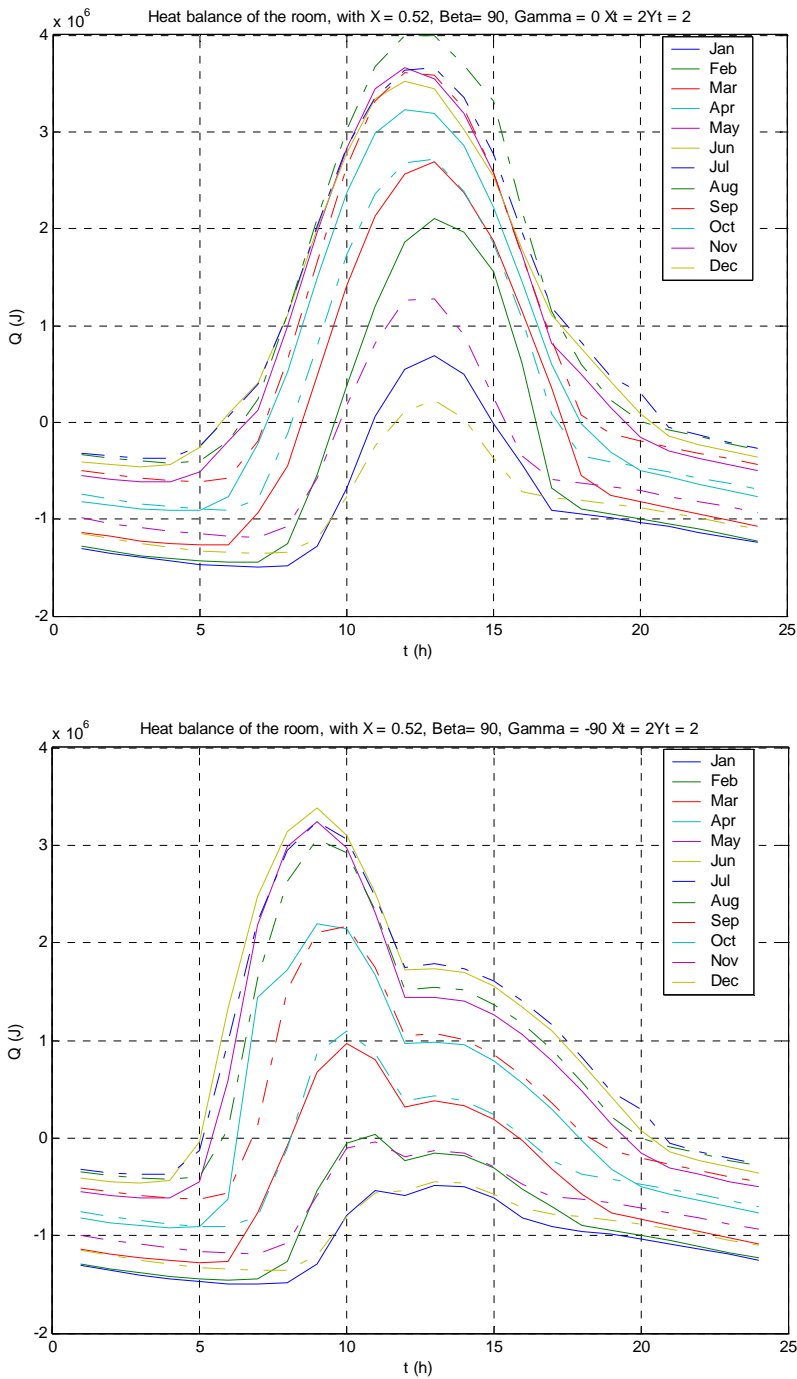
Podstawową cechą przebiegu zmian zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu jednego reprezentatywnego dnia w kolejnych miesiącach roku jest względnie mała zmienność tego przebiegu w czasie nocy i duża zmienność w czasie dnia. Ta duża zmienność dziennego zapotrzebowania na chłód/ciepło jest zgodna z przebiegiem zmian dziennego napromieniowania słonecznego powierzchni obudowy budynku i jest szczególnie wyraźna w lecie, gdy natężenie promieniowania słonecznego jest duże. W rezultacie w ciągu dnia przy dużym napromieniowaniu słonecznym, dla spełnienia postawionego warunku stałości temperatury wewnętrznej pomieszczenia, występuje konieczność dostarczania do niego chłodu. Wielkość dostarczanego chłodu do potrzeb klimatyzacyjnych zależy od zorientowania przegrody zewnętrznej obudowy pomieszczenia, jej pochylecia i wielkości okna. Zapotrzebowanie na chłód w miesiącach letnich jest bardzo wyraźne dla pomieszczeń budynku o usytuowaniu powodującym zwiększenie dostępności promieniowania słonecznego (południowych i zachodnich) i jest decydującym składnikiem bilansu energetycznego budynku. Największe zapotrzebowanie na chłód występuje w pomieszczeniach o przegrodach zewnętrznych pochylonych, czyli na poddaszach użytkowych z oknami połaciowymi (większe niż w pomieszczeniach o tej samej orientacji, ale o przegrodach pionowych). Wielkość okien ma tu również duże znaczenie.



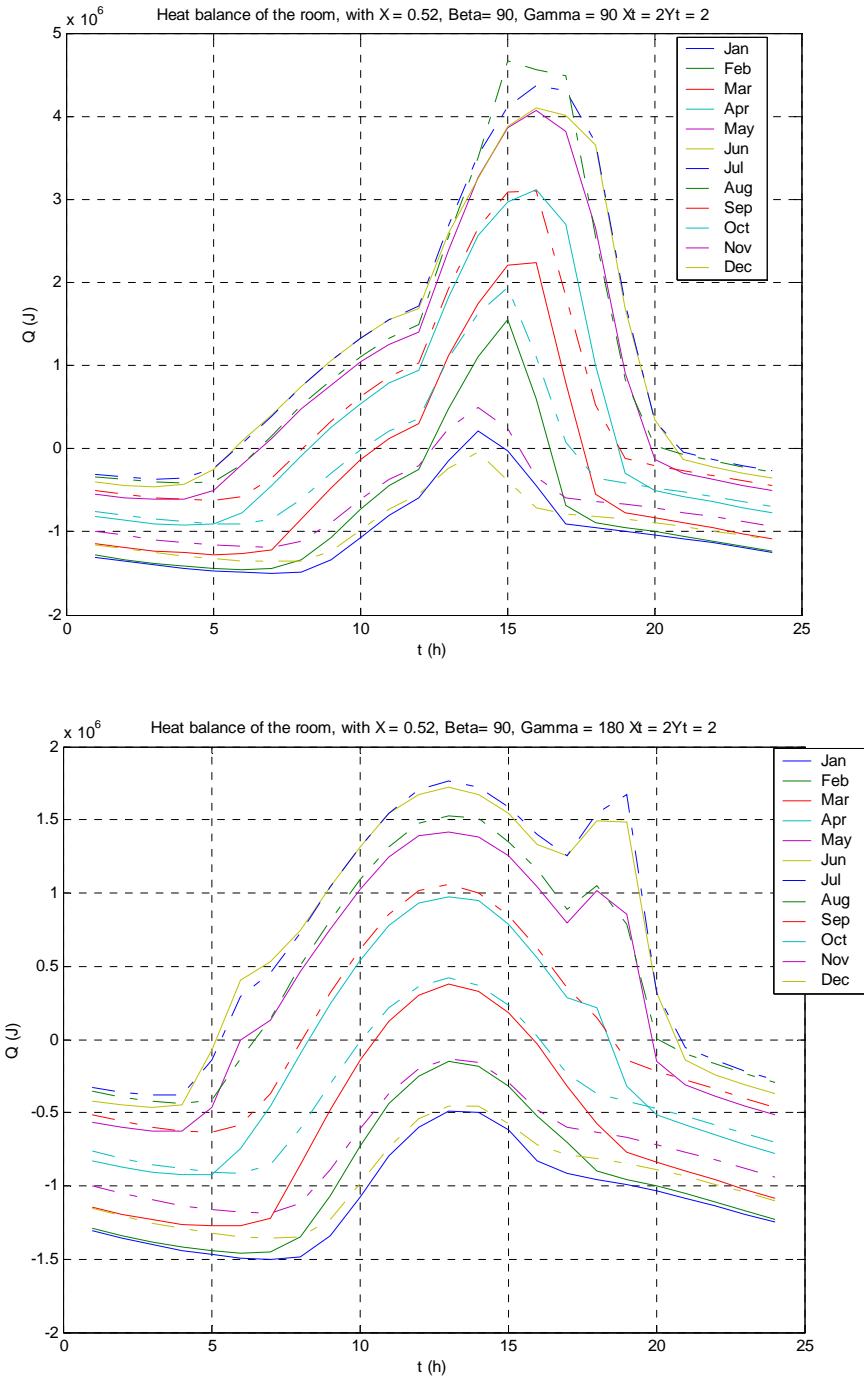
Rys. 5.7a-b Rozkład zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu dnia w kolejnych miesiącach, dla pomieszczeń z przegrodami pionowymi południowymi i wschodnimi, $1 \times 1 \text{m}^2$



Rys. 5.7c-d Rozkład zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu dnia w kolejnych miesiącach, dla pomieszczeń z przegrodami pionowymi zachodnimi i północnymi, $1 \times 1 \text{m}^2$



Rys. 5.7e-f Rozkład zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu dnia w kolejnych miesiącach, pomieszczeń z przegrodami pionowymi południowymi, wschodnimi ($2 \times 2 \text{m}^2$)



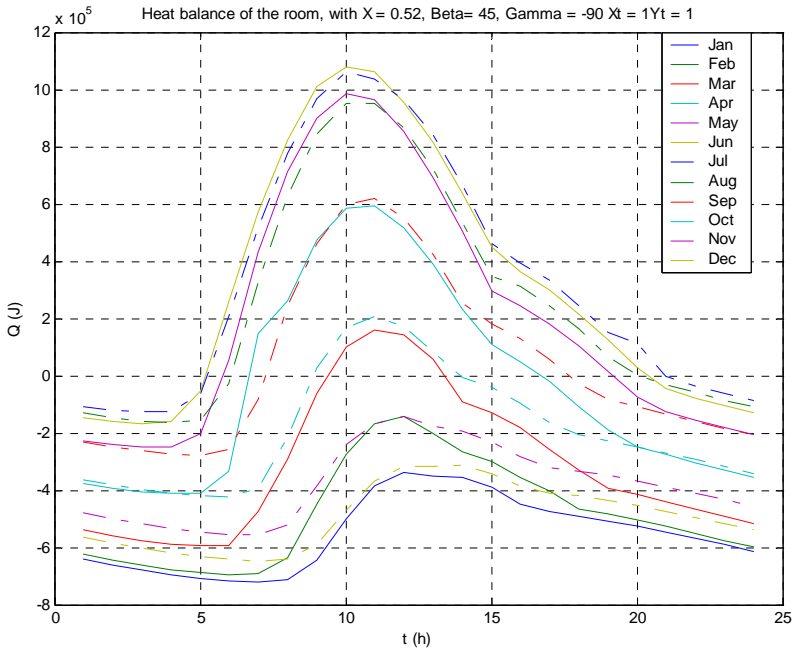
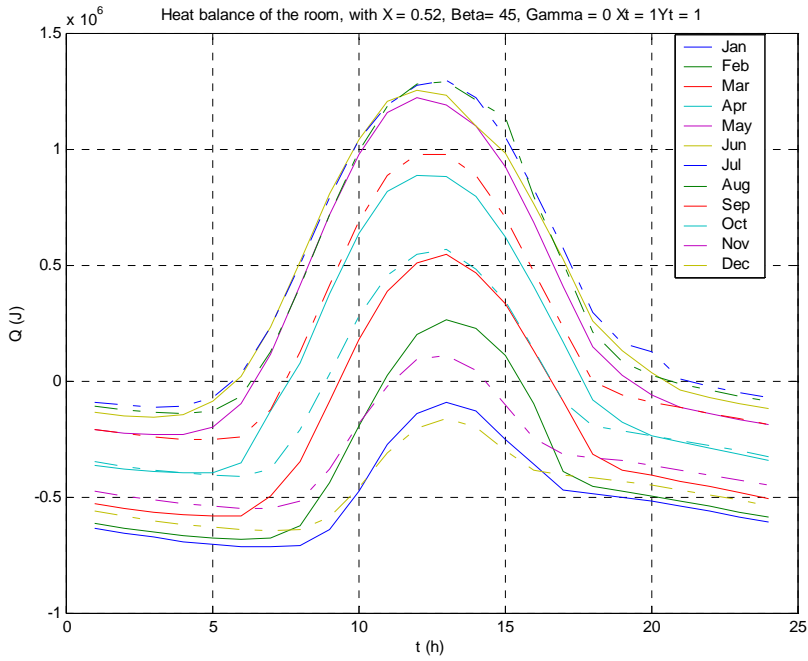
Rys. 5.7g-h Rozkład dobowego zapotrzebowania na ciepło/chłód w kolejnych miesiącach, pomieszczeń z przegrodami pionowymi zachodnimi i północnymi ($2 \times 2 \text{m}^2$)

W przypadku przegród pionowych największe zapotrzebowanie na chłód występuje dla pomieszczeń południowych i zachodnich, następnie wschodnich, w okresie od maja do końca sierpnia, przy czym dla różnych orientacji maksimum zapotrzebowania przypada na różne miesiące.

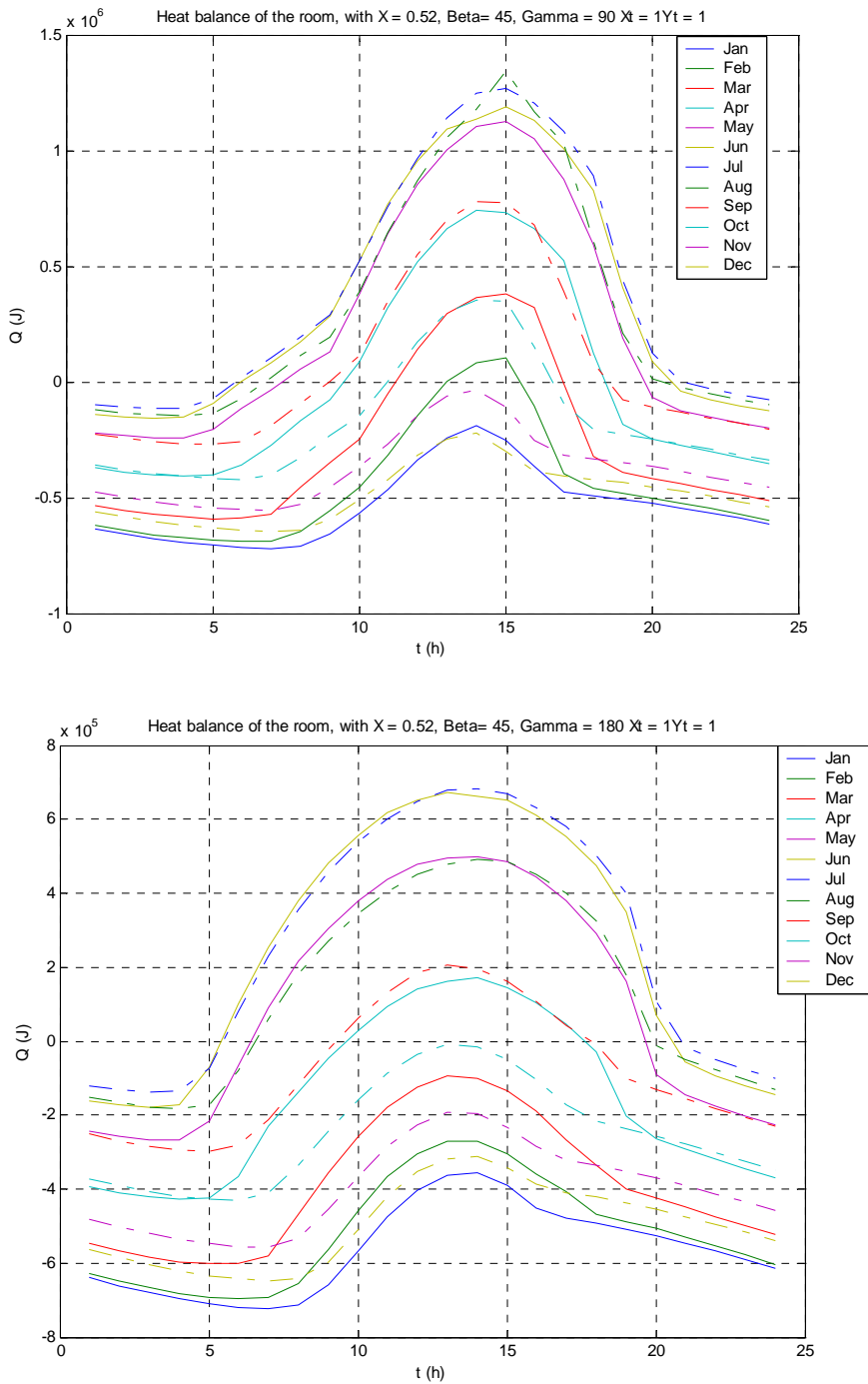
Charakterystyczny jest fakt, że latem od maja do końca lipca spośród powierzchni pionowych najlepiej napromieniowywane są powierzchnie zachodnie, a począwszy od sierpnia południowe. W pomieszczeniach północnych zapotrzebowanie na chłód również występuje, ale jest dwukrotnie niższe niż w pomieszczeniach zachodnich i południowych. Rozkład dobowy zapotrzebowania na chłód bardzo wyraźnie zależy od orientacji pomieszczenia, wyraźne maksima obciążeń pojawiają się o odpowiedniej porze dnia w zależności od orientacji. Dla pomieszczeń północnych występuje charakterystyczny pik w godzinach południowo-wieczornych, kiedy pomieszczenie bezpośrednio powtórnie w ciągu dnia „widzi” Słońce, a poziom napromieniowania jest jeszcze względnie wysoki.

Przy odchyłaniu przegród od pionu w stronę poziomu powierzchnie obudowy dłużej „widzą” Słońce i są bardziej napromieniowywane niż powierzchnie pionowe. W efekcie latem zapotrzebowanie na chłód w ciągu dnia jest większe, ale zmienia się bardziej równomiernie. Największe zapotrzebowanie na chłód mają pomieszczenia południowe i zachodnie. Lepsza dostępność promieniowania słonecznego powoduje, że w zimie w ciągu dnia zapotrzebowanie na ciepło jest mniejsze niż w pomieszczeniach o przegrodach pionowych i jego rozkład jest także bardziej równomierny w czasie dnia. Wpływ orientacji pomieszczeń (względem stron świata) na obciążenia grzewcze/klimatyzacyjne jest widoczny, ale w mniejszym stopniu niż dla pomieszczeń z przegrodami pionowymi. Wpływ orientacji na obciążenia rośnie ze wzrostem pochylenia powierzchni obudowy względem poziomu. W nocy zapotrzebowanie na ciepło jest nieznacznie wyższe, co jest spowodowane wspomnianym już wcześniej „chłodzeniem” nocnym, czyli wymianą ciepła na drodze promieniowania cieplnego z pozornym nieboskłonem.

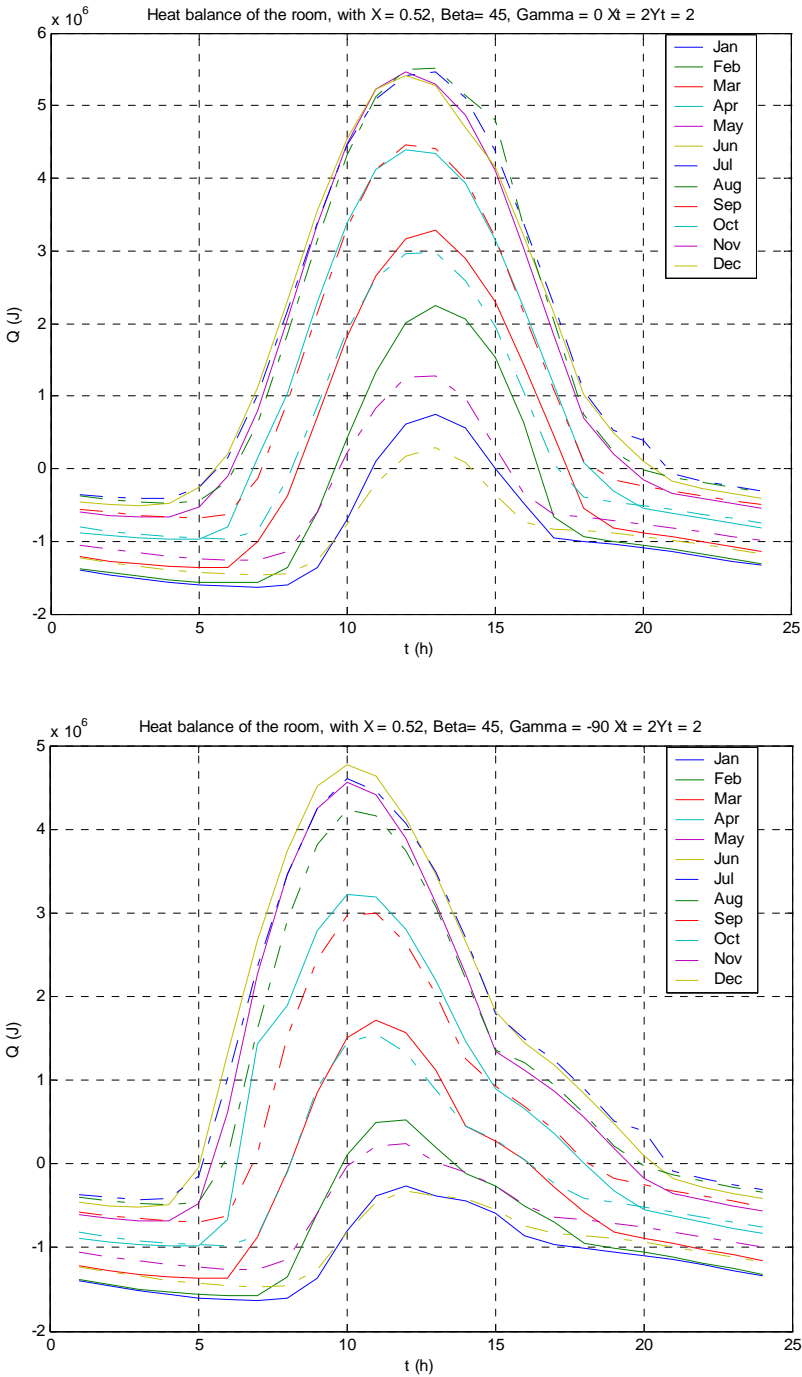
Zapotrzebowanie na chłód latem występuje od wczesnych godzin rannych do późnych wieczornych we wszystkich pomieszczeniach, na poziomie i o rozkładzie zależnym od orientacji i pochylenia przegród. W okresie wczesnej wiosny i wczesnej jesieni, gdy poziom napromieniowania maleje i skraca się liczba godzin dziennych, występuje wyraźne zróżnicowanie w zapotrzebowaniu na chłód dla różnie zlokalizowanych pomieszczeń. Najdłużej w ciągu dnia i w ciągu roku (liczba miesięcy) zapotrzebowanie na chłód występuje dla południowych pomieszczeń, krócej dla zachodnich, następnie dla wschodnich i oczywiście najkrócej dla północnych.



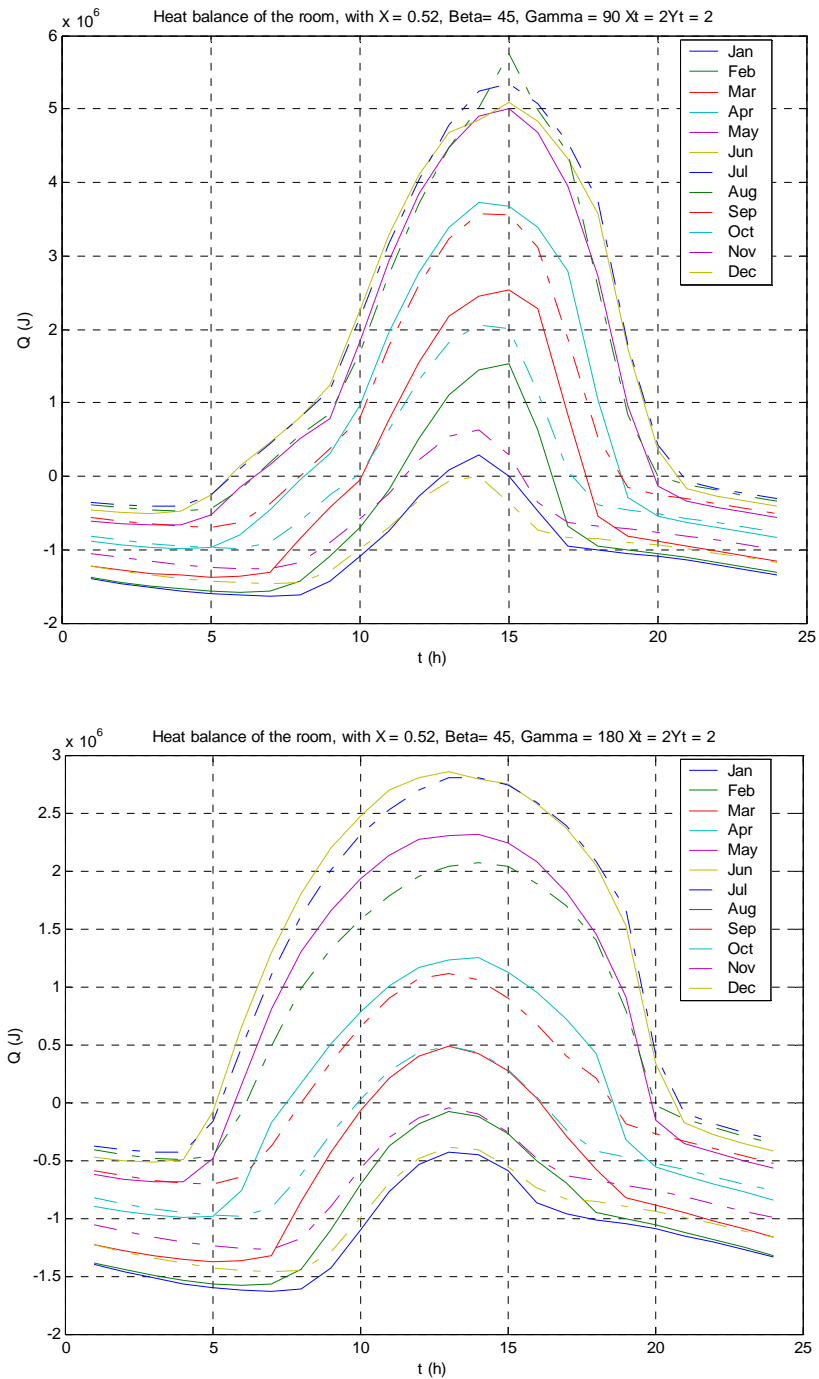
Rys. 5.8a-b Rozkład dobowego zapotrzebowania na ciepło/chłód w kolejnych miesiącach, pomieszczeń z przegrodami pochyłymi południowymi i wschodnimi ($1 \times 1 \text{ m}^2$)



Rys. 5.8c-d Rozkład dobowego zapotrzebowania na ciepło/chłód w kolejnych miesiącach, pomieszczeń z przegrodami pochylonymi zachodnimi i północnymi ($1 \times 1 \text{m}^2$)



Rys. 5.8e-f Rozkład dobowego zapotrzebowania na ciepło/chtód w kolejnych miesiącach pomieszczeń z przegrodami pochylonymi południowymi i wschodnimi ($2 \times 2 \text{m}^2$)



Rys. 5.8g-h Rozkład dobowego zapotrzebowania na ciepło/chłód w kolejnych miesiącach pomieszczeń z przegrodami pochylonymi zachodnimi i północnymi ($2 \times 2 \text{m}^2$)

W zimie w lutym, przy względnie wysokim poziomie promieniowania słonecznego, przez kilka godzin w ciągu dnia w pomieszczeniach południowych (w krótkim okresie czasu także w zachodnich) zyski z promieniowania słonecznego są większe niż straty. Efekt ograniczenia zapotrzebowania na ciepło w ciągu dnia w zimie wzrasta wraz ze wzrostem powierzchni okien (co prawda w nocy rosną straty) i dla pomieszczeń południowych w każdym miesiącu zimy przez kilka godzin dziennie przy dużej powierzchni okien ($2 \times 2 \text{ m}^2$) nie występuje zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń. Podobny efekt, polegający na okresowym braku obciążeń grzewczych w ciągu dnia w kolejnych miesiącach późnej jesieni i zimy, występuje dla zachodniej orientacji pomieszczeń. W przypadku wschodnich pomieszczeń wzrost powierzchni okna powoduje w zimie w ciągu dnia jedynie spadek obciążeń grzewczych. Jednakże, ze wzrostem powierzchni okien znacznie wzrasta zapotrzebowanie na moc grzewczą w nocy, zwłaszcza w zimie. Określenie odpowiedniej powierzchni okien dla danego pomieszczenia i danych wymagań użytkownika wymaga przeprowadzenia oddzielnych szczegółowych rozważań i może być przedmiotem analiz optymalizacyjnych.

Kolejne wykresy zamieszczone na rys. 5.9a-h i 5.10a-h przedstawiają przebieg zmian miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku. Podobnie jak poprzednio wykresy odnoszą się do pomieszczeń zorientowanych w czterech kierunkach. Rysunki 5.9a-h dotyczą pomieszczeń o pionowych przegrodach, natomiast rys. 5.10a-h o przegrodach pochylonych pod kątem 45° względem poziomu i uwzględniają pomieszczenia o oknach o wymiarze $1 \times 1 \text{ m}^2$ i $2 \times 2 \text{ m}^2$. Poza rozkładem miesięcznych obciążeń grzewczych/klimatyzacyjnych w ciągu roku na rysunkach zaznaczono rozkłady poszczególnych składowych bilansu cieplnego pomieszczenia, którymi są:

Q_{wall} ciepło wymieniane przez przegrody nieprzezroczyste:

Q_{ven} ciepło/chłód na potrzeby wentylacji:

Q_{win} energia wymieniana przez okna, której składowymi są z kolei:

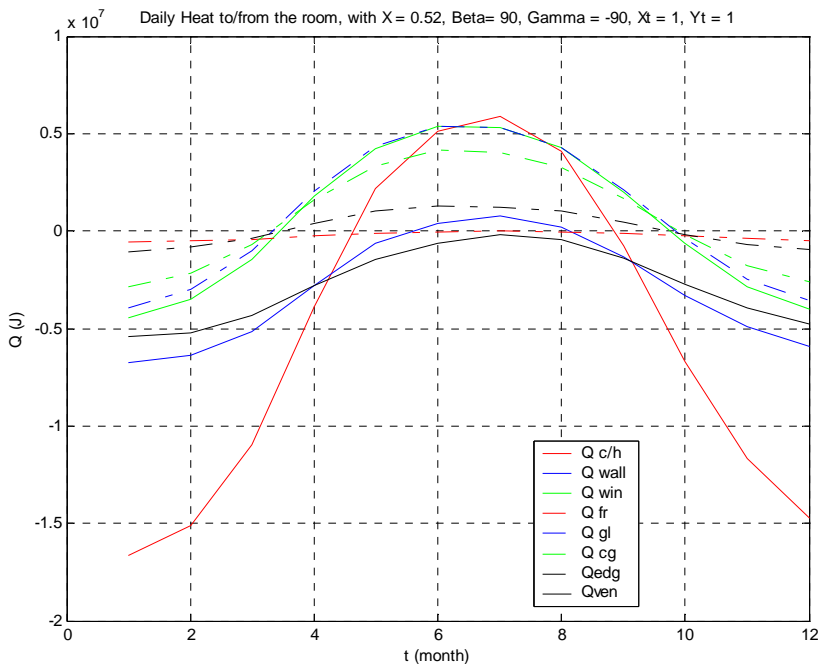
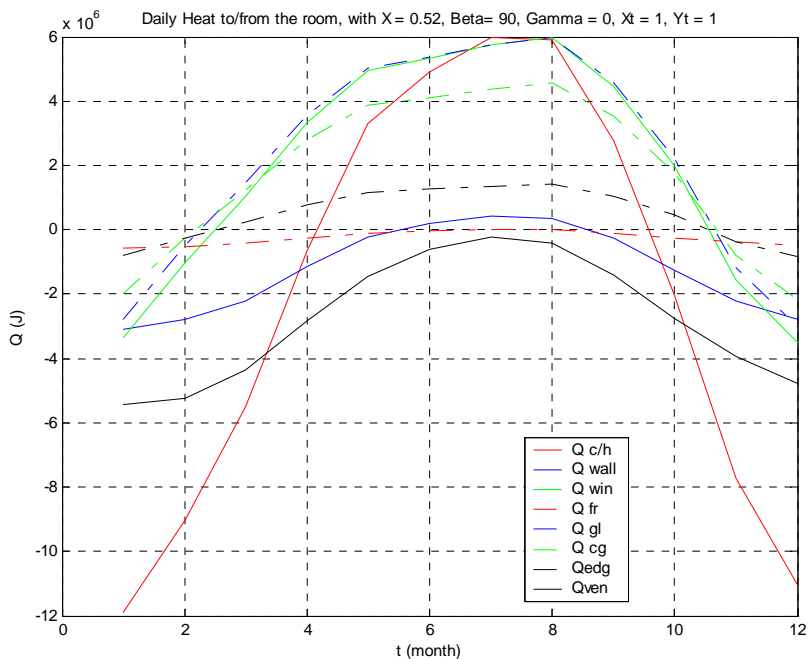
Q_{fr} ciepło wymieniane przez ramę;

Q_{gl} energia wymieniana przez przeszklenie, łącznie z energią promieniowania słonecznego docierającą bezpośrednio do pomieszczenia, w tym:

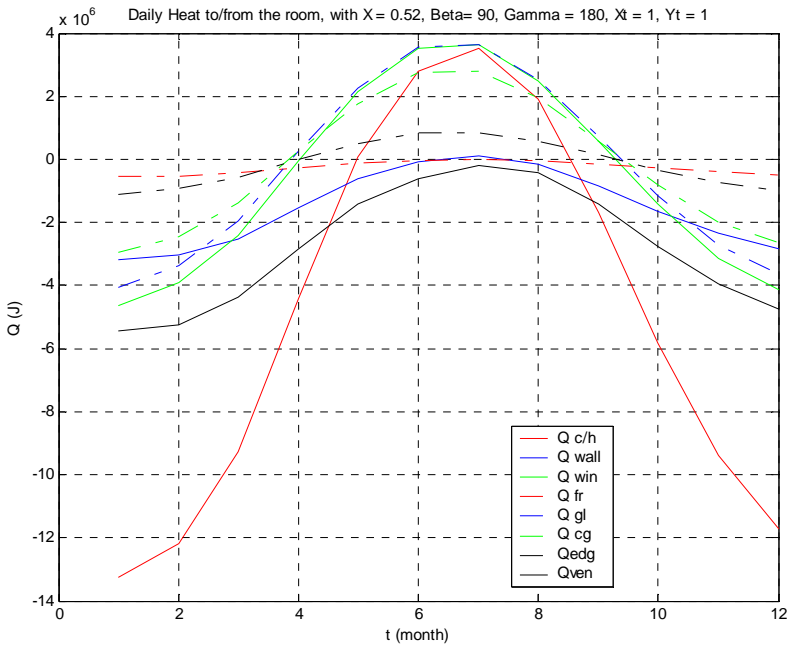
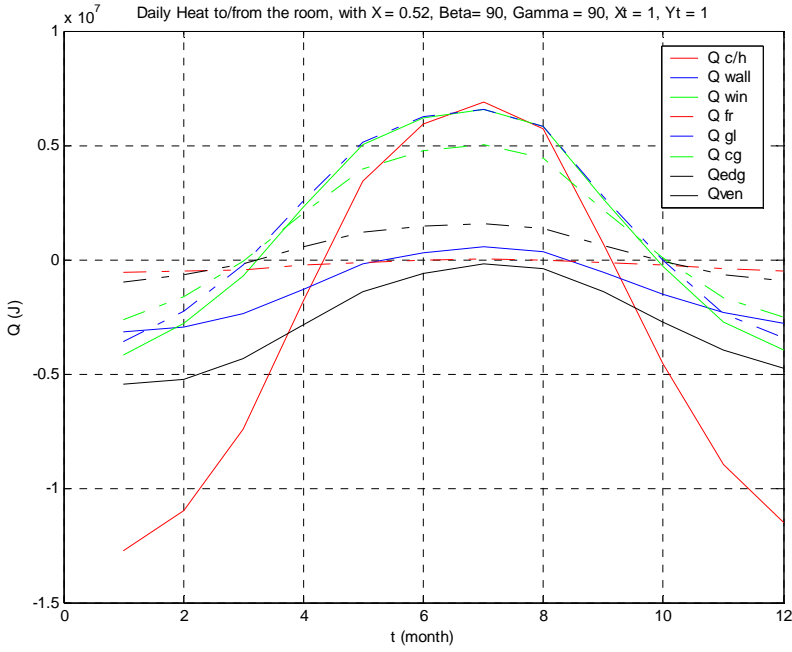
Q_{gc} przez centralną część przeszklenia,

Q_{edg} przez obrzeże przeszklenia.

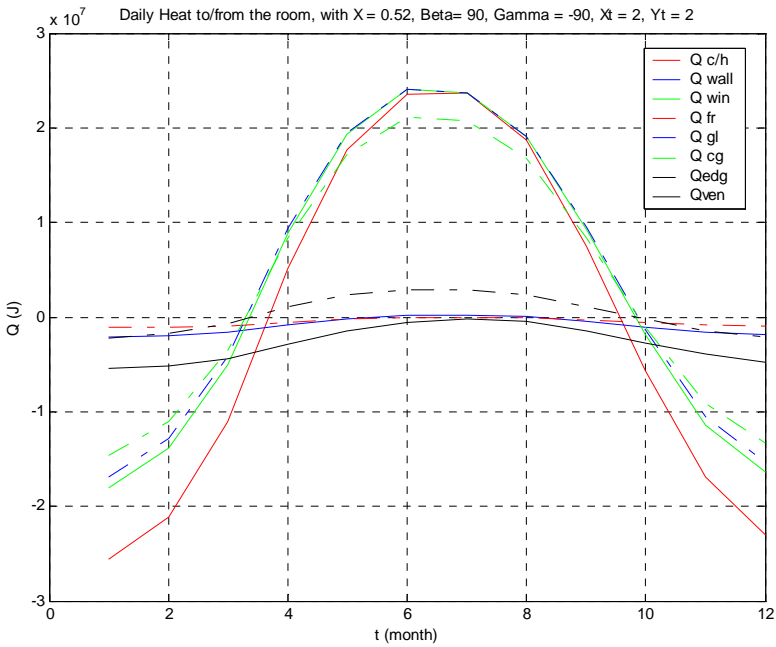
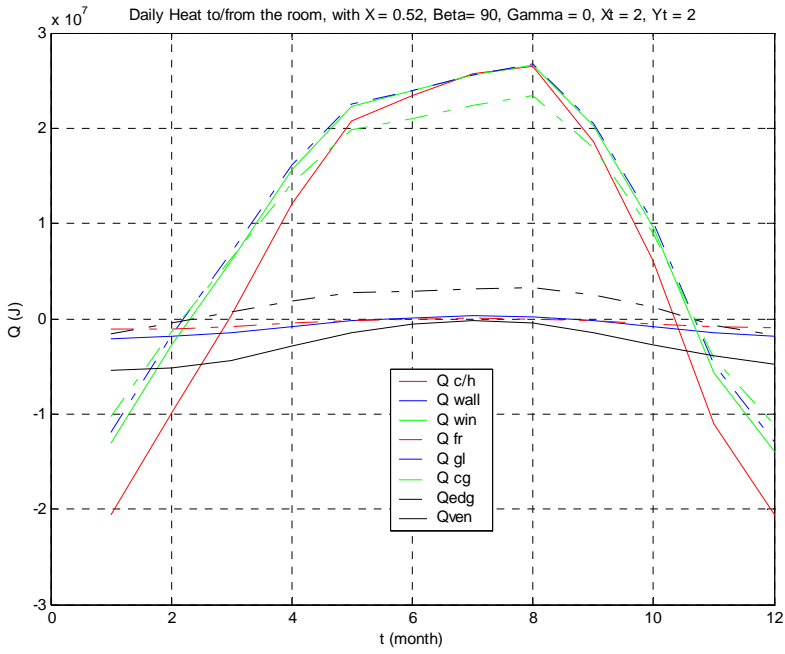
Wartości składowych bilansu cieplnego pomieszczenia zamieszczone na rys. 5.9a-h i 5.10a-h powinny być przedstawione w postaci diagramów słupkowych (zmiany mają charakter dyskretny, a nie ciągły), jednakże ze względu na przejrzystość obrazu otrzymanych wyników i lepszego zobrazowania charakteru zmian sum miesięcznych zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych wyniki przedstawiono w postaci krzywych.



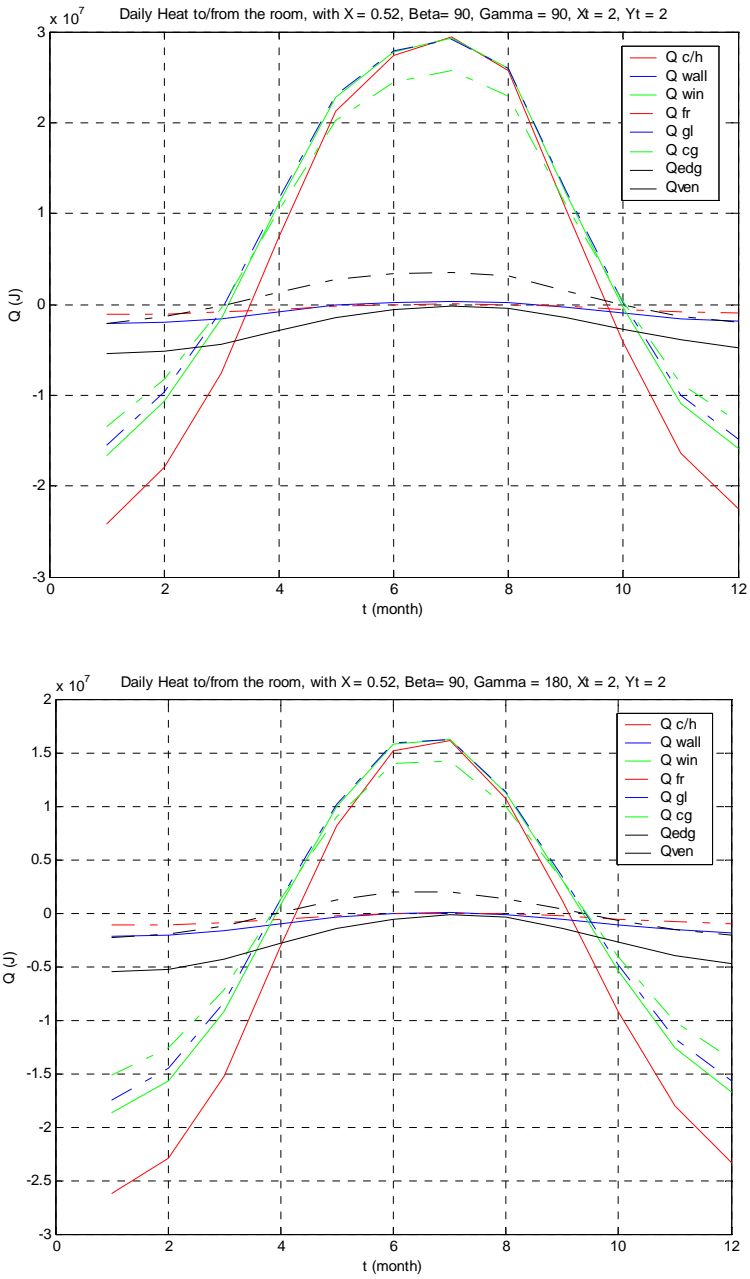
Rys. 5.9a-b Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pionowymi południowymi i wschodnimi ($1 \times 1 \text{m}^2$)



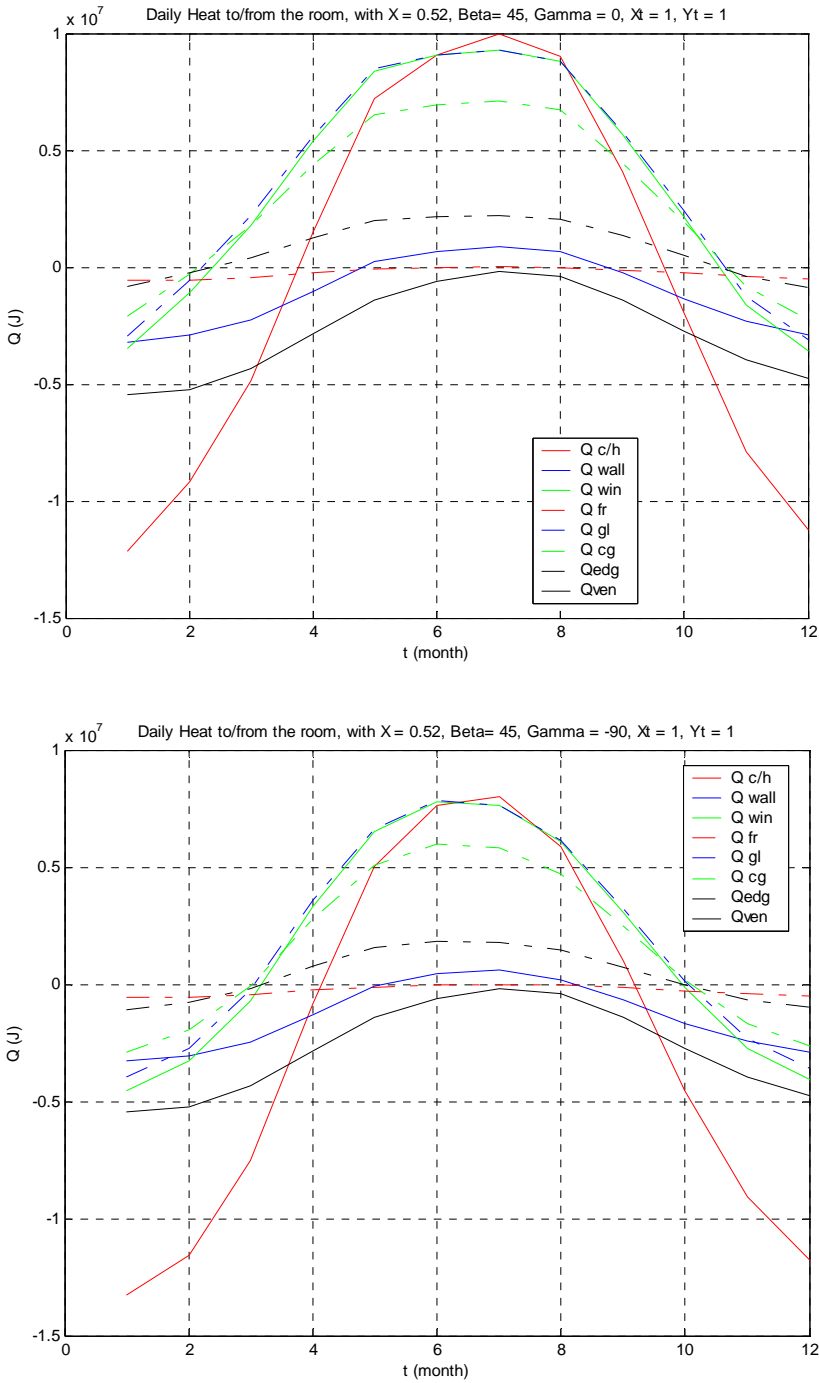
Rys. 5.9c-d Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pionowymi zachodnimi i północnymi ($1 \times 1 \text{m}^2$)



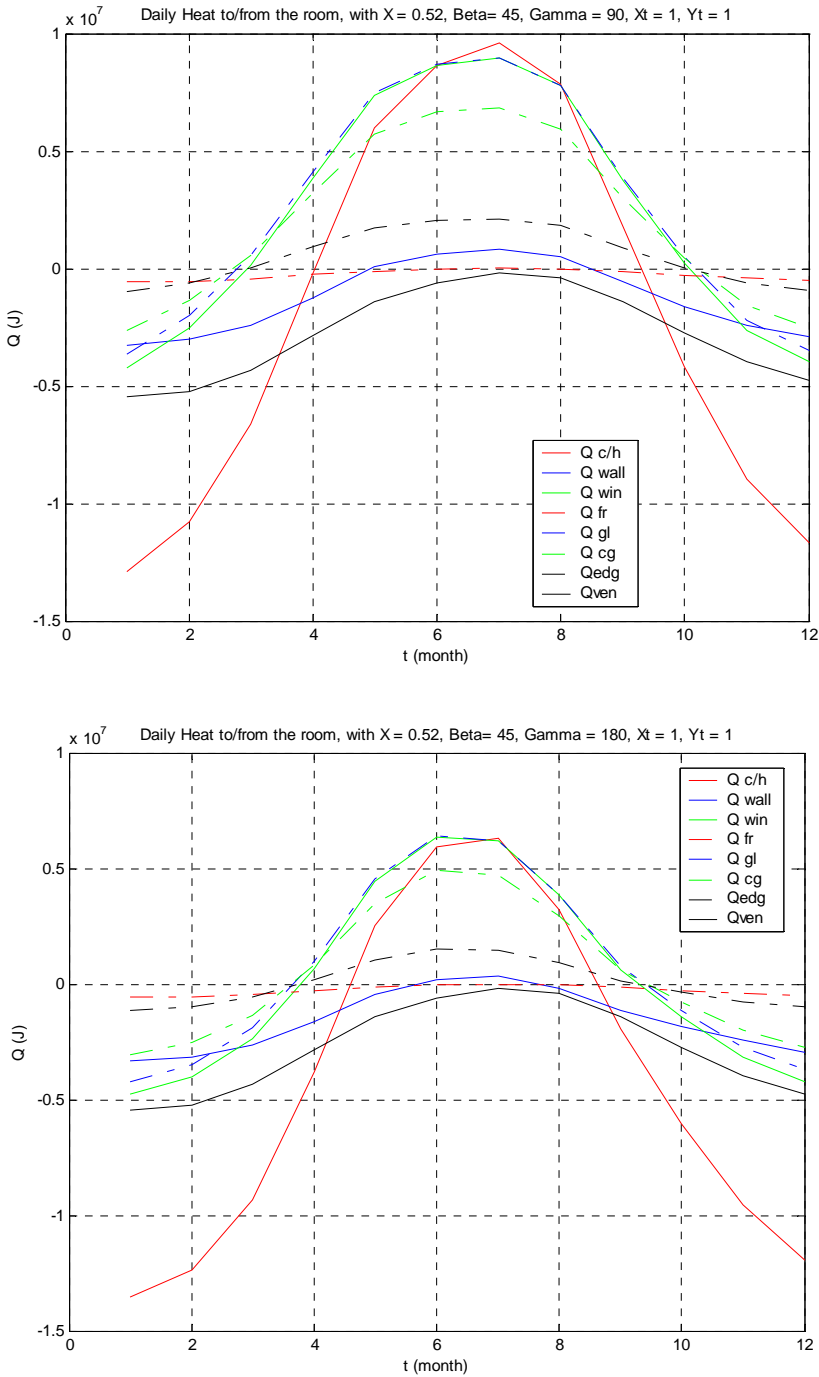
Rys. 5.9e-f Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych, pomieszczeń z przegrodami pionowymi południowymi i wschodnimi ($2 \times 2 \text{m}^2$)



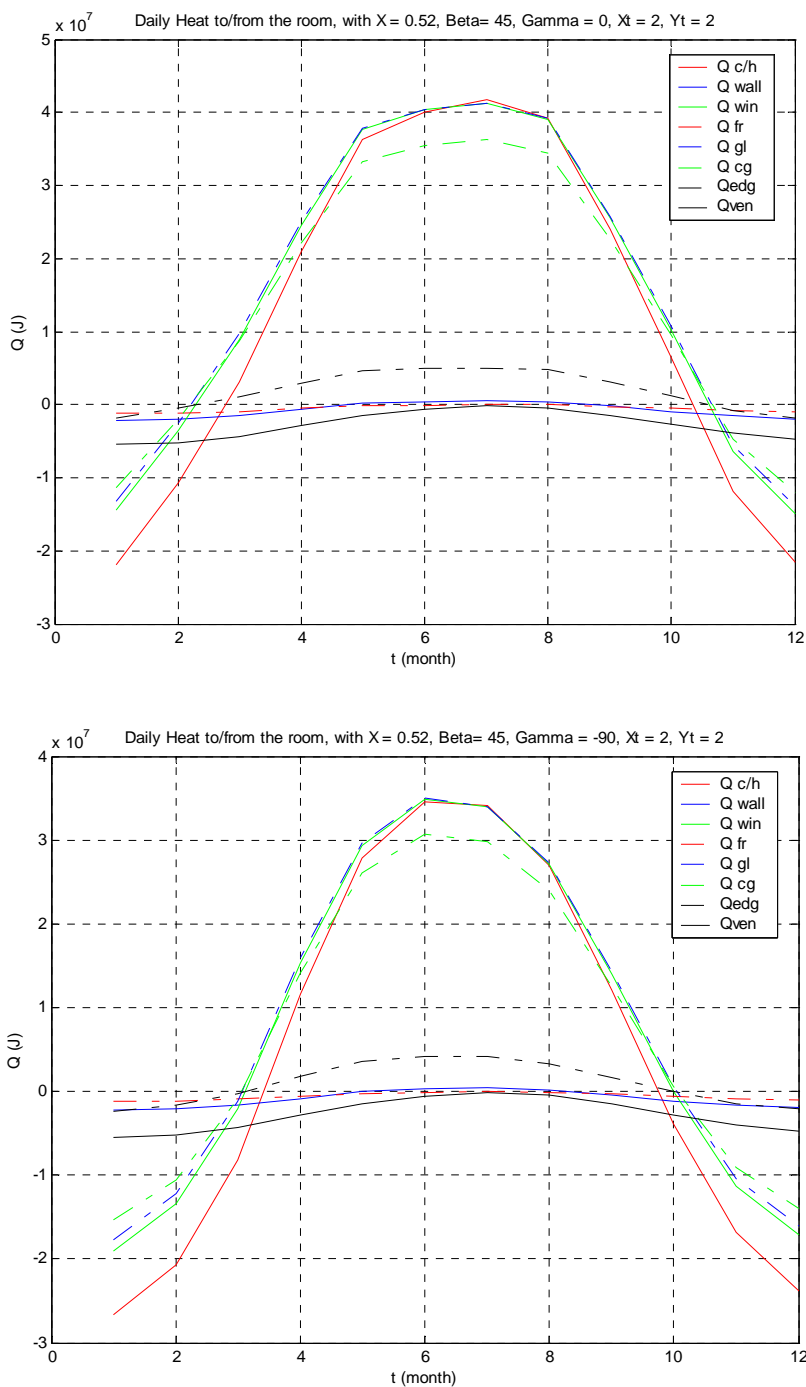
Rys. 5.9g-h Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pionowymi zachodnimi i północnymi, ($2 \times 2 \text{m}^2$)



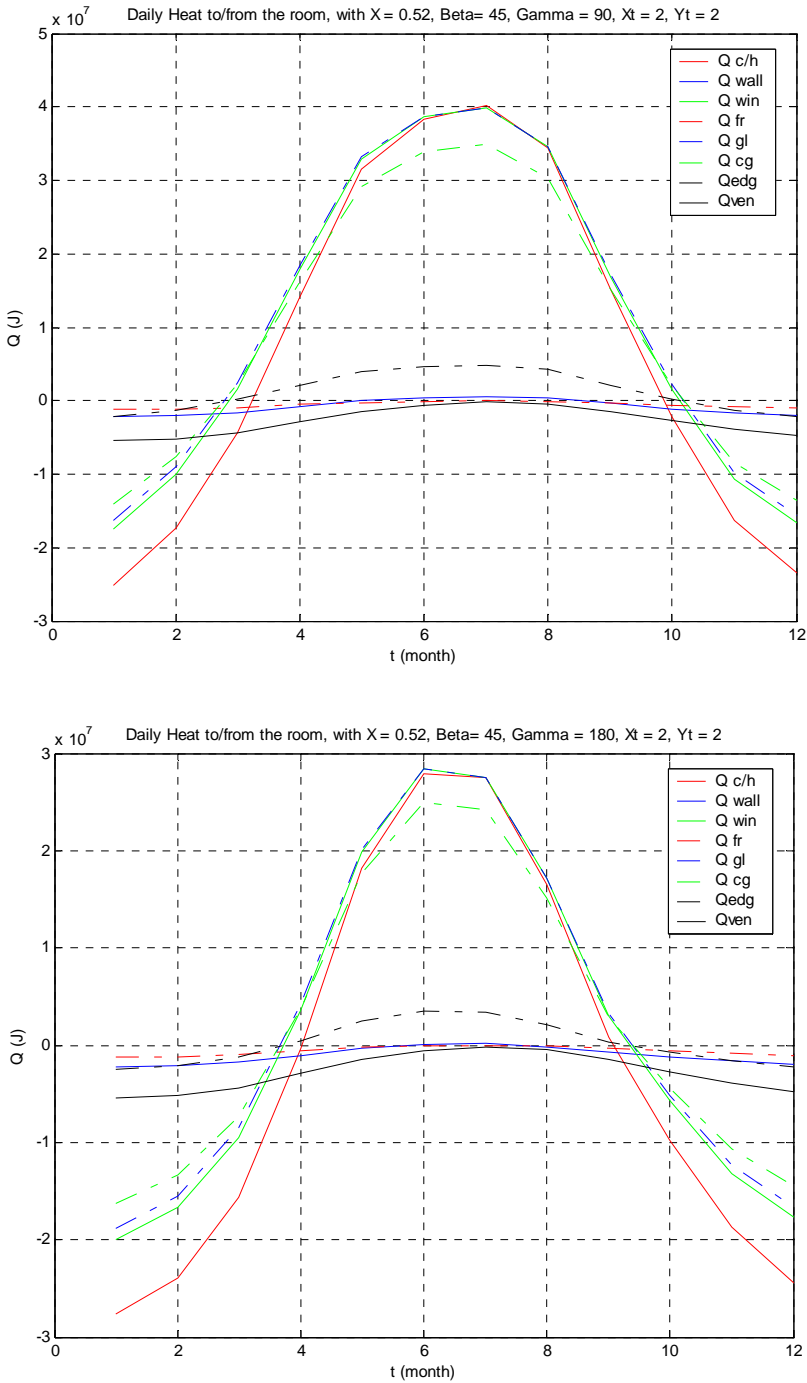
Rys. 5.10a-b Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pochylonymi południowymi, wschodnimi $1 \times 1 \text{m}^2$



Rys. 5.10c-d Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pochylonymi zachodnimi i północnymi, $1 \times 1 \text{m}^2$



Rys. 5.10e-f Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pochyłymi południowymi, wschodnimi $2 \times 2 \text{m}^2$



Rys. 5.10g-h Rozkład miesięcznego zapotrzebowania na ciepło/chłód i jego składowych w roku, pomieszczeń z przegrodami pochylonymi zachodnimi i północnymi, $2 \times 2 \text{m}^2$

Największe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń w skali roku występuje oczywiście dla pomieszczeń północnych, o dużych oknach i o pochylonych przegrodach zewnętrznych. Najmniejsze zapotrzebowanie na ciepło występuje dla pomieszczeń południowych o mniejszych oknach. Wielkość sumarycznych sezonowych obciążeń grzewczych dla pomieszczeń o południowych przegrodach pionowych i pochylonych (pod kątem 45° względem poziomu) jest porównywalna, przy czym w miesiącach zimowych w celu zapewnienia komfortu cieplnego więcej ciepła powinno być dostarczane do pomieszczeń o przegrodach pochylonych, a na wczesną wiosnę i późną jesień o przegrodach pionowych. Tendencja ta powtarza się także dla innych orientacji. Wiosną i jesienią powierzchnie pochylone są lepiej i dłużej nasłonecznione, co zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń. Pomieszczenia wschodnie wymagają dostarczania więcej ciepła w czasie sezonu grzewczego niż zachodnie.

Bardzo charakterystyczne jest przegrzewanie w czasie lata pomieszczeń ograniczonych powierzchniami pochylonymi, zwłaszcza z dużymi oknami, w związku ze zwiększoną dostępnością promieniowania słonecznego. Ze wzrostem powierzchni okien wzrastają straty, ale przede wszystkim rosną zyski cieplne, w wyniku czego w bilansie rocznym dominującym elementem staje się zapotrzebowanie na chłód do klimatyzacji.

Przy małej powierzchni okien zapotrzebowanie na ciepło do celów grzewczych jest wyższe od zapotrzebowania na chłód. Co prawda orientacja pomieszczeń wpływa wyraźnie na wielkość tego zapotrzebowania. W przypadku pomieszczeń północnych o przegrodach pionowych obciążenia grzewcze w skali roku są wielokrotnie wyższe od klimatyzacyjnych, a w przypadku pomieszczeń południowych i zachodnich różnice są znacznie mniejsze. Przy przegrodach pochylonych obudowy budynku różnice te jeszcze maleją.

Wzrost powierzchni okien powoduje wzrost całkowitych obciążeń grzewczych i klimatyzacyjnych, przy czym zyski cieplne rosną w większym stopniu niż straty. Przy dużych oknach (poza pomieszczeniami północnymi) w bilansie rocznym całkowite zyski cieplne są większe od strat. Jednocześnie skraca się czas sezonu grzewczego, np. przy pomieszczeniach południowych z przegrodami pionowymi z siedmiu miesięcy (od października do końca kwietnia) do czterech (od listopada do końca lutego), natomiast przy przegrodach pochylonych z sześciu (od października do końca marca) do czterech (od listopada do końca lutego). Oczywiście, zgodnie z przyjętym założeniem o stałości temperatury pomieszczeń, oznacza to odpowiednie wydłużenie sezonu klimatyzacyjnego. Powyższe rozważania potwierdzają uprzednio sformułowany wniosek o podstawowym newralgicznym znaczeniu, jaki pełnią okna w bilansie cieplnym pomieszczenia, a w konsekwencji jak szczególną uwagę należy poświęcić oknom w projektowaniu budynków. Jednocześnie wzmocnieniu ulega teza o konieczności rozważania bilansu cieplnego budynku w funkcji czasu, czyli uwzględniania zmienności w czasie w skali roku całkowitych obciążeń grzewczych i klimatyzacyjnych. Należy zauważyć, że automatyka sterująca funkcjonowaniem

systemów grzewczo/klimatyzacyjnych w rzeczywistości umożliwia stosowanie określonej tolerancji wobec zadanych warunków mikroklimatu wewnętrznego. Oznacza to min., że możliwe są odchylenia o zadaną wartość ΔT_w od założonej jako stałej temperatury T_w wewnętrznej pomieszczeń, czyli $T_{w, rzecz}(t) = T_w \pm \Delta T_w(t)$.

Energia promieniowania słonecznego w istotny sposób wpływa na bilans cieplny budynku. Jeśli przegrody nieprzezroczyste mają dobrą izolacyjność cieplną, a materiał tworzący warstwę wewnętrzną charakteryzuje się dużą pojemnością cieplną, to oddziaływanie środowiska zewnętrznego przez te przegrody jest znacznie ograniczone. Jednakże i w tym przypadku widać wpływ promieniowania słonecznego, choć jest on względnie mały. Oddziaływanie energii promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste jest ściśle związane z ogólną dostępnością promieniowania słonecznego zależną od orientacji i pochylenia danej przegrody. W związku z tym w czasie zimy największe oddziaływanie promieniowania słonecznego na przegrody nieprzezroczyste występuje przy ich zorientowaniu na południe, następnie na zachód, wschód i w najmniejszym stopniu na północ, co oznacza odpowiednie zmniejszenie zapotrzebowania na moc grzewczą. W lecie natomiast największe oddziaływanie promieniowania słonecznego w przypadku przegród pionowych występuje dla pomieszczeń zachodnich i południowych, następnie wschodnich, co oznacza zwiększenie zapotrzebowania na chłód. Przy przegrodach pochylonych wzrasta dostępność promieniowania słonecznego, a w konsekwencji jego wpływ na przepływ energii przez przegrody, co jest zauważalne zwłaszcza dla przegród południowych, ale także dla pozostałych orientacji.

5.5 Wnioski końcowe odnośnie bilansu cieplnego budynku

Obliczenia cieplne budynków mieszkalnych i większości niemieszkalnych prowadzone są w kraju zwykle jedynie dla sezonu grzewczego, co prowadzi do bardzo jednostronnego spojrzenia na budynek z punktu widzenia jego bilansu energetycznego, a w konsekwencji do niewłaściwego zaprojektowania danego budynku. Budynek funkcjonuje w cyklu rocznym i komfort cieplny musi być zapewniony we wszystkich porach roku, także latem. Okazuje się, że przy pewnych rozwiązaniach konstrukcyjno – materiałowych, zapotrzebowanie na energię do celów klimatyzacyjnych staje się dominującym składnikiem bilansu energetycznego budynku, jeśli mają być spełnione zadane warunki komfortu cieplnego (temperaturowego).

Na stan termiczny budynku wpływa energetyczne zachowanie się całej obudowy budynku, a więc przegród nieprzezroczystych, okien i układów wentylacyjnych. Przy stosowaniu przegród nieprzezroczystych o bardzo dobrej izolacyjności ich rola w bilansie energetycznym maleje. Jednakże, nawet przy stosowaniu rekuperacji ciepła z układów wentylacyjnych, nadal zapotrzebowanie na ciepło do celów wentylacyjnych pozostaje ważnym elementem gospodarki energetycznej budynku.

W związku z tendencją do stosowania dużych powierzchni okien i przeszklonych elewacji obudowy, rola okna w kształtowaniu bilansu energetycznego pomieszczeń, a przez to i komfortu cieplnego rośnie, stając się coraz częściej dominująca. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne pokazują jak istotny wpływ na przepływ energii do wnętrza pomieszczeń i na zachowanie cieplne okna ma energia promieniowania słonecznego, i jak istotne dla stanu energetycznego pomieszczenia (budynku) są odpowiednia lokalizacja okna i rozmiar przeszklenia. Oczywiście bardzo ważne są rozwiązania materiałowo - konstrukcyjne okna, ale to nie było przedmiotem rozważań w pracy.

W skutek przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych uzyskano wyniki, które obrazują jak ważne dla zapewnienia komfortu cieplnego w pomieszczeniach jest prowadzenie obliczeń obciążeń cieplnych budynku w skali roku, a nie tylko sezonu grzewczego. Standardowe obliczenia obciążeń grzewczych, prowadzone przez projektantów, dotyczą tylko sezonu grzewczego. W obliczeniach sezonu grzewczego okna przede wszystkim są traktowane jako element obudowy powodujący straty ciepłe. Okazuje się, że przy większej powierzchni okien w skali roku zyski ciepłe przewyższają straty (poza oknami północnymi). Wielkość zysków cieplnych zależy od orientacji pomieszczeń i pochylenia przegród ich obudowy. Problem dostarczenia odpowiedniej ilości chłodu w lecie do zapewnienia właściwego komfortu cieplnego pomieszczenia staje się podstawowy. Nieuwzględniane oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek, tak znaczącego w okresie letnim, prowadzi do niewłaściwego projektowania budynków. Istniejąca w nowym budownictwie tendencja do przeznaczania poddaszy na mieszkania i stosowanie prawie wyłącznie standardowych okien połaciowych doprowadzi w krótkim okresie czasu do znacznego wzrostu zapotrzebowania na chłód do celów klimatyzacyjnych, które będzie w tych mieszkaniach większe niż obciążenie grzewcze. W przypadku budynków z płaskimi dachami, bez strychów, z pustką wentylacyjną nad ostatnią kondygnacją, sytuacja w mieszkaniach na ostatnim piętrze jest podobna, bowiem w lecie najbardziej napromieniowywane promieniowaniem słonecznym są powierzchnie bliskie poziomym, a więc dachy płaskie i o niewielkim spadku. W okresie letnim w mieszkaniach tych dyskomfort, przy braku urządzeń klimatyzacyjnych i złej izolacyjności cieplnej stropodachu, może być jeszcze większy niż w mieszkaniach na poddaszu.

W celu zobrazowania udziału poszczególnych składowych w bilansie energetycznym budynku, a w szczególności w celu wykazania deterministycznej roli okna, a przez to oddziaływania promieniowania słonecznego na bilans cieplny budynku, wybrane wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały (oprócz formy graficznej) przygotowane także w postaci tabelaryzowanej i zamieszczone w Dodatku 4. Natomiast w Tabeli 5.1 zamieszczono otrzymane z obliczeń i uśrednione dla całego roku wskaźniki rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania E_h i do chłodzenia E_c różnie usytuowanych pomieszczeń budynku. Przedstawione wielkości mają charakter orientacyjny, zostały bowiem otrzymane dla konkretnych rozwiązań materiałowo - konstrukcyjnych obudowy budowy. Zostały one

zamieszczone w celu ilustracji energochłonności pomieszczeń budynku, który przyjęty został do rozważań jako współczesny budynek wykonany zgodnie z obowiązującymi standardami oszczędności energii i izolacyjności cieplnej przegród. Zgodnie z tymi standardami [189], [234] wartość graniczna wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania E_o powinny wynosić 29 kWh/(m³ rok).

Tabela 5.1. Zestawienie wskaźników energochłonności w odniesieniu do rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania E_h i do chłodzenia E_c przykładowych różnie usytuowanych pomieszczeń budynku.

$\beta=90^0$ kWh/(m ³ rok)	$\gamma=0^0$ OD	$\gamma=0^0$ OM	$\gamma=90^0$ OD	$\gamma=90^0$ OM	$\gamma=-90^0$ OD	$\gamma=-90^0$ OM	$\gamma=180^0$ OD	$\gamma=180^0$ OM
E_h	13	10	20	12	22	13	25	14
E_c	28	5	26	5	20	4	10	1
E_h+E_c	41	15	46	17	44	17	35	15
$\beta=45^0$								
E_h	14	10	19	12	21	13	26	14
E_c	45	5	37	5	31	6	19	4
E_h+E_c	59	15	56	17	52	19	45	18

OD – okno duże; OM – okno małe

Zamieszczone w Tabeli 5.1 wyniki obliczeń pokazują, że rozważany budynek, z wszystkimi jego różnie usytuowanymi pomieszczeniami, z punktu widzenia wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania, spełnia obowiązujące normy, a wskaźnik ten jest nawet znacznie poniżej granicznego. Najwyższe zapotrzebowanie na energię grzewczą, ale niższe od granicznego, występuje dla pomieszczeń północnych z dużymi oknami. Jest ono względnie duże, pomimo założenia o stosowaniu rekuperacji ciepła z układów wentylacyjnych. Zgodnie z otrzymanymi wynikami, wszystkie pomieszczenia w budynku spełniają obowiązujące standardy energooszczędnościowe i teoretycznie cały budynek powinien być uznawany za mało energochłonny. Tymczasem wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania pomieszczeń obrazuje tylko część obciążeń energetycznych. W budynku występuje także zapotrzebowanie na chłód, które tylko w przypadku małych okien, a szczególnie pomieszczeń północnych, jest niewielkie. Przy dużej powierzchni okien zapotrzebowanie na chłód może przewyższać zapotrzebowanie na ciepło, często nawet znacznie, dotyczy to wszystkich pomieszczeń poza północnymi, z przegrodami pochylonymi i dużymi oknami, czyli pomieszczeń na poddaszu. Pomieszczenia, które teoretycznie są mało energochłonne ze względu na obciążenia grzewcze, tak naprawdę w kompleksowym ujęciu cieplnym, a więc z uwzględnieniem zapotrzebowania na energię do celów grzewczych i klimatyzacyjnych, takim pomieszczeniami nie są. Gdyby zsumować zapotrzebowanie do celów grzewczych i klimatyzacyjnych, okazuje się że wszystkie

pomieszczenia o dużej powierzchni okien, nawet północne z przegrodami pionowymi, tym bardziej pochylonymi, mają obciążenia grzewczo/klimatyzacyjne znacznie powyżej wskaźnika E_o sezonowej energochłonności. Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić jednoznacznie, analiza energetyczna budynku powinna być prowadzona w sposób kompleksowy, tj. powinna uwzględniać energię zarówno do celów grzewczych, jak i klimatyzacyjnych. Należy stosować oddzielne wskaźniki w odniesieniu do rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania E_h i do chłodzenia E_c oraz wskaźnik sumaryczny E_{catk} ($E_{catk}=E_h+E_c$), które będą świadczyć o rzeczywistej energochłonności budynku. Wskaźniki te powinny być uwzględniane w dokumentacji charakterystyki energetycznej budynku.

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na fakt, który do tej pory nie był wspomniany. Klimatyzacja pomieszczeń na poziomie zapotrzebowania na chłód odpowiadającego zapotrzebowaniu na ciepło do ogrzewanie pomieszczeń nie jest równoważna w odniesieniu do energii pierwotnej. Klimatyzacja pomieszczeń jest zwykle bardziej energochłonna z punktu widzenia zużycia energii pierwotnej, a w konsekwencji zanieczyszczenia środowiska. Wynika to z faktu, że urządzenia klimatyzacyjne są zwykle zasilane energią elektryczną, wytworzenie której wymaga zużycia większej ilości paliwa pierwotnego niż wytworzenie ciepła do zasilania urządzeń grzewczych (sprawność przetwarzania paliwa pierwotnego w ciepło jest znacznie wyższa niż przy wytwarzaniu energii elektrycznej).

Należy zwrócić uwagę na jeszcze jeden fakt. Przy prowadzeniu obliczeń cieplnych budynków jedynie dla sezonu grzewczego, kiedy to poziom promieniowania słonecznego jest niewielki, jego nieuwzględnianie w bilansie energetycznym może powodować nieznaczne przewymiarowanie tradycyjnego systemu grzewczego, co nie powoduje istotnych konsekwencji energetycznych. Jednakże, jeżeli przewidywane jest zastosowanie niekonwencjonalnego niskotemperaturowego systemu grzewczego nieuwzględnienie zysków słonecznych ma już skutki nie tylko energetyczne, ale i ekonomiczne.

Projektując elementy obudowy budynku można wpływać na warunki napromieniowania decydując o ich formie i usytuowaniu. Elementy te należy planować uwzględniając położenie Słońca i jego ruch pozorny po nieboskłonie, oraz warunki otoczenia, które mogą powodować zacienienie lub zwiększenie refleksyjności otoczenia. W zależności od przedmiotu i szczegółowości rozważań ważna jest znajomość wielkości sum godzinnych lub/i dziennych lub/i miesięcznych promieniowania słonecznego, które mogą sygnalizować możliwość występowania zjawiska przegrzewania budynku, co w konsekwencji powinno być wykorzystane przy tworzeniu odpowiedniej koncepcji architektonicznej budynku i uwzględnienia projektu zacienienia w postaci elementów bryły budynku i projektu zieleni.

Efekt przepływu energii do wnętrza w lecie może być ograniczony stosowaniem elementów zacieniających w samej architekturze budynku (np. okapy), jak i w otoczeniu zewnętrznym (zieleni). Jednakże większość tych rozwiązań stosuje się do okien pionowych, nie do połaciowych. W tym przypadku wymiana ciepła z

otoczeniem może być regulowana stosowaniem odpowiednich rolet, żaluzji itp., co oczywiście także może być wykorzystywane w oknach pionowych. Można także wpływać na energetyczne zachowanie się okna poprzez jego konstrukcję, w tym rozwiązanie i wypełnienie przestrzeni międzyszybowej, a także poprzez stosowanie odpowiednich materiałów, z których wykonane są przeszklenia i ich pokrycia, a także rama i jej uszczelnienia.

Zapotrzebowanie na chłód w miesiącach letnich jest bardzo wyraźne i wskazuje jak istotnym elementem w bilansie cieplnym energooszczędnego budynku są okna, i to szczególnie w okresie letnim, na co do tej pory nie zwracano praktycznie uwagi przy projektowaniu budynków w kraju, a także w innych państwach o podobnej szerokości geograficznej i warunkach klimatycznych. Co prawda elementy osłaniające związane z architekturą budynku powodujące zacielenie okien (okapy, zadaszenia itp.) były stosowane w dawnej architekturze ludowej, także w Polsce. Powodowały one znaczne ograniczenie dostępu promieniowania słonecznego w lecie, nie utrudniając dostępu dla promieniowania słonecznego w zimie. Co więcej poddasza nie miały z reguły charakteru mieszkalnego, a doświetlanie poddasza odbywało się przy wykorzystaniu okien pionowych w wykuszach. Stwierdzenie to nie oznacza co prawda, że nie można obecnie stosować okien połaciowych. Dzięki postępowi technologicznemu, możliwe jest stosowanie odpowiednich materiałów i konstrukcji okiennych umożliwiających uzyskanie odpowiednich warunków mikroklimatu wewnętrznego w pomieszczeniach użytkowych z oknami połaciowymi. Oznacza to jednak, że dobór odpowiednich rozwiązań technologicznych okna staje się w nowoczesnym budownictwie zagadnieniem priorytetowym, choć coraz bardziej skomplikowanym.

6. Podsumowanie

6.1 Wnioski końcowe

Modelowanie oraz analiza pozyskiwania i naturalnej konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku są istotnym zagadnieniem zarówno w zakresie słonecznej energetyki cieplnej jak i budownictwa energooszczędnego. Podstawy oddziaływania promieniowania słonecznego i konwersji fototermicznej są znane, jednakże metodyka szacowania napromieniowania i modele opisujące poszczególne składowe promieniowania docierającego do różnie usytuowanych powierzchni są nadal tematem prac badawczych i ulegają ciągłym modyfikacjom. Zagadnienia związane z dostępnością promieniowania słonecznego wskutek oddziaływania środowiska w postaci różnorodnej refleksyjności podłoża i obiektów otoczenia, a także zacieniania naturalnego i planowego stanowią przedmiot badań teoretycznych i eksperymentalnych. Prowadzone są prace nad nowymi metodami fototermicznej konwersji i udoskonaleniem już istniejących. Intensywnie rozwijają się badania podstawowe i stosowane z zakresu dynamiki procesów zachodzących w budynku i jego elementach w zmieniających się warunkach otoczenia wewnętrznego i zewnętrznego. Powstają ośrodki naukowo-badawcze specjalizujące się w badaniach polowych i monitoringu nowych technologii stosowanych w modelowych testowych obiektach. Szczególnie duży rozwój prac badawczych i wdrożeniowych dotyczy technologii okiennych i szklanych fasad jako tych, które w coraz większym stopniu decydują o bilansie energetycznym budynku, a jednocześnie ze względów estetycznych są chętnie stosowane. Rozwijają się nowe metody analizy energetycznej budynków, które uwzględniają tzw. pełen cykl życia budynków (*LCA – Life Cycle Analysis*) [6], z uwzględnieniem energochłonności zakumulowanej (wbudowanej) [24]. Problematyka zmniejszenia zużycia energii w budynkach w ujęciu kompleksowym i promowanie tzw. Eko-Budownictwa stają się priorytetowe dla gospodarki państw rozwiniętych [21], [76] a w konsekwencji wytyczają priorytetowe kierunki prac naukowo – badawczych [241].

Podjęcie w pracy zagadnienia oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek jest próbą wniesienia wkładu do rozwoju badań z zakresu podstaw energooszczędności w budownictwie i energetyki słonecznej budynku oraz modelowania matematycznego procesów wpływających na stan termiczny budynku. Na podstawie dostępnej literatury można sądzić, że prezentowana praca jest pierwszą w kraju, a także poza jego granicami, która w sposób szczegółowy kompleksowo rozważa, modeluje i rozwiązuje zagadnienia zmiennej w czasie dostępności energii promieniowania słonecznego, jej pozyskiwania oraz procesy nieustalonego przepływu energii w obudowie budynku i jego otoczeniu w skali roku, ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływania i konwersji energii promieniowania słonecznego.

Przeprowadzona analiza porównawcza wyników obliczeń napromieniowywania powierzchni różnie usytuowanych przy wykorzystaniu dwóch modeli opisu promieniowania rozproszonego wykazała, wbrew powszechnej opinii, że zakres

stosowania modelu izotropowego w analizach energetyki słonecznej jest ograniczony. Uzyskane wyniki pozwoliły sformułować zalecenia odnośnie zakresu stosowalności obu modeli.

Sformułowany model matematyczny opisuje zjawiska zachodzące w poszczególnych elementach obudowy budynku i ich otoczeniu. Model ten ma charakter modułowy, ale jednocześnie pozwala na integralne ujęcie całości procesów i uwzględnienie dynamiki wzajemnego oddziaływania poszczególnych elementów budynku. Fizyka zjawisk zachodzących w poszczególnych elementach obudowy i w ich otoczeniu jest traktowana z różnym stopniem złożoności. Zagadnienie dostępności i pozyskiwania energii promieniowania słonecznego przez poszczególne elementy obudowy budynku jest poddawane szczegółowym rozważaniom, które charakteryzują się nowatorskim podejściem w opisie napromieniowania podstawowych elementów obudowy. Nowym podejściem modelowym charakteryzuje się zaproksymowanie zjawisk zachodzących w obrzeżu przeszklenia i w ramie zróżnicowanej przestrzennej i materiałowo (do układu quasi trójwymiarowego). Sformułowany model matematyczny umożliwi obliczanie pewnych parametrów otoczenia i przegród obudowy budynku zmiennych w czasie. Definiując parametry, które mają być zapisywane w zbiorach danych wyjściowych i odpowiednio programując metodę tworzenia ich graficznej interpretacji, można otrzymać je w postaci umożliwiającej względnie szybkie przeprowadzenie ich szczegółowej analizy.

Opracowane programy numeryczne zostały wykorzystane do symulacji procesów zachodzących w przykładowych pomieszczeniach w skali całego roku, który tworzą reprezentatywne uśrednione dni poszczególnych miesięcy. Możliwe jest prowadzenie wielowariantowych analiz materiałowych i strukturalnych obudowy budynku, uwzględniających różnorodne usytuowania okien i pomieszczeń, a także wielkości okna. Sformułowanie modelu matematycznego i jego numeryczne rozwiązanie daje narzędzie zarówno kompleksowej oceny energetycznej budynku, jak i jego poszczególnych elementów składowych, powinno być przydatne przy tworzeniu koncepcji architektonicznej budynku i przy jego projektowaniu, przy opracowywaniu oceny jakości energetycznej danego budynku i tworzeniu jego charakterystyki energetycznej.

Stworzony model matematyczny i przeprowadzona symulacja numeryczna dla wybranych przykładów pomieszczeń pozwoliły na uzyskanie wyników, które posłużyły do opracowania wniosków o charakterze aplikacyjnym. Sformułowane zalecenia odnośnie kształtowania obudowy budynku w aspekcie oddziaływania energii promieniowania słonecznego, powinny przyczynić się do weryfikacji podejścia do tworzenia koncepcji architektonicznej, projektowania budynków i ich otoczenia. Wykazanie wpływu energii promieniowania słonecznego na wielkość obciążeń ogrzewczych, a przede wszystkim klimatyzacyjnych, powinno doprowadzić do obowiązkowego uwzględniania napromieniowania budynku i elementów jego obudowy, przy formułowaniu bilansu energetycznego budynku.

Obliczenia muszą być prowadzone w skali całego roku. Szczególną uwagę należy zwrócić na projektowanie poddaszy użytkowych i okien tam znajdujących się. Dalsze nieuwzględnianie oddziaływania energii promieniowania słonecznego doprowadzi do wzrostu zapotrzebowania na energię do celów klimatyzacyjnych. Budynki będą, ze względu na obowiązujące standardy, ograniczające się jedynie do obliczeń obciążeń energetycznych w sezonie grzewczym, traktowane jako energooszczędne. Tymczasem okazuje się, że przy pewnych rozwiązaniach konstrukcyjno – materiałowych, zapotrzebowanie na energię do celów klimatyzacyjnych może stać się dominującym składnikiem bilansu energetycznego budynku, jeśli warunki komfortu cieplnego (zadana względnie stała temperatura w pomieszczeniach) miałyby być rzeczywiście spełnione. Budynek taki stanie się więc znacząco energochłonny. Nieuwzględnianie oddziaływania energii promieniowania słonecznego w bilansie energetycznym budynków i ograniczenie analiz do sezonu grzewczego w wielu przypadkach prowadzi do niewłaściwej oceny energetycznej budynku. Konieczne jest kompleksowe podejście do gospodarki energetycznej budynku, uwzględniające jego stan termiczny w całym roku. Należy stosować sumaryczne i sezonowe wskaźniki energochłonności w odniesieniu do całkowitego rocznego zapotrzebowania na energię, jak i z uwzględnieniem jego składowych, tj. w odniesieniu do ciepła do ogrzewania i chłodu do klimatyzacji. Dopiero te trzy wskaźniki będą świadczyć o rzeczywistej energochłonności budynku. Powinny być one obligatoryjnie wyznaczane przy tworzeniu charakterystyki energetycznej budynku i wyszczególniane w certyfikatach energetycznych budynków.

6.2 Kierunki dalszych badań

Sformułowane zagadnienie, opracowane modele matematyczne i przeprowadzone analizy pozwoliły na stworzenie efektywnego narzędzia do symulacji zjawisk napromieniowania obudowy budynku i procesów przepływu energii w nich zachodzących, a także w otoczeniu. Przedstawione w pracy opisy matematyczne i uzyskane numeryczne rozwiązania opracowanych programów mogą stanowić podstawę do opracowania profesjonalnych programów użytkowych do wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków i innych narzędzi przydatnych dla architektów i projektantów przy tworzeniu koncepcji i projektowaniu budynków.

Istnieje możliwość dołączenia nowych modułów programów, które wyznaczałyby w sposób bardziej szczegółowy pewne parametry, własności przegród i otoczenia, lub też modyfikacja (uszczegółowienie) programów już istniejących.

Program dotyczący przegród nieprzezroczystych może być modyfikowany i rozbudowywany, może uwzględniać złożone zagadnienia wymiany ciepła i masy w ośrodkach porowatych, niejednorodnych, anizotropowych, o skomplikowanej przestrzennej strukturze. Procesy wymiany ciepła i masy mogą być rozważane w układzie dwu lub trójwymiarowym, co m.in. pozwoli na uwzględnianie wzajemnego oddziaływania cieplnego przegrody nieprzezroczystej i okna.

Zagadnienie wentylacji i rekuperacji ciepła może być sformułowane bardziej szczegółowo i uwzględniać przeznaczenie danego pomieszczenia. Model może dotyczyć różnych metod odzysku ciepła i zapewnienia wymaganej jakości powietrza.

W analizach energochłonności budynku newralgicznym elementem są okna. Dlatego też szczególnie istotne staje się rozbudowanie analizy oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek o problematykę zacienienia, jakości optycznej i energetycznej okien, oraz ograniczenia dostępności promieniowania słonecznego wskutek stosowania rolet, żaluzji, okiennic itp.

Szczególnie ważne wydaje się sformułowanie modelu matematycznego zacienienia, zarówno dla otoczenia zewnętrznego jak i elementów obudowy budynku. Wyznaczanie naturalnego zacienienia elementami otoczenia zewnętrznego powinno dotyczyć zieleni (przede wszystkim drzew) z uwzględnieniem jego zmiennej transmisyjności w czasie i przestrzeni, a także zacieniania nieprzezroczystymi obiektami np. domów w sąsiedztwie, również zmiennego w czasie. W odniesieniu do elementów obudowy budynku należy uwzględnić istnienie okapów, wykuszy, zadaszeń balkonów i lodżii.

Innym istotnym zagadnieniem, które powinno być uwzględnione w analizach energetycznych budynków, są zjawiska optyczne występujące przy przejściu promieniowania słonecznego przez szybę. Należałoby stworzyć dodatkowy program, który wyznaczałby zmienne w czasie parametry, takie jak transmisyjność, emisyjność i absorpcyjność przeszkleń dla promieniowania słonecznego w zależności od materiału stosowanego na szyby, rodzaju jego powierzchni, pokryć itp., dla różnych kątów padania promieniowania słonecznego bezpośredniego i promieniowania dyfuzyjnego. Dodatkowym elementem tego programu mogłoby być wyznaczanie transmisyjności, emisyjności i absorpcyjności przeszkleń dla światła widzialnego. Dzięki temu, analiza jakości energetycznej okien mogłaby być rozszerzona o zagadnienie wykorzystania oświetlenia światłem dziennym.

Kolejnym bardzo ważnym problemem, który powinien być poddany szczegółowej analizie jest określenie odpowiedniej powierzchni okien dla danych pomieszczeń i danych wymagań użytkownika. Wymaga to przeprowadzenia oddzielnych szczegółowych rozważań i powinno być przedmiotem analiz optymalizacyjnych. Należy zwrócić uwagę na charakter użytkowanych pomieszczeń i estetyczne oraz psychofizyczne preferencje użytkowników. Stosowanie dużych powierzchni okien, przeszklonych fasad nie powinno prowadzić do wzrostu energochłonności budynków. Powinno być prowadzone w sposób rozważny i planowany, zapewniać komfort wewnętrzny bez konieczności dostarczania energii do celów klimatyzacyjnych.

Dodatek 1.

Interpretacja graficzna wybranych wyników obliczeń napromieniowania powierzchni różnie usytuowanych

W wyniku przeprowadzenia obliczeń napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni w niniejszym dodatku przedstawiono interpretację graficzną wybranych wyników.

Na rysunkach D.1-4 pokazano rozkłady godzinowego napromieniowania $I_{cc}=f(t_h)$ i jego składowych w czasie (kolejnych godzinach) uśrednionego reprezentatywnego dnia czerwca dla sześciu podstawowych orientacji powierzchni: południowej, południowo-zachodniej, południowo-wschodniej, zachodniej, wschodniej i północnej dla pochylenia 30^0 , 45^0 , 60^0 i 90^0 . Analogiczne rozkłady dzienne w miesiącu wrześniu i grudniu przedstawiono odpowiednio na rys. D.5-8 i D.9-12.

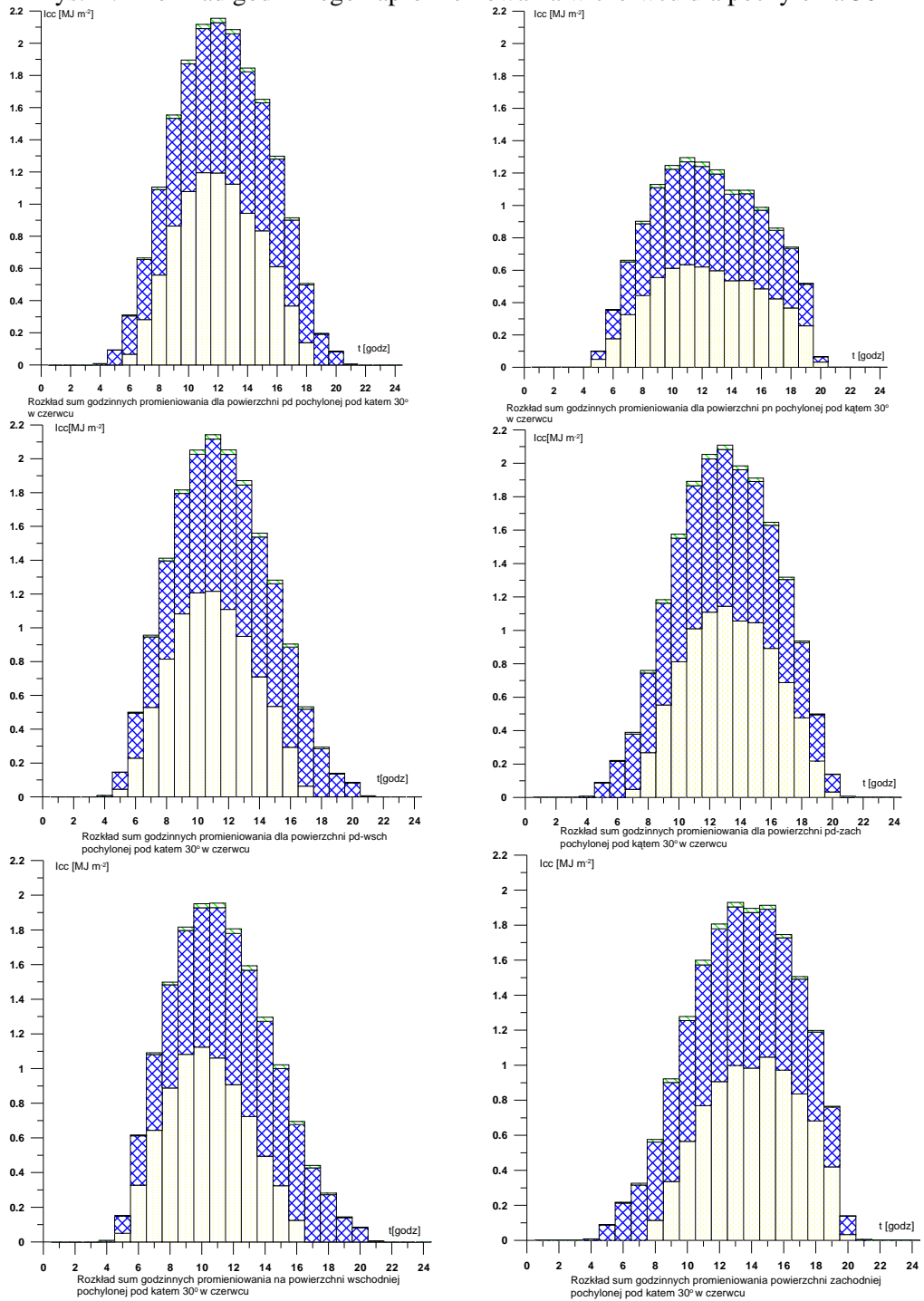
Z kolei na rysunkach D.13-16 przedstawiono rozkłady dziennego napromieniowania półsferycznego $I_{cc}=f(t_m)$ i jego składowych w czasie w kolejnych miesiący roku dla sześciu podstawowych orientacji powierzchni: południowej, południowo-zachodniej, południowo-wschodniej, zachodniej, wschodniej i północnej dla pochyłeń odpowiednio 30^0 , 45^0 , 60^0 i 90^0 na kolejnych rysunkach.

Na rysunkach D.17-18 przedstawiono zależność dziennego napromieniowania półsferycznego od kąta azymutalnego ($I_{cc}=f(\gamma)$) dla różnych pochyłeń (β) powierzchni w różnych miesiącach roku. Rysunek D.17 przedstawia rozkłady napromieniowania dla pierwszego półrocza (I- VI), a rys. D.18 dla drugiego półrocza (VII-XII). Na rysunkach D.17-18, symbol B oznacza kąt pochylenia powierzchni względem poziomu (i odpowiada β), natomiast kąt azymutalny γ danej powierzchni zaznaczony na osi odciętych zapisano słownie (*Gamma*).

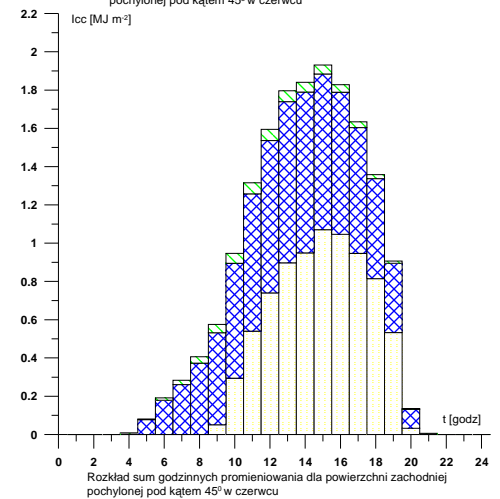
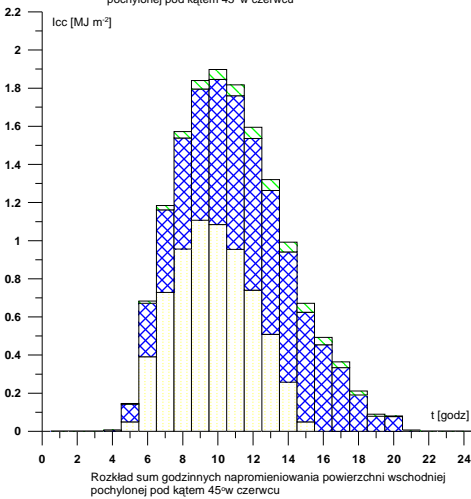
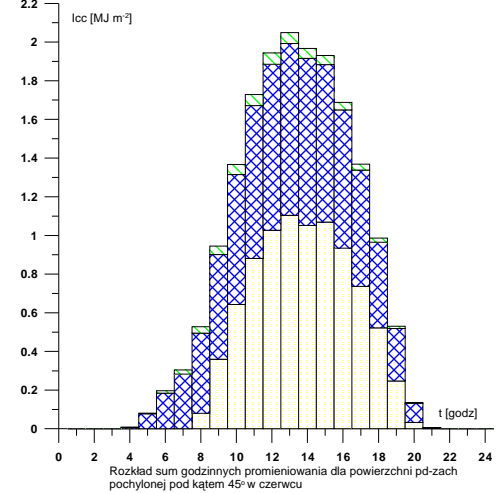
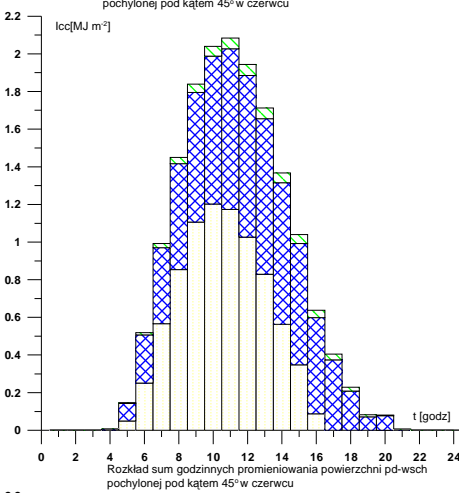
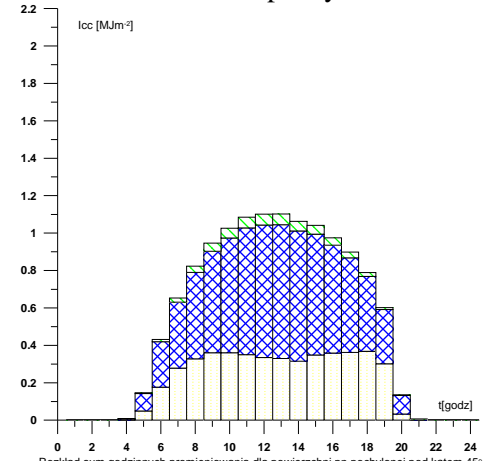
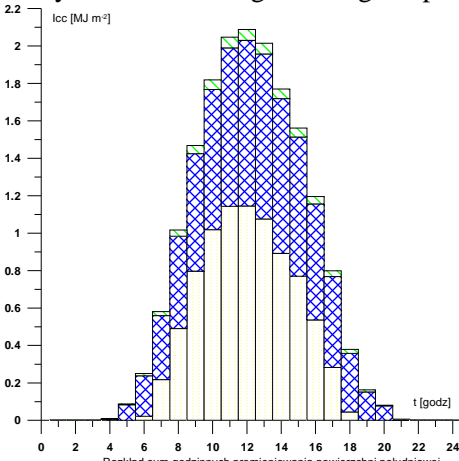
Natomiast na rys. D.19 przedstawiono zmiany rocznego napromieniowania półsferycznego, u góry w funkcji kąta azymutalnego $I_{cc}=f(\gamma)$ dla różnych pochyłeń β powierzchni, a u dołu w funkcji kąta pochylenia $I_{cc}=f(\beta)$ dla różnych orientacji γ powierzchni.

Rysunek D.20 przedstawia zmiany sezonowego letniego napromieniowania półsferycznego, u góry w funkcji kąta azymutalnego $I_{cc}=f(\gamma)$ dla różnych pochyłeń β powierzchni, a u dołu w funkcji kąta pochylenia $I_{cc}=f(\beta)$ dla różnych orientacji γ powierzchni.

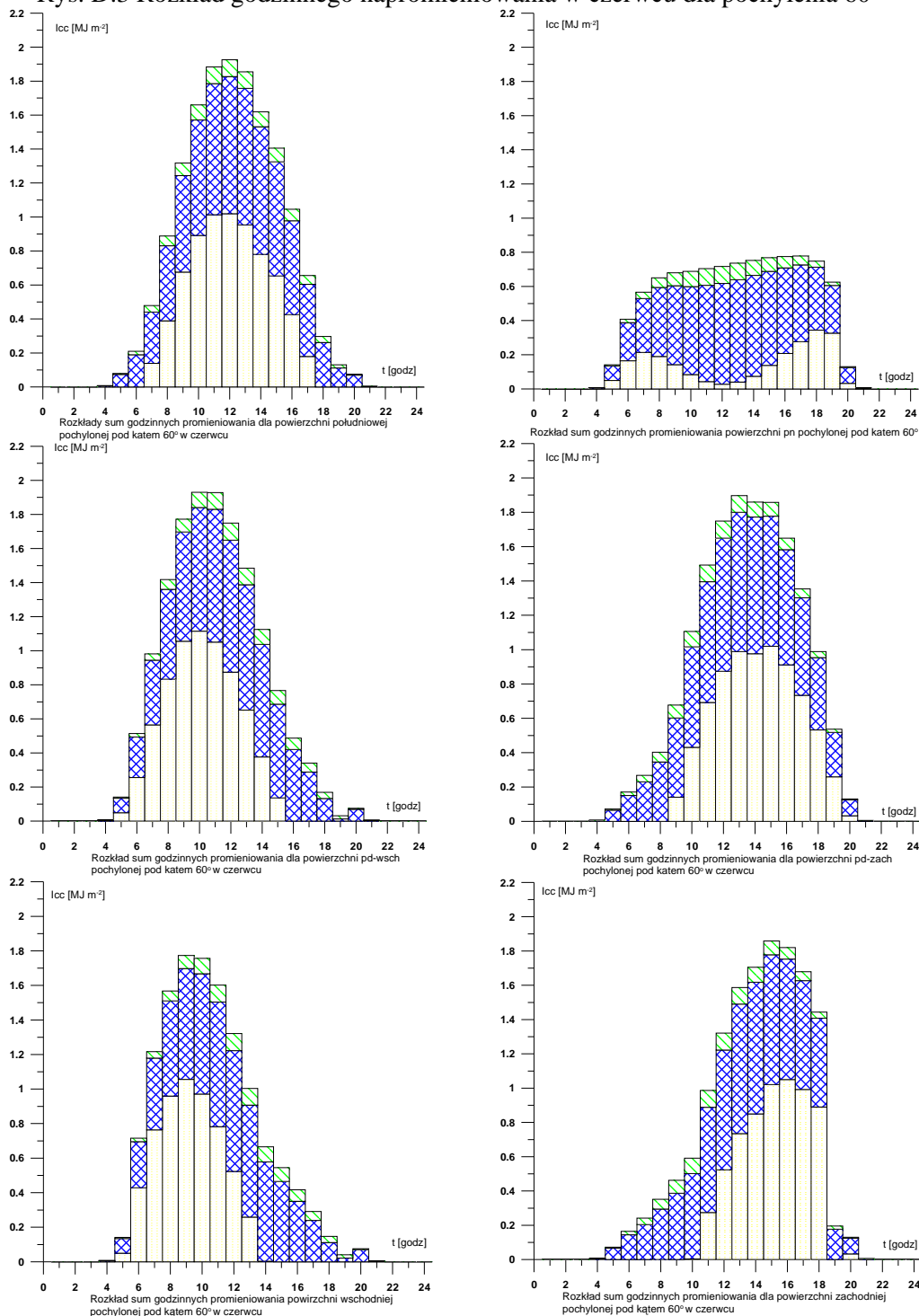
Rys. D.1 Rozkład godzinny napromieniowania w czerwcu dla pochylenia 30°



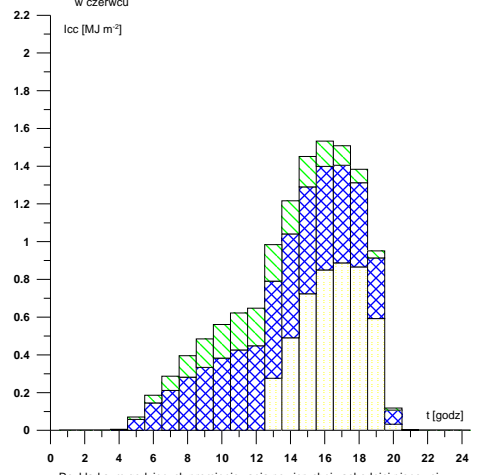
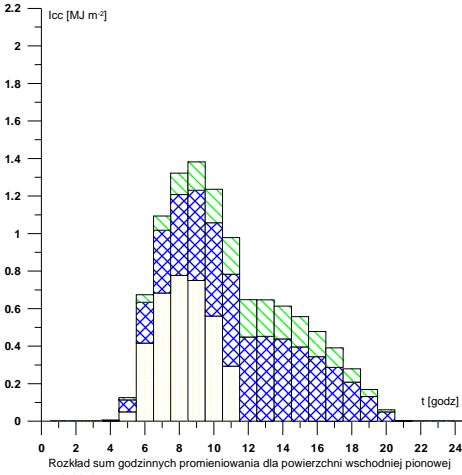
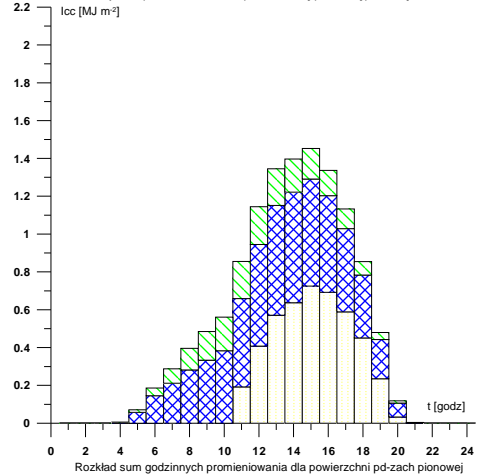
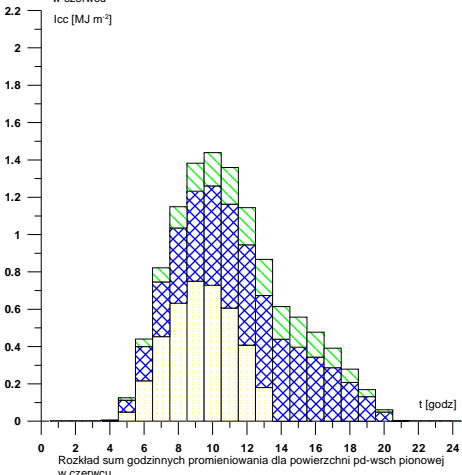
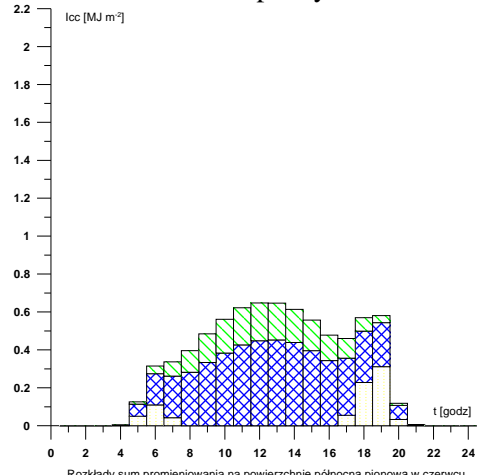
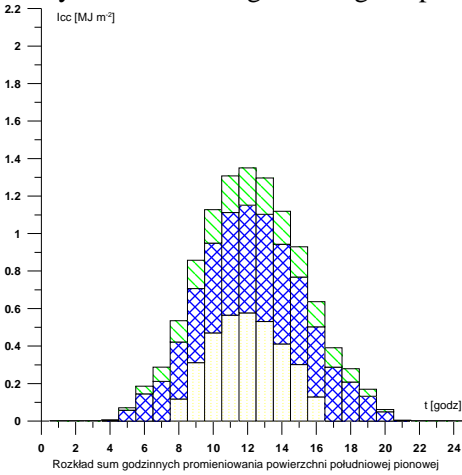
Rys. D.2 Rozkład godzinny napromieniowania w czerwcu dla pochylenia 45°



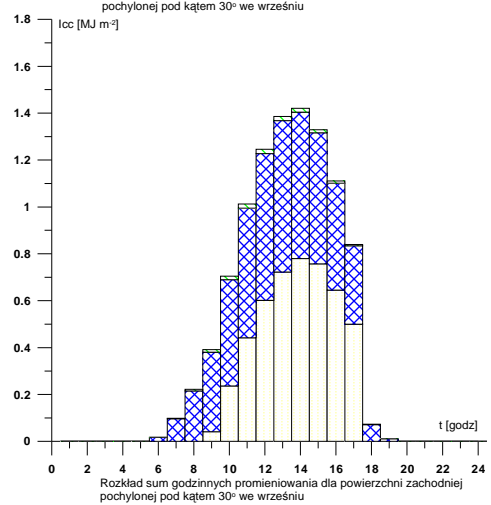
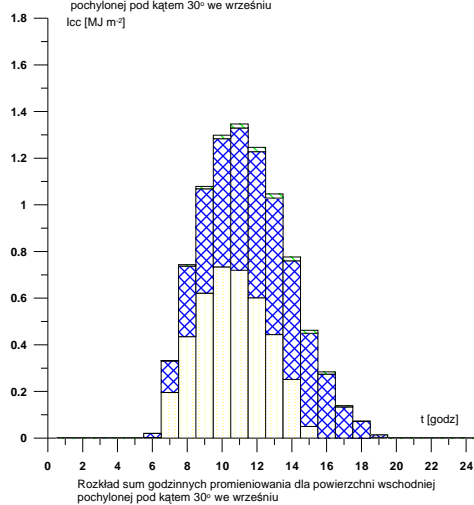
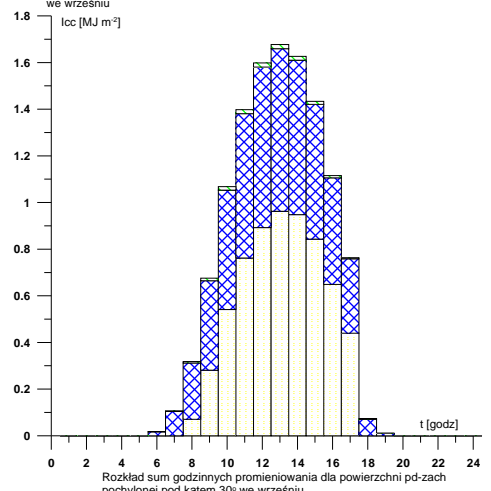
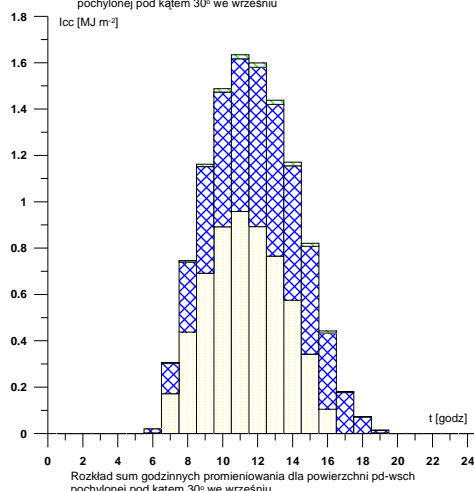
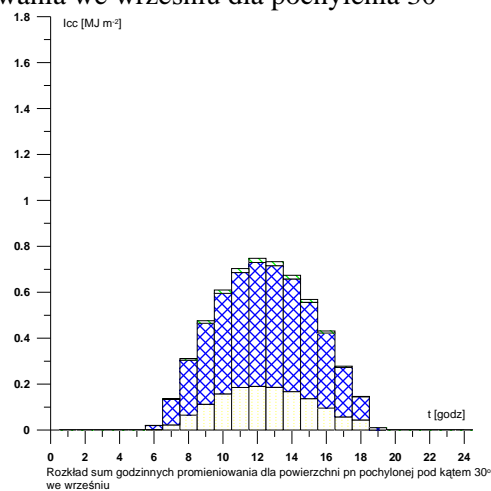
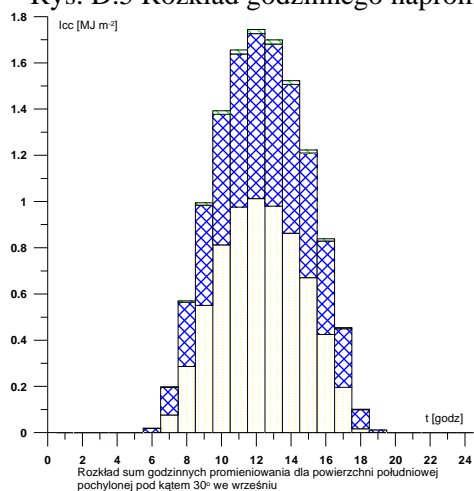
Rys. D.3 Rozkład godzinny napromieniowania w czerwcu dla pochylenia 60°



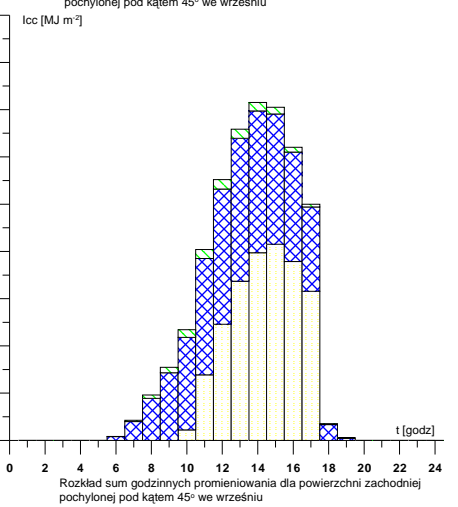
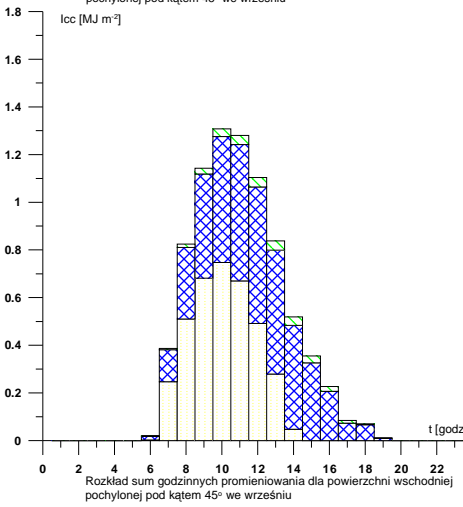
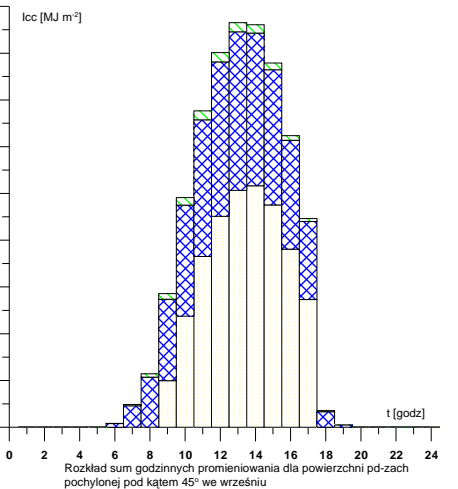
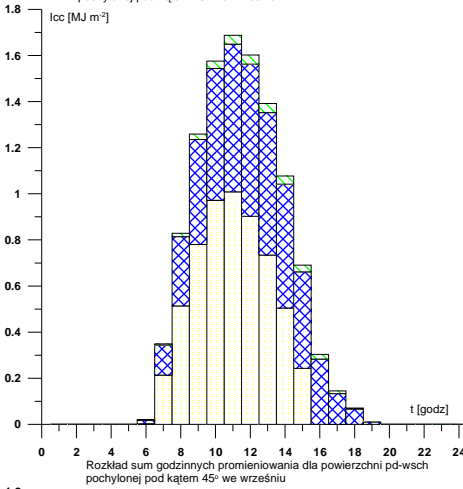
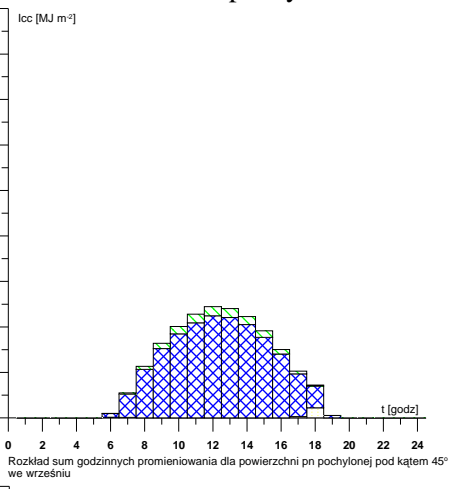
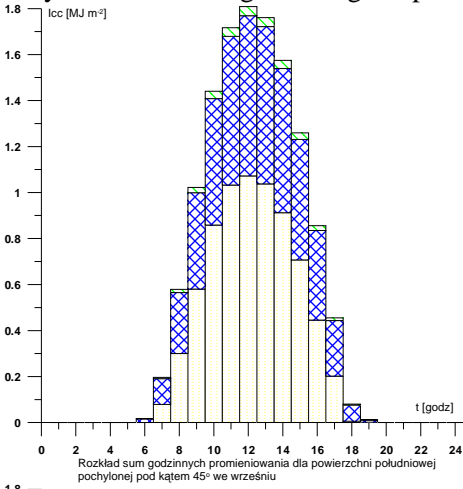
Rys.D.4 Rozkład godzinny napromieniowania w czerwcu dla pochylenia 90°



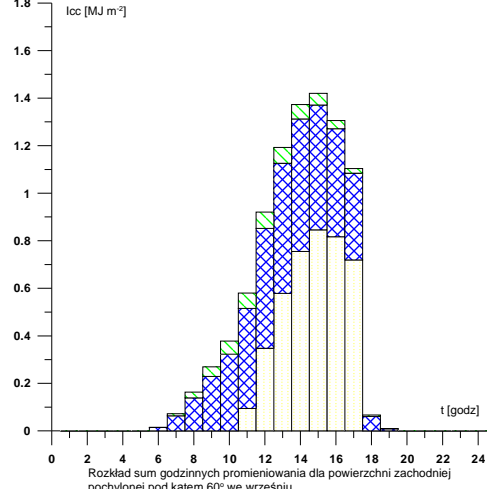
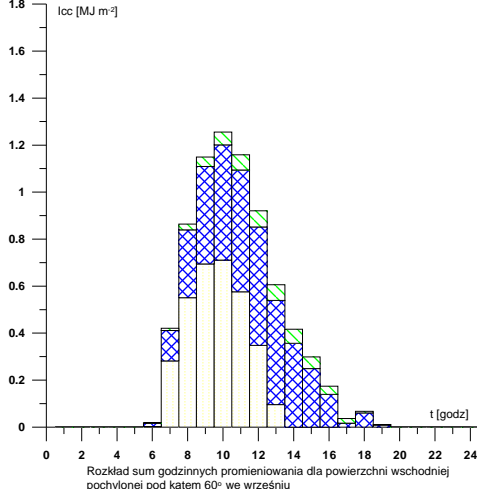
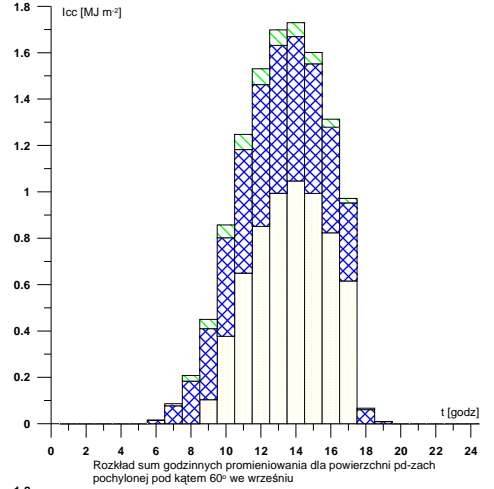
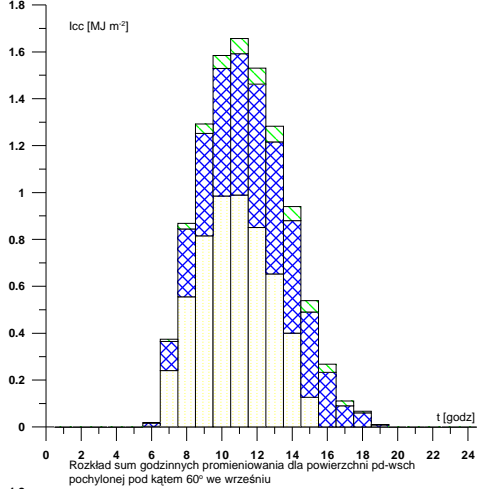
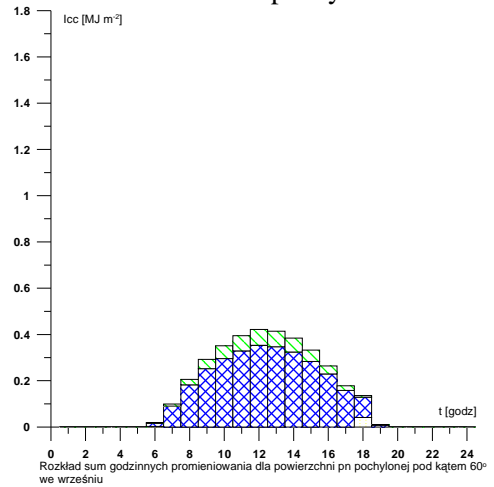
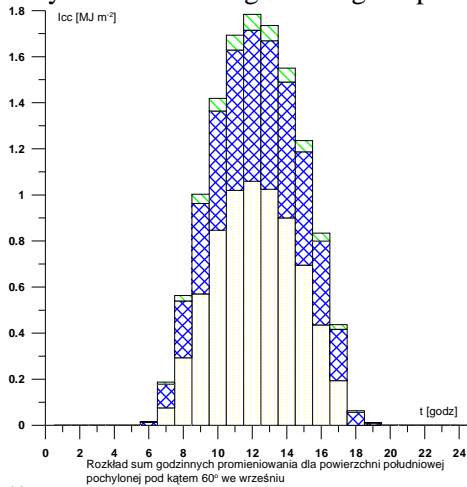
Rys. D.5 Rozkład godzinny napromieniowania we wrześniu dla pochylenia 30°



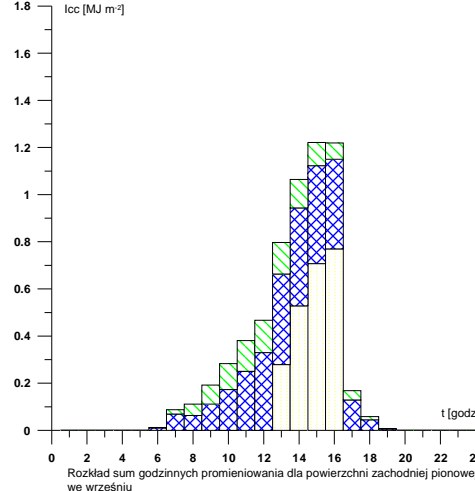
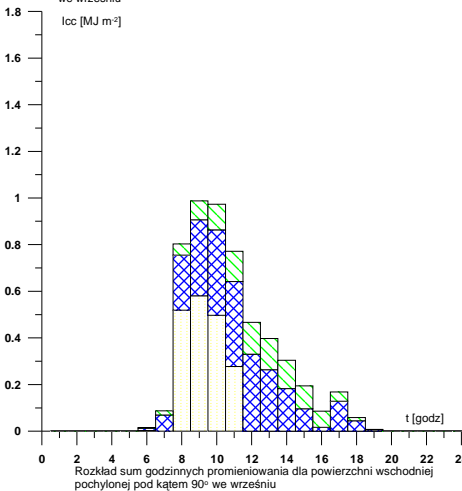
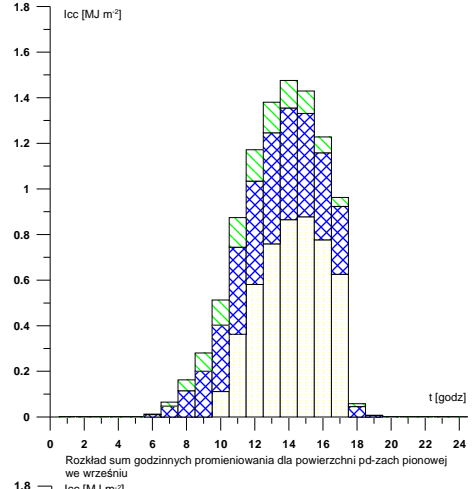
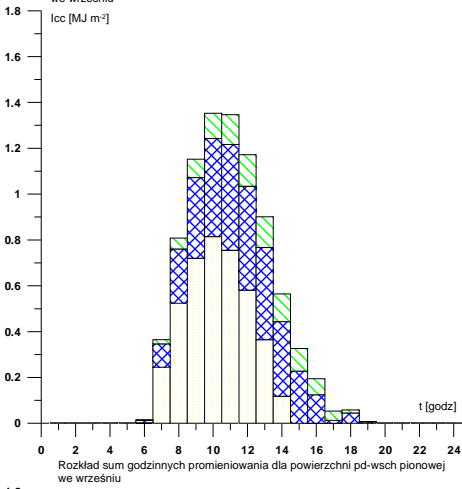
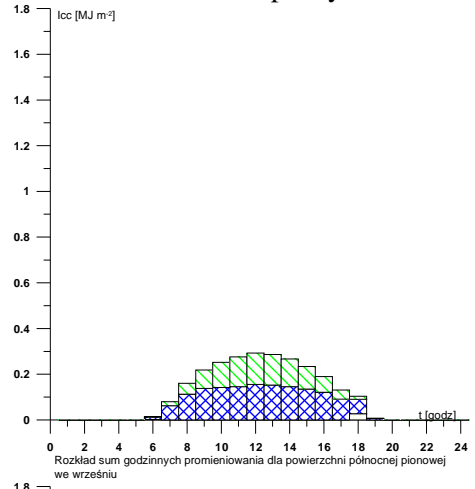
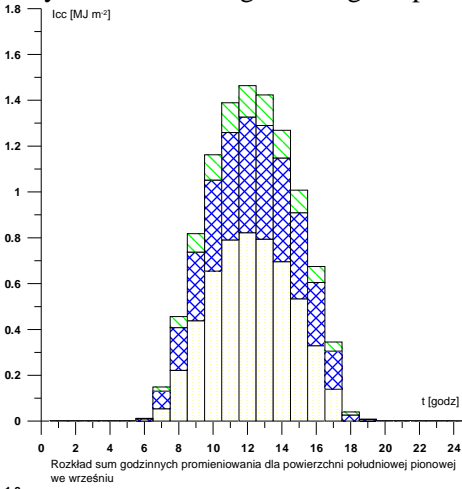
Rys. D.6 Rozkład godzinny napromieniowania we wrześniu dla pochylenia 45°



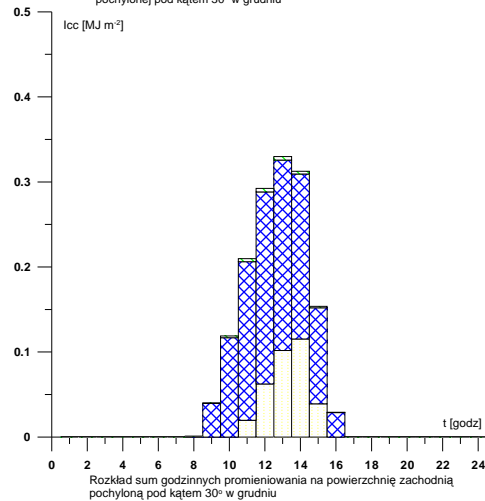
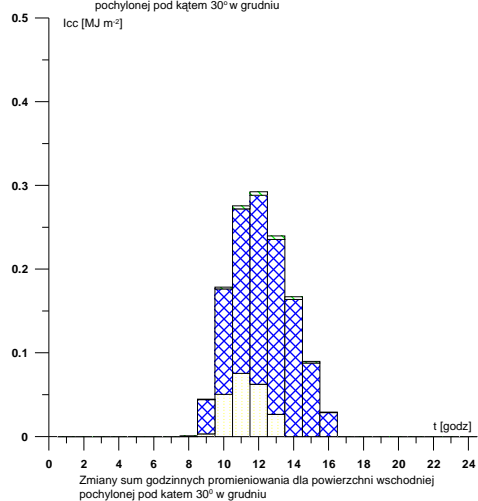
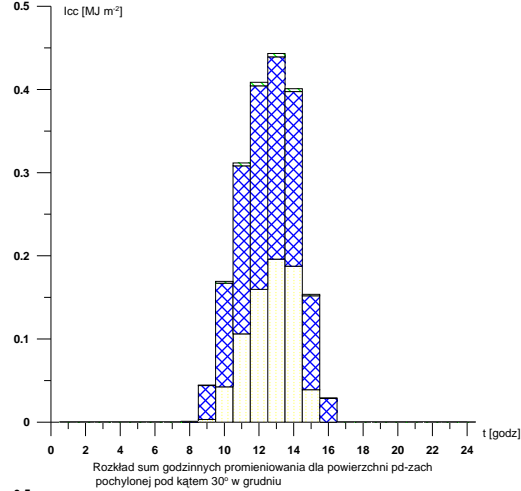
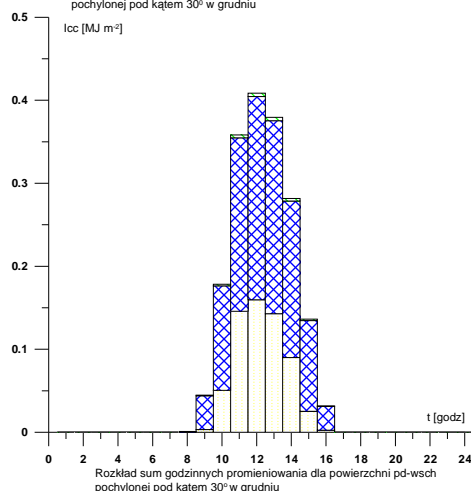
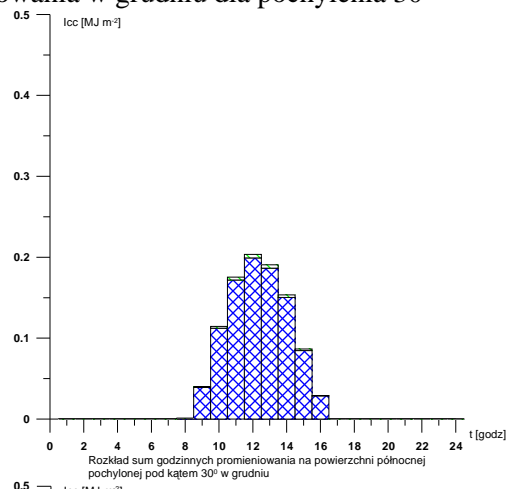
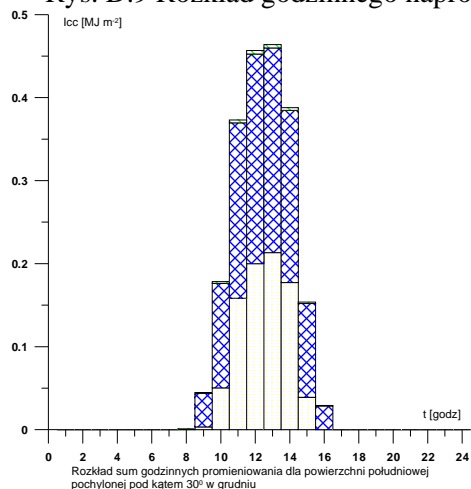
Rys. D.7 Rozkład godzinny napromieniowania we wrześniu dla pochylenia 60°



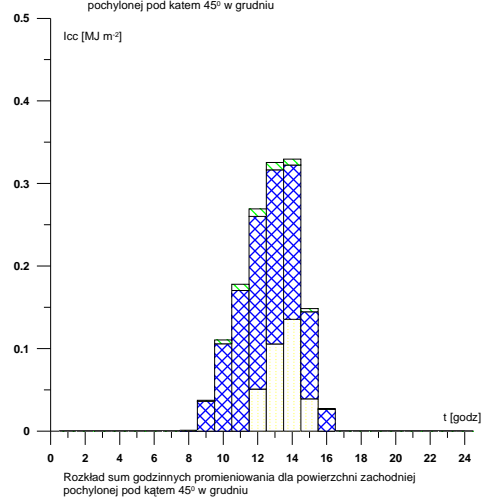
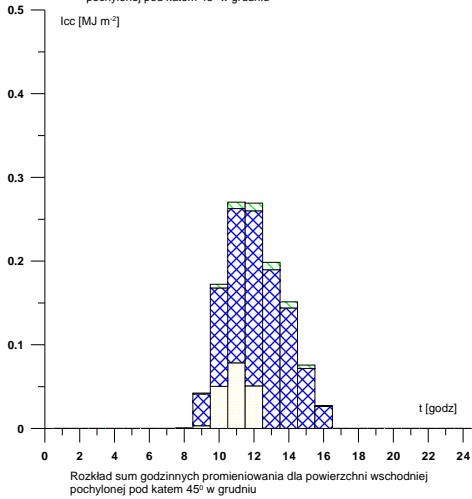
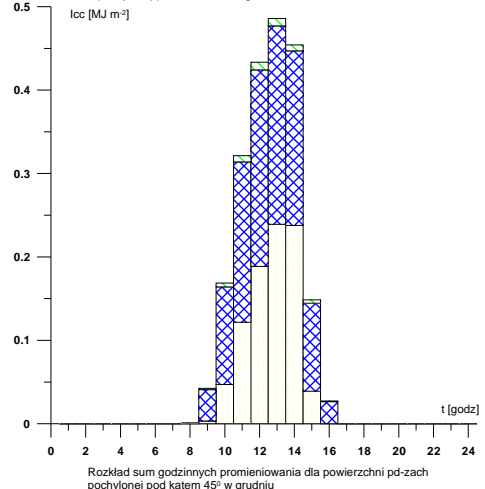
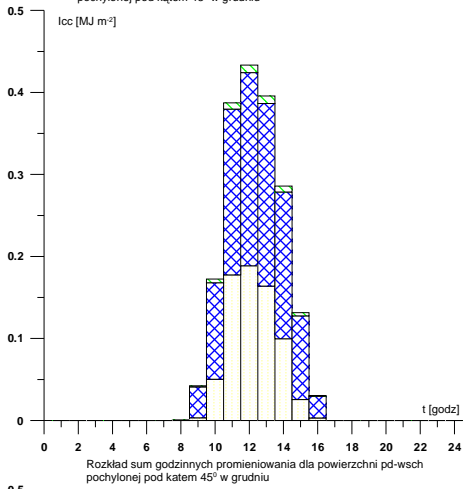
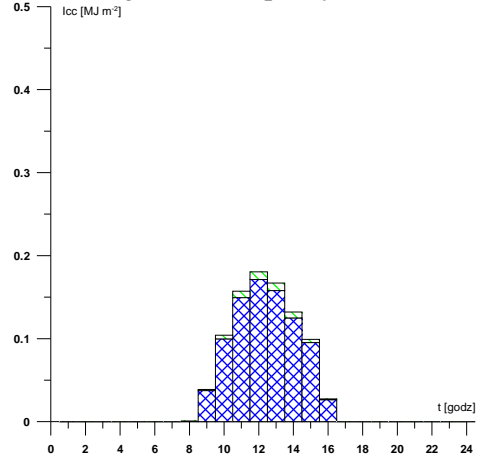
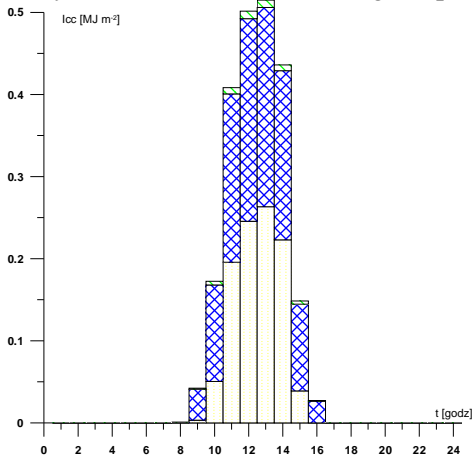
Rys. D.8 Rozkład godzinny napromieniowania we wrześniu dla pochylenia 90°



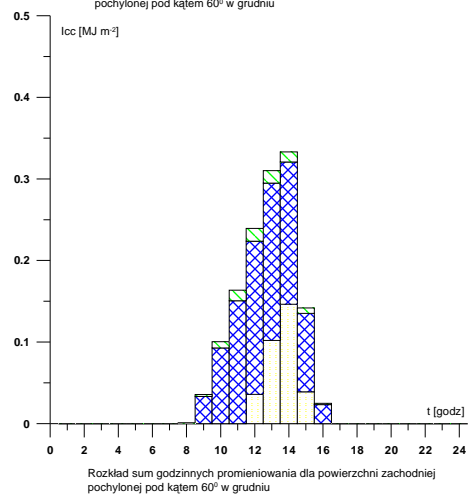
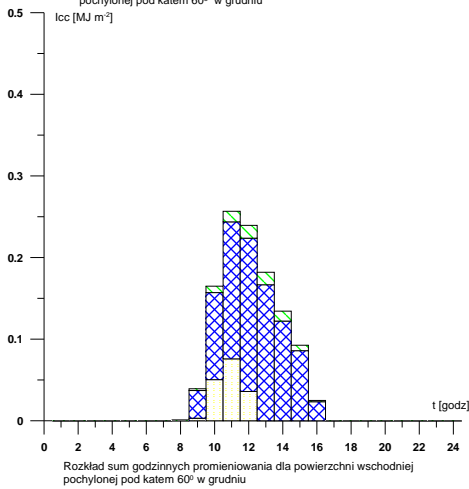
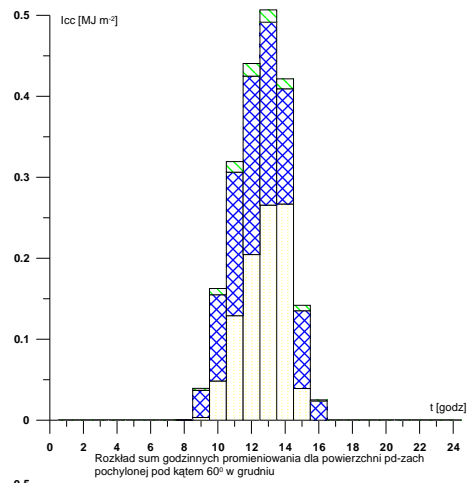
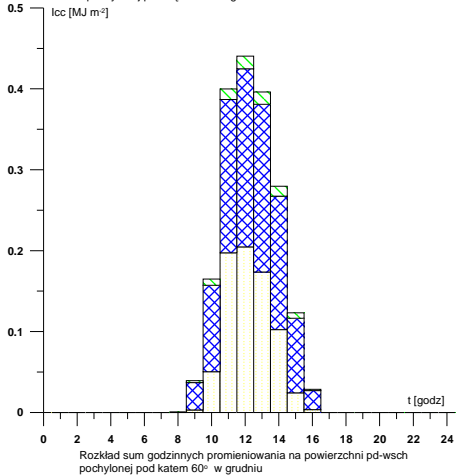
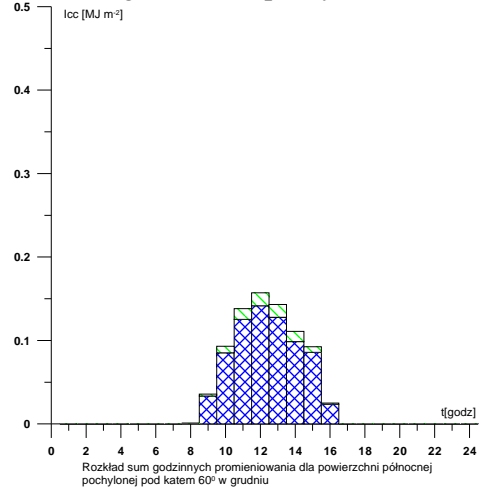
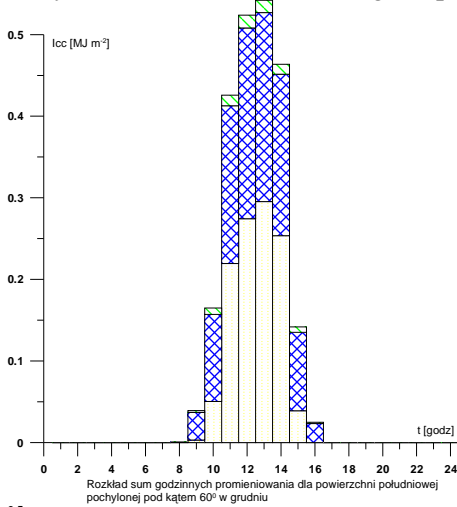
Rys. D.9 Rozkład godzinny napromieniowania w grudniu dla pochylenia 30°



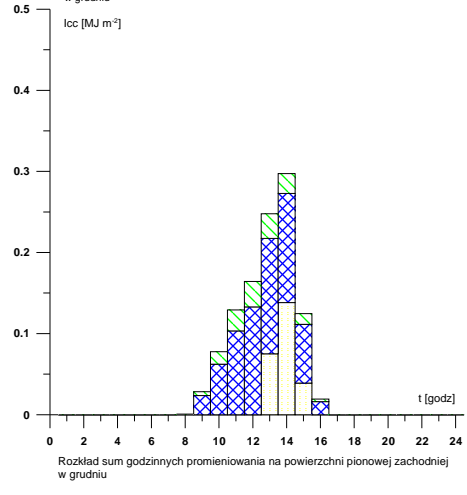
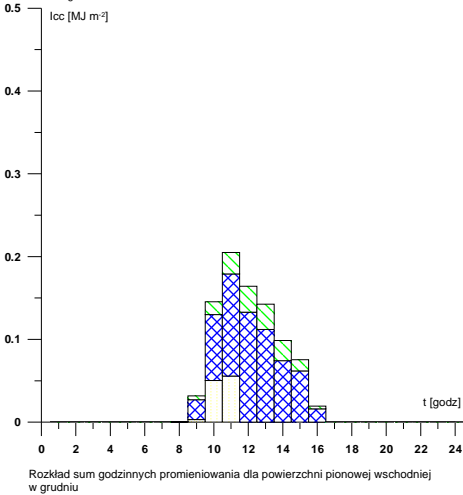
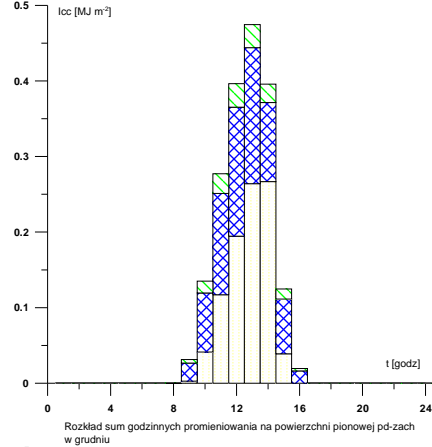
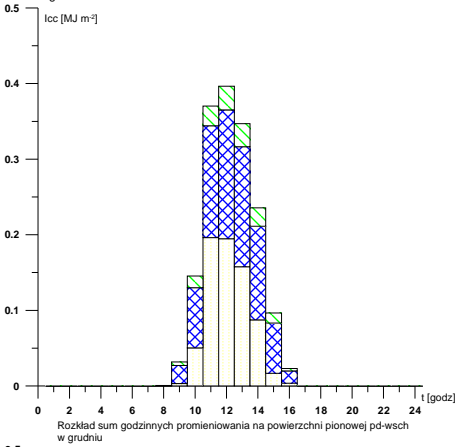
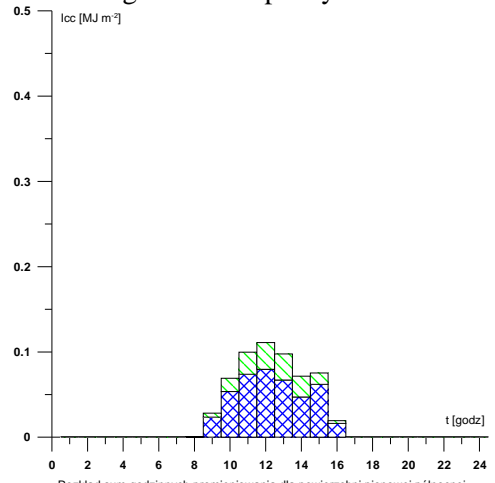
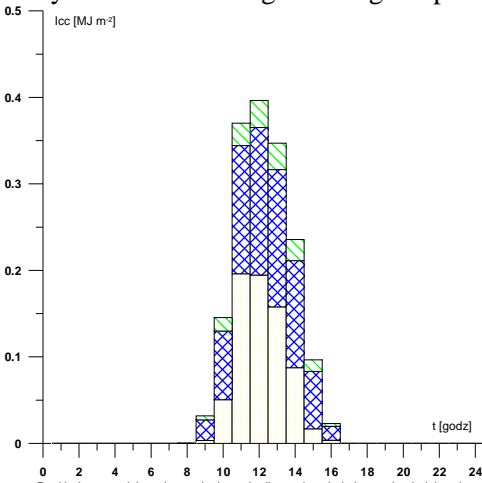
Rys. D.10 Rozkład godzinny napromieniowania w grudniu dla pochylenia 45°



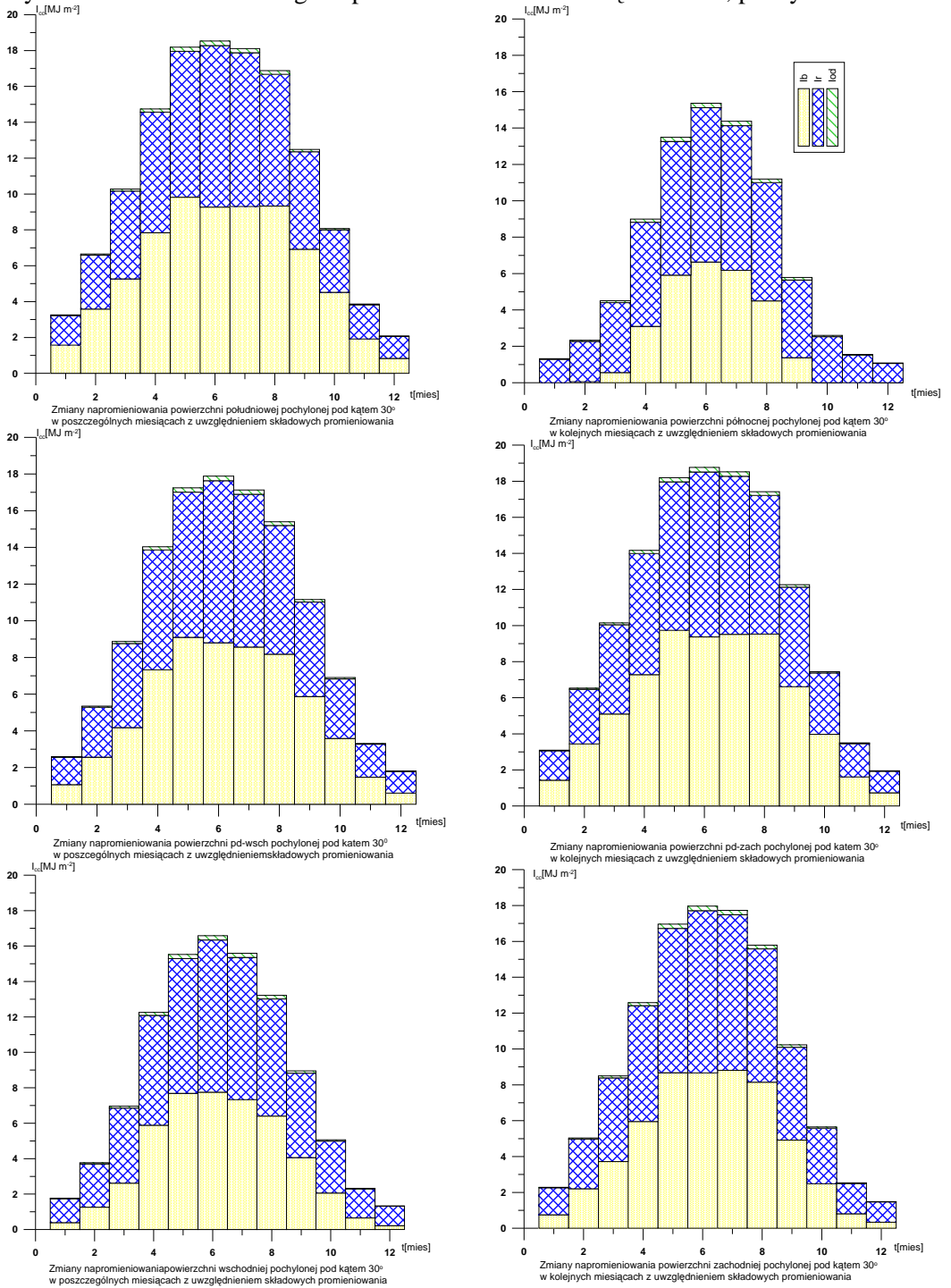
Rys. D.11 Rozkład godzinny napromieniowania w grudniu dla pochylenia 60°



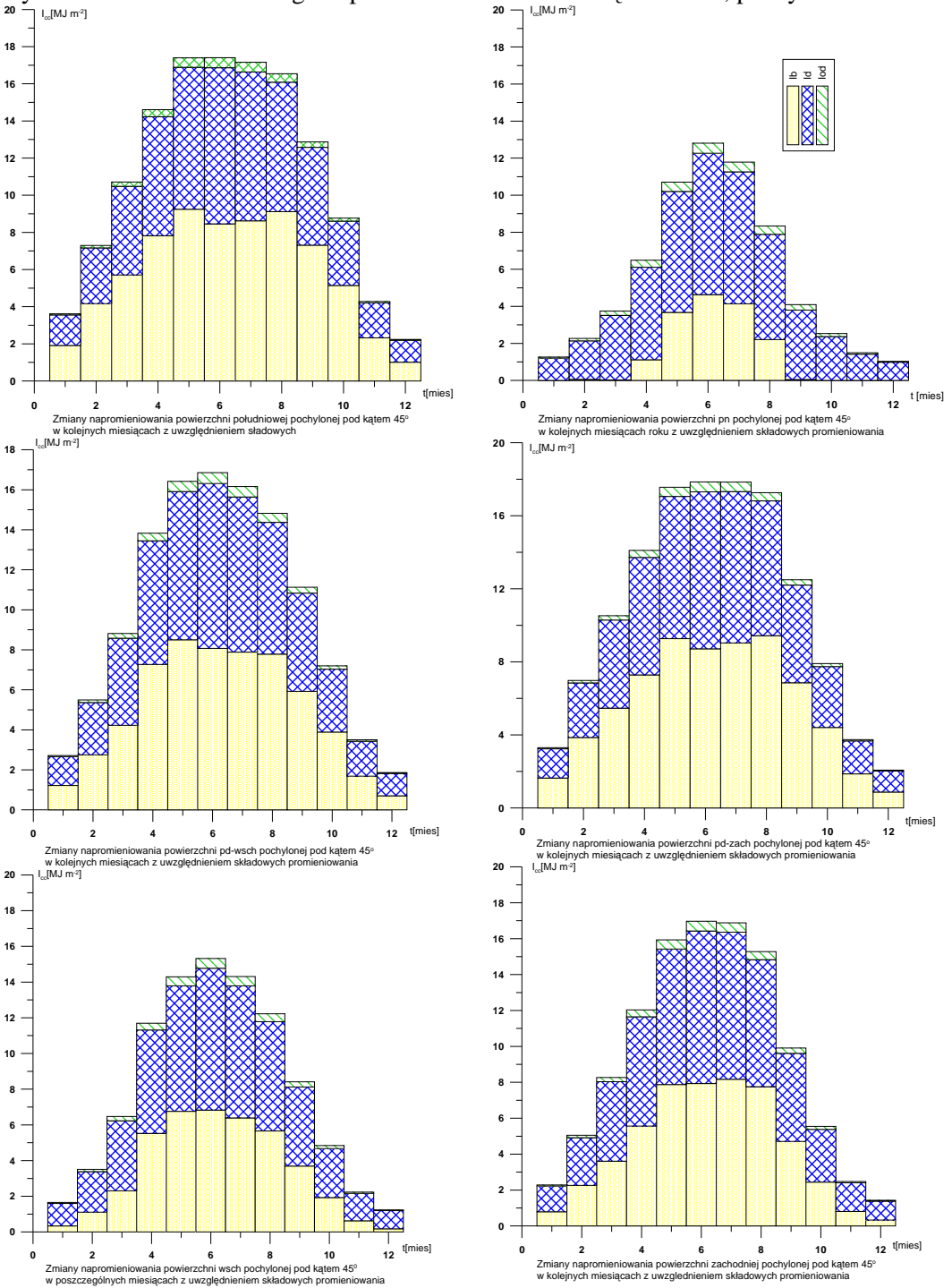
Rys. D.12 Rozkład godzinny napromieniowania w grudniu dla pochylenia 90°



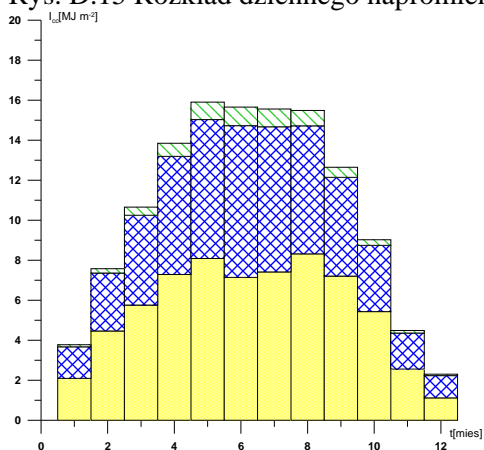
Rys. D.13 Rozkład dziennego napromieniowania w miesiącach roku, pochylenie 30°



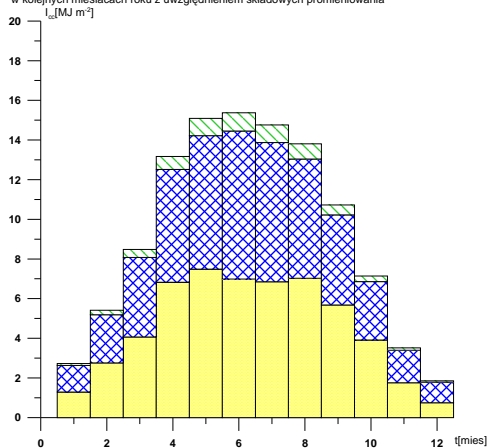
Rys. D.14 Rozkład dziennego napromieniowania w miesiącach roku, pochylenie 45°



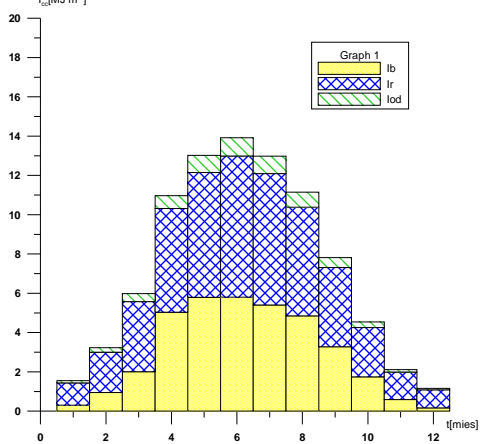
Rys. D.15 Rozkład dziennego napromieniowania w miesiącach roku, pochylenie 60°



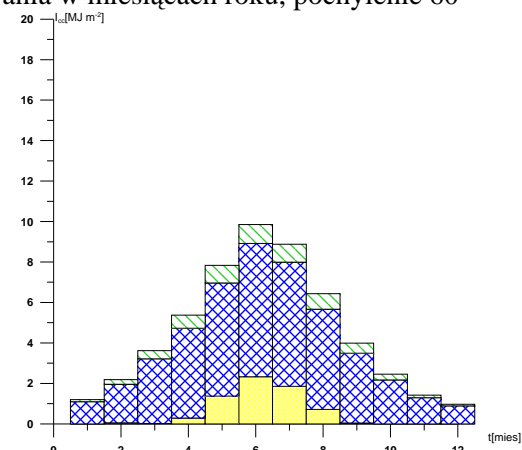
Zmiany napromieniowania płaszczyzny południowej pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania



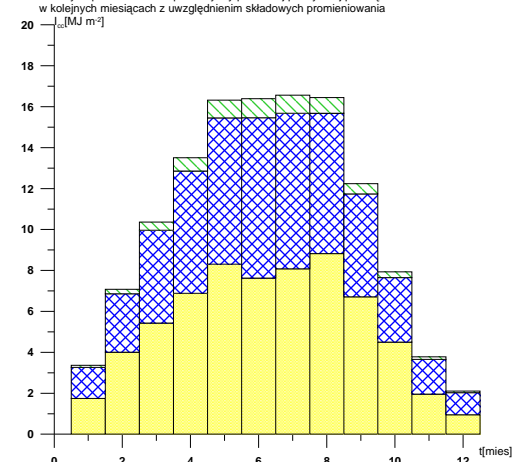
Zmiany napromieniowania dla płaszczyzny pd-wsch pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach z uwzględnieniem składowych promieniowania



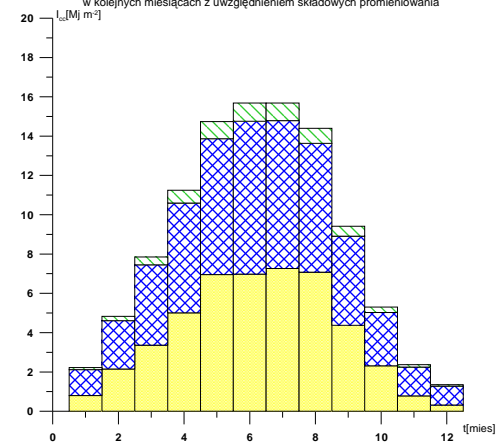
Zmiany napromieniowania płaszczyzny wschodniej pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach z uwzględnieniem składowych promieniowania



Zmiany napromieniowania płaszczyzny północnej pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach z uwzględnieniem składowych promieniowania

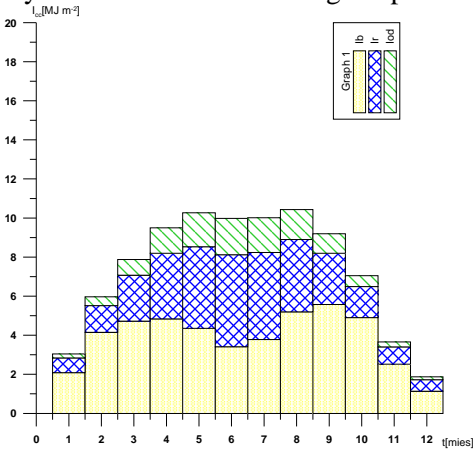


Zmiany napromieniowania powierzchni pd-zach pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach z uwzględnieniem składowych promieniowania

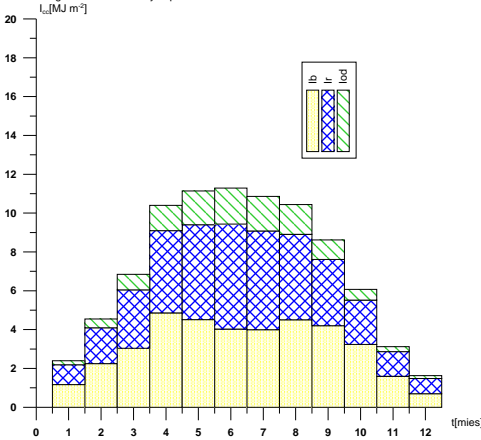


Zmiany napromieniowania powierzchni zachodniej pochyłonej pod kątem 60° w kolejnych miesiącach z uwzględnieniem składowych promieniowania

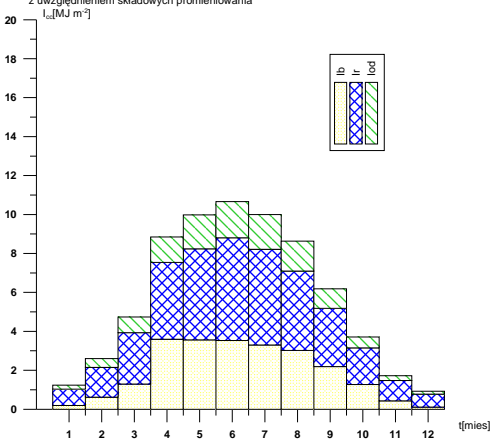
Rys. D.16 Rozkład dziennego napromieniowania w miesiącach roku, pochylenie 90°



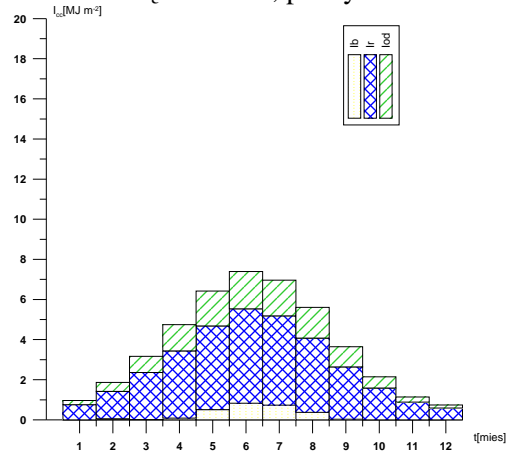
Zmiany napromieniowania pionowej płaszczyzny południowej w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania



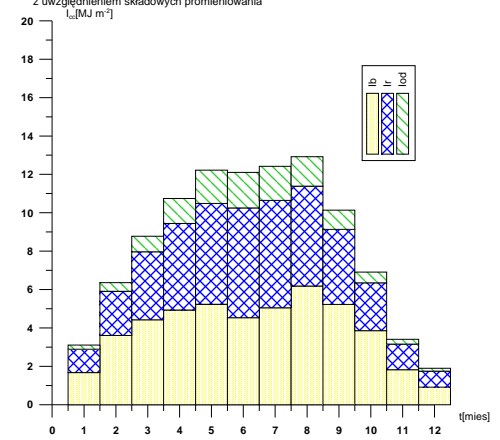
Zmiany napromieniowania pionowej płaszczyzny pd-wsch w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania



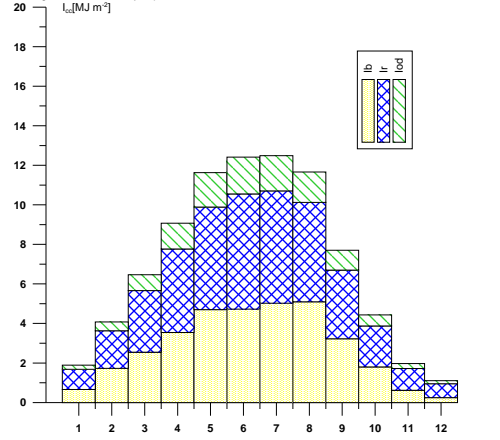
Zmiany napromieniowania pionowej płaszczyzny wschodniej w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania



Zmiany napromieniowania pionowej płaszczyzny północnej w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania

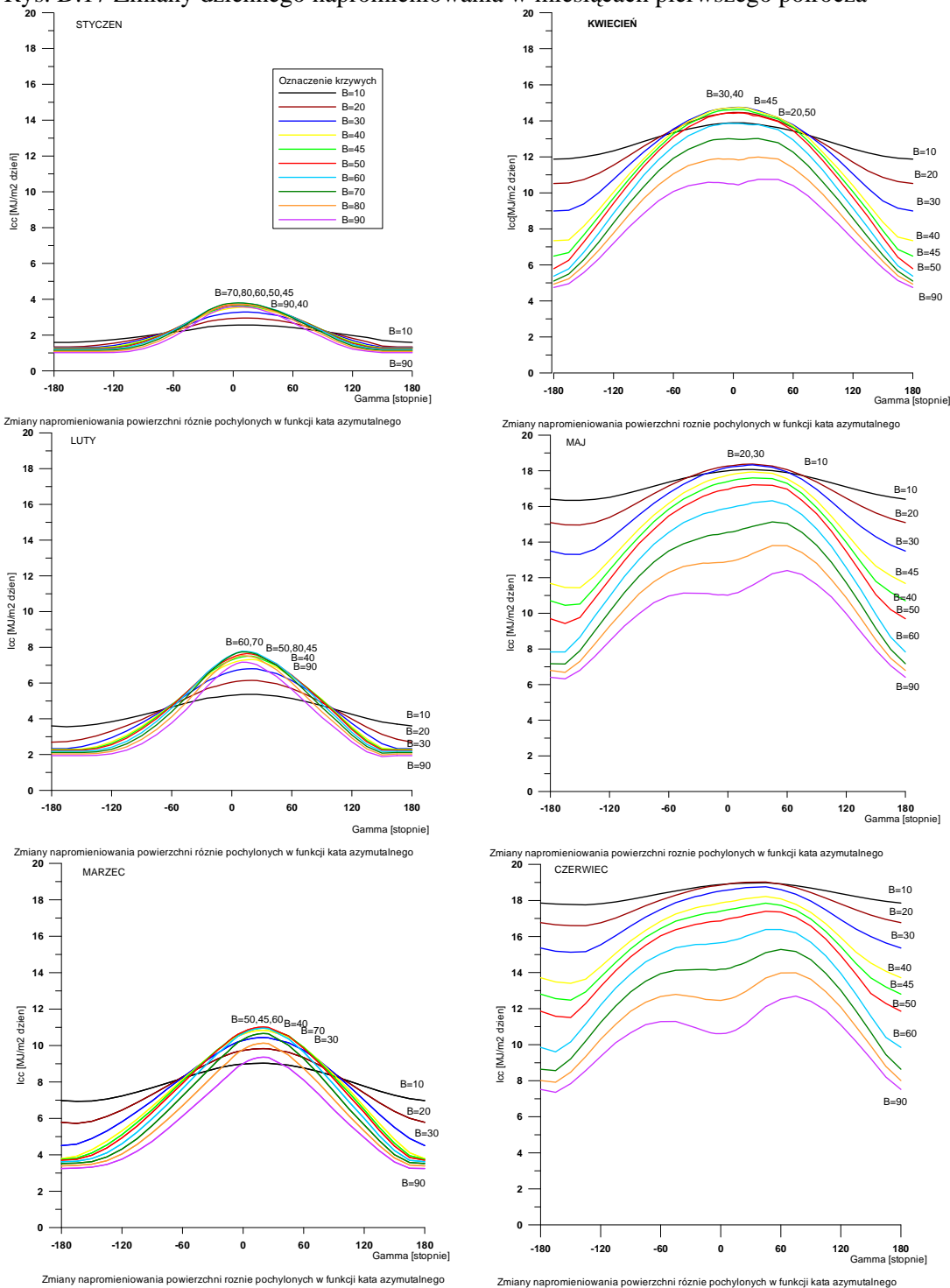


Zmiany napromieniowania pionowej płaszczyzny pd-zach w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania

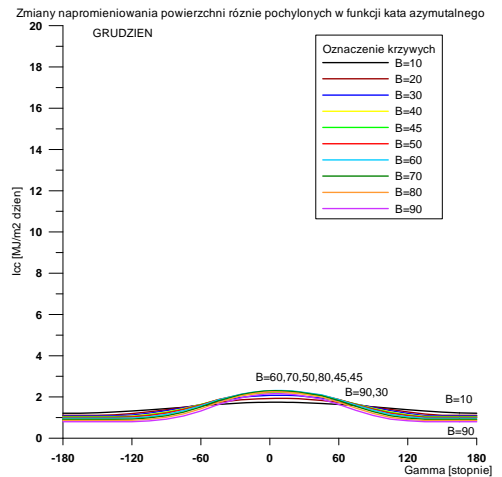
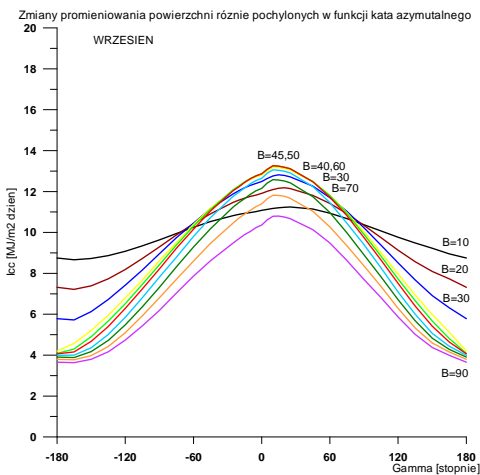
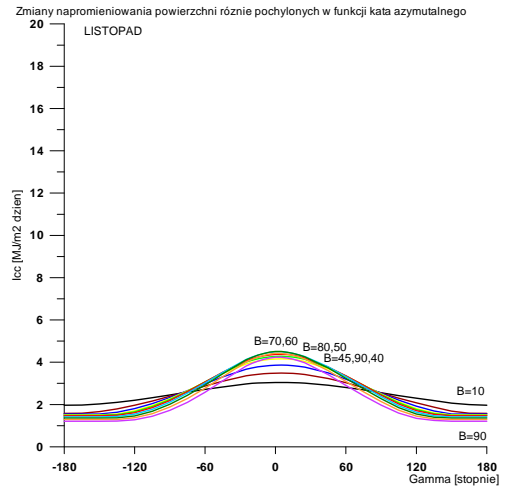
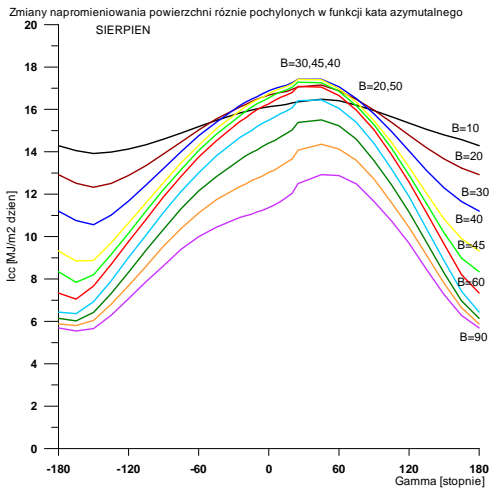
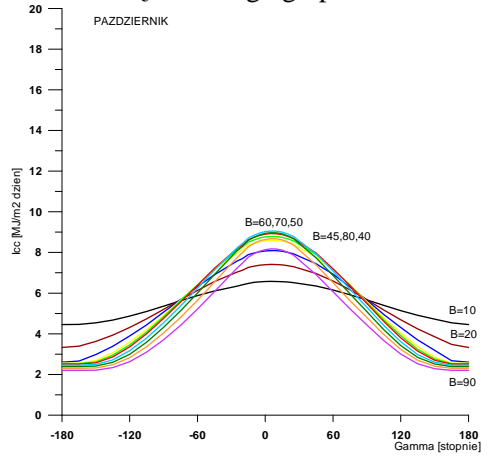
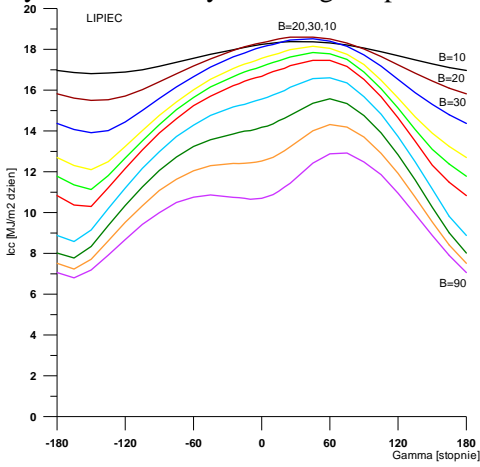


Zmiany napromieniowania pionowej powierzchni zachodniej w kolejnych miesiącach roku z uwzględnieniem składowych promieniowania

Rys. D.17 Zmiany dziennego napromieniowania w miesiącach pierwszego półrocza



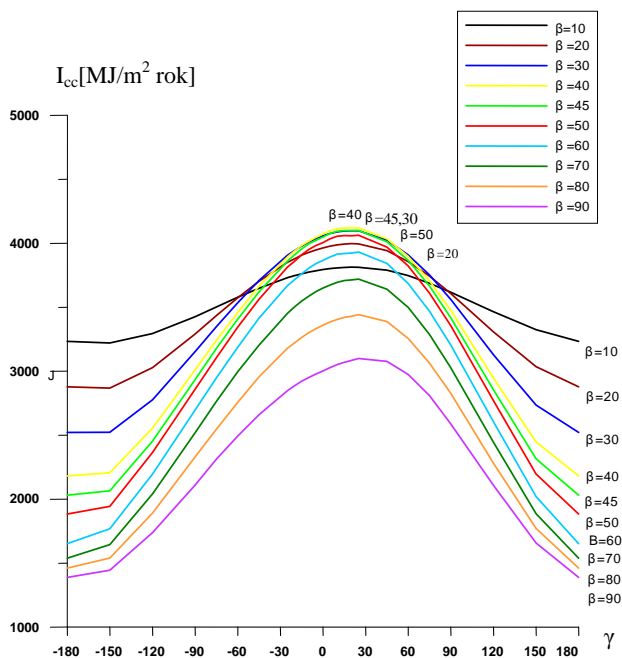
Rys. D.18 Zmiany dziennego napromieniowania w miesiącach drugiego półrocza



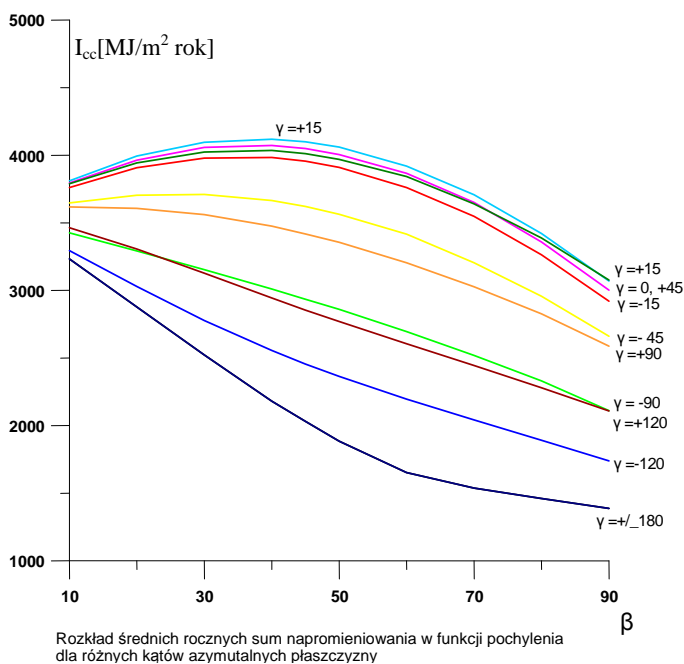
Zmiany napromieniowania powierzchni różnie pochyłych w funkcji kąta azymutalnego

Zmiany napromieniowania powierzchni różnie pochyłych w funkcji kąta azymutalnego

Rys. D.19 Zmiany rocznego napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni

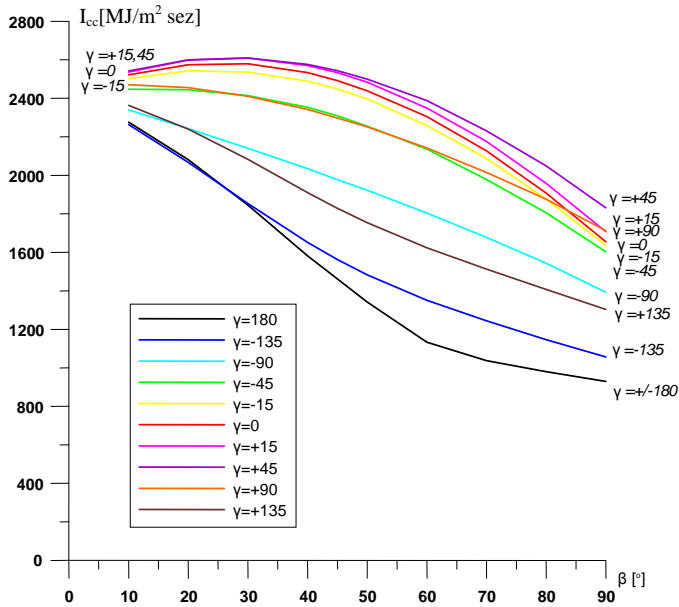


Zmiany napromieniowania powierzchni β nie pochylenych w funkcji kąta azymutalnego

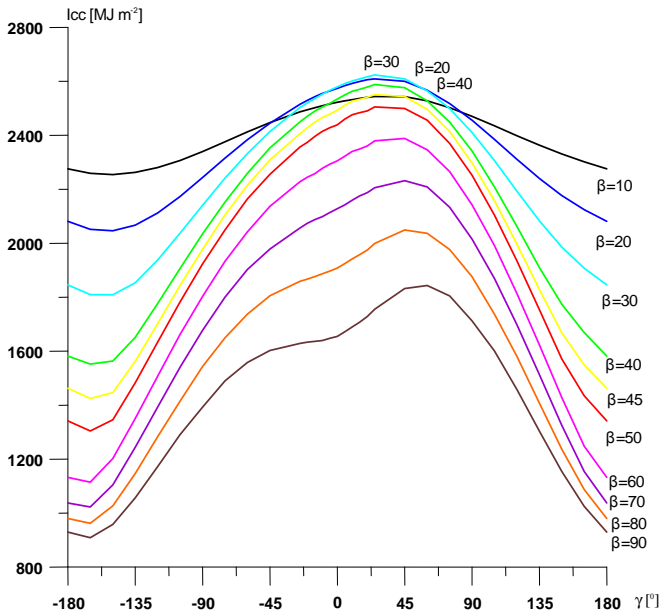


Rozkład średnich rocznych sum napromieniowania w funkcji pochylecia dla różnych kątów azymutalnych płaszczyzny

Rys. D.20 Zmiany sezonowego letniego napromieniowania różnie usytuowanych powierzchni



Zmiany całkowitego sezonowego (letniego) napromieniowania w funkcji pochylecia dla różnych orientacji powierzchni



Zmiany napromieniowania sezonowego -letniego w funkcji zorientowania powierzchni dla jej różnych pochyleń

Dodatek 2

Porównanie danych napromieniowania otrzymanych z obliczeń symulacyjnych i zamieszczonych w normach

Stosowany w kraju do celów projektowych budynku normowy sposób określania oddziaływania energii promieniowania słonecznego na budynek, zawarty w normie PN-B-02025 [189], jest bardzo uproszczony i nie oddaje charakteru zjawisk zachodzących w budynku i jego otoczeniu związanych z oddziaływaniem energii promieniowania słonecznego na budynek i zmienności jej dostępności w czasie.

Zgodnie z normą PN-B-02025 [189] przy obliczaniu zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń uwzględnia się Q_{sw} zyski ciepła słonecznego przez okna w każdym kolejnym miesiącu sezonu grzewczego. Zyski te mnoży się przez się przez współczynnik η wykorzystania zysków ciepła w każdym kolejnym miesiącu sezonu grzewczego, który oblicza się w zależności od strefy klimatycznej. Współczynnik η jest wyrażony poprzez funkcję eksponentyjną stosunku strat ciepłych Q_{str} do zysków Q_z , w następujący sposób:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{Q_{str}}{Q_z}}$$

w normie stosunek zysków Q_z do strat Q_{str} jest oznaczony jako współczynnik GLR .

Norma podaje zależność na obliczanie zysków słonecznych $Q_s(m)$ w każdym kolejnym miesiącu m dla każdej elewacji (w zależności od jej usytuowania) w postaci iloczynu następujących czynników:

- pola A_s powierzchni całkowitej szyb na danej elewacji,
- współczynnika TR przepuszczalności szyb dla promieniowania słonecznego,
- sumy $S(m)$ miesięcznej gęstości całkowitego promieniowania (tj. miesięcznego napromieniowania półsferycznego) w każdym kolejnym miesiącu m ,
- współczynnika Z zacienienia elewacji.

Poszczególne wartości obliczeniowe wymienionych wielkości $S(m)$, TR i Z podane są w odpowiednich załącznikach do normy.

W załączniku C podano „wartości obliczeniowe całkowitego promieniowania słonecznego padającego na różnie zorientowane powierzchnie” (w kWh/m²). (Należy zaznaczyć, że zgodnie z inną normą [190] dotyczącą terminologii w energetyce słonecznej jest to promieniowanie półsferyczne, a nie całkowite.) Jako charakterystyczne orientacje powierzchni podane są następujące: południowa, południowo - wschodnia, wschodnia, północno - wschodnia, północna, północno - zachodnia, zachodnia i południowo - zachodnia. Natomiast jako typowe pochylenia powierzchni uwzględniono pochylenia pod kątem: 0° (powierzchnia pozioma), 30°, 45°, 60°, 90° (powierzchnia pionowa). Zamieszczone dane zostały opracowane na podstawie danych promieniowania całkowitego z 17 stacji aktynometrycznych z obszaru Polski z 10 letniego okresu pomiarowego.

Przeanalizowano zamieszczone w Załączniku C do rozważanej normy PN-B-02025 dane dla Warszawy i porównano je z danymi otrzymanymi w wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych. W wyniku przeprowadzonej analizy sformułowano następujące wnioski:

- wartości napromieniowania otrzymane z obliczeń symulacyjnych są w większości przypadków wyższe od wartości normowych: wyjątkami są wyższe wartości normowe występujące z reguły dla powierzchni wschodnich i północnych, oraz w miesiącu grudniu praktycznie dla wszystkich orientacji i pochyleń; stwierdzono, że nie występują wyraźne zależności pomiędzy różnicami w analizowanych danych napromieniowania, co oznacza, że modele obliczeniowe symulacyjne i normowe do wyznaczania napromieniowania różnie pochylonych i zorientowanych powierzchni różnią się; większe wartości napromieniowania uzyskiwane w obliczeniach symulacyjnych dla większości powierzchni i wyższe wartości napromieniowania wg norm dla powierzchni północnych mogą świadczyć o zastosowaniu do obliczeń normowych modelu izotropowego;
- występuje względna zgodność pomiędzy danymi normowymi i wynikami obliczeń symulacyjnych dotycząca zmienności napromieniowania w zależności od kąta pochylecia powierzchni;
- wartości normowe napromieniowania wskazują, że powierzchnie wschodnie i południowo – wschodnie są najlepiej napromieniowywane; oznacza to, że w godzinach przedpołudniowych warunki nasłonecznienia są lepsze niż w południe i popołudniu, prawidłowość ta występuje od kwietnia do grudnia, natomiast od stycznia do marca preferencja występuje dla powierzchni odchylonych od południa w stronę zachodnią (czyli w godzinach popołudniowych warunki nasłonecznienia są lepsze). Dane te nie zgadzają się z wynikami obliczeń symulacyjnych, wg których w zimie najlepiej napromieniowywane są powierzchnie południowe, a przez pozostałą część roku południowo – zachodnie, lub nawet zachodnie (co zostało szczegółowo opisane w rozdziale 2). Nie można sprawdzić prawdziwości danych normowych napromieniowania różnych powierzchni, ponieważ nie są zamieszczone w normach rozkłady dobowe, ani nie podano zastosowanej metody obliczania napromieniowania powierzchni dowolnie usytuowanych. Zamieszczone dane napromieniowania są tym bardziej zaskakujące, iż dane dla powierzchni poziomej zarówno normowe, jak i dane wejściowe zastosowane w rozprawie, wykazują względnie dobrą zgodność (dane normowe poza miesiącem marcem są nieznacznie wyższe). Należy jeszcze raz podkreślić, że w naszych warunkach klimatycznych, zawsze w godzinach popołudniowych napromieniowanie, w tym składowa bezpośrednia są wyższe niż w godzinach przedpołudniowych, czego dowodzą wyniki przeprowadzonej analizy i stwierdzone w pracach IMGiW [28]-[31] zmiany napromieniowania w ciągu dnia dla warunków naszej strefy klimatycznej i geograficznej. Dlatego też dane napromieniowania powierzchni różnie zorientowanych i pochylonych względem poziomu, zamieszczone w

normie, dają niewłaściwy obraz stanu środowiska zewnętrznego w odniesieniu do oddziaływania promieniowania słonecznego.

Zgodnie z danymi normowymi przy projektowaniu helioaktywnych elementów obudowy, wykorzystywanych przede wszystkim w okresie letnim, należy je planować od strony południowo - wschodniej, bowiem takie ich zorientowanie daje największe zyski słoneczne (od maja do sierpnia). Natomiast dla rozwiązań pasywnych najbardziej wskazane wg norm jest umiejscowienie ich od strony południowo - zachodniej, bowiem dla tej orientacji najwyższe napromieniowanie występuje w miesiącach zimowych, od stycznia do marca. Powyższe wnioski, które można wysnuć z danych normowych napromieniowania są sprzeczne z wynikami przeprowadzonych obliczeń. Wskazania, co do usytuowania elementów helioaktywnych i heliopasywnych są odwrotne. Wykorzystanie wartości normowych jako danych bazowych do zaprojektowania bryły budynku może prowadzić do zastosowania nieodpowiednich orientacji poszczególnych elewacji budynku, a w konsekwencji do nieprzewidzianych, nadmiernych strat ciepła w zimie i nadmiernych zysków ciepła w lecie.

Dodatek 3.

Przyjęte parametry, własności materiałowe i konstrukcyjne obudowy budynku

Obliczenia zjawisk zachodzących w modelowym pomieszczeniu przeprowadzono dla wybranych standardowych parametrów oraz własności materiałowych i konstrukcyjnych obudowy budynku. Dla poszczególnych elementów obudowy przyjęto, co następuje:

okno standardowe dwuszybowe ze szczeliną powietrzną, w tym:

- przeszklenie - szkło:
grubość 0,004 m; gęstość szkła: 2700 kg/m³; ciepło właściwe: 840 J/(kg K); przewodność cieplna: 0,78 W/(m K); emisyjność dla promieniowania cieplnego: 0,84; parametry optyczne dla promieniowania słonecznego padającego wzdłuż normalnej do powierzchni przeszklenia: transmisyjność: 0,803; refleksyjność: 0,101; absorpcyjność 0,096;
- szczelina powietrzna między szybami:
szerokość: 0,012 m; rozpórka szyb izolowana; parametry powietrza: gęstość 1,225 kg/m³; ciepło właściwe (przy stałym ciśnieniu): 1005 J/(kg K); przewodność cieplna: 0,033 W/(m K);
- rama okna drewniana, drewno miękkie:
gęstość: 500 kg/m³; przewodność cieplna: 0,13 W/(m K); grubość: 0,150 m, szerokość: 0,05 m; rama pokryta farbą o emisyjności dla promieniowania cieplnego: 0,5 i emisyjności dla promieniowania słonecznego: 0,3;

przegroda nieprzezroczysta trójwarstwowa:

- powierzchnia całkowita (z oknem) 10 m² (4 x 2,5 m²);
- grubość całkowita: 0,52 m; w tym poszczególnych warstw kolejno od zewnątrz: 0,12 m; 0,2 m; 0,2 m;
- przewodność cieplna kolejnych warstw przegrody (od zewnątrz do wewnątrz): 0,78 W/(m K); 0,038 W/(m K); 0,7 W/(m K);
- ciepło właściwe (przy stałym ciśnieniu) kolejnych warstw przegrody (od zewnątrz do wewnątrz): 840 J/(kg K); 800 J/(kg K); 840 J/(kg K);
- gęstość kolejnych warstw (od zewnątrz do wewnątrz): 1600 kg/m³; 38 kg/m³; 1600 kg/m³;
- emisyjność zewnętrznej powierzchni przegrody – cegły: dla promieniowania słonecznego: 0,55; dla promieniowania cieplnego: 0,92;
- emisyjność powierzchni przegrody od wewnątrz – biała tapeta: dla promieniowania cieplnego - 0,5;

system wentylacyjny z rekuperacją:

- efektywność odzysku ciepła – 80%;
- liczba wymian powietrza – 1 1/godz.;
- objętość dowolnego modelowego pomieszczenia 40 m³ (4 x 2,5 x 4 m³);
- parametry powietrza:

temperatura w pomieszczeniu: 20°C ;
gęstość powietrza – $1,2 \text{ kg/m}^3$;
ciepło właściwe – 1005 J/(kg K) .

Do obliczeń w zależności od elementu obudowy budynku przyjęto różny krok czasowy i krok przestrzenny:

dla okna:

- krok czasowy dla:
 - ramy, centralnej części przeszklenia i obrzeża, $\Delta t=0,5 \text{ s}$;
- krok przestrzenny:
 - dla ramy $\Delta s = \Delta y = \Delta z = 0,001 \text{ m}$,
 - dla centralnej części przeszklenia $\Delta z = 0,002 \text{ m}$;
 - dla obrzeża przeszklenia $\Delta z = 0,002 \text{ m}$; $\Delta s = \Delta y = 0,001 \text{ m}$;

dla przegrody nieprzezroczystej:

- krok czasowy: $\Delta t=60 \text{ s}$;
- krok przestrzenny: $\Delta z=0,020 \text{ m}$.

Ponadto do obliczeń wykorzystano następujące dane:

- średnia temperatura powietrza zewnętrznego w kolejnych miesiącach dla Warszawy:
[$-3,5$; $-2,6$; $1,2$; $7,8$; $13,8$; $17,3$; $19,1$; $18,2$; $13,9$; $8,1$; $3,0$; $-0,6$] ($^{\circ}\text{C}$);
- średnia amplituda temperatury powietrza atmosferycznego:
 7 ($^{\circ}\text{C}$);
- numer typowego dnia kolejnych miesięcy roku:
[17 , 47 , 75 , 105 , 135 , 162 , 198 , 228 , 258 , 288 , 318 , 344];
- średni miesięczny indeks przejrzystości atmosfery dla Warszawy:
[$0,25$; $0,26$; $0,39$; $0,39$; $0,43$; $0,47$; $0,46$; $0,49$; $0,42$; $0,33$; $0,24$; $0,21$].

Dodatek 4.**Bilans energetyczny pomieszczeń w postaci stabelaryzowanej**

Wybrane wyniki przeprowadzonych obliczeń w odniesieniu do bilansu energetycznego rozważanych pomieszczeń są przedstawione w tabelach w tym dodatku.

W kolumnach tabel dla poszczególnych miesięcy roku dla rozważanych wybranych pomieszczeń zostały wyszczególnione wartości energii Q (MJ) odpowiadające kolejno w poszczególnych wierszach następującym:

- całkowite zapotrzebowanie $Q_{h/c}$ na ciepło (wartości ujemne – straty ciepła) i na chłód (wartości dodatnie – zyski ciepła);
- zapotrzebowanie na ciepło/chłód $Q_{wen,r}$ do celów wentylacyjnych (z uwzględnieniem rekuperacji);
- całkowite Q_w straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez przegrody nieprzezroczyste w odniesieniu do ich całkowitej powierzchni;
- całkowite Q_{ok} straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez okno jako całość w odniesieniu do jego całkowitej powierzchni;
- całkowite Q_{cg} straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez centralną część przeszklenia okna w odniesieniu do jego całkowitej powierzchni;
- całkowite Q_{ed} straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez obrzeże przeszklenia okna w odniesieniu do jego całkowitej powierzchni;
- całkowite Q_{gl} straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez przeszklenie okna, jako całość, w odniesieniu do jego całkowitej powierzchni;
- całkowite Q_r straty ciepła (wartości ujemne) lub zyski energii (wartości dodatnie) przez ramę okna w odniesieniu do jej całkowitej powierzchni.

Tabela 1. Beta=90, Gamma=0, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-368,45	-253,42	-171,28	-19,83	101,86	146,87	185,02	183,45	83,45	-63,00	-231,34	-342,39
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-95,85	-78,28	-68,93	-34,77	-6,48	5,49	13,33	11,12	-7,90	-39,13	-66,17	-85,89
-103,92	-28,62	32,60	99,69	152,84	160,14	178,15	185,25	133,73	61,56	-47,08	-108,64
-61,94	-7,01	38,34	83,64	119,95	123,25	135,84	141,82	105,48	54,96	-23,85	-67,63
-24,89	-7,08	7,41	23,41	36,09	37,87	42,15	43,81	31,55	14,38	-11,36	-25,95
-86,83	-14,09	45,75	107,05	156,04	161,12	177,99	185,63	137,02	69,34	-35,21	-93,58
-17,09	-14,54	-13,15	-7,36	-3,20	-0,98	0,16	-0,38	-3,30	-7,78	-11,87	-15,06

Tabela 2. Beta=90, Gamma= -90, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-406,42	-329,27	-255,72	-71,16	77,69	147,75	169,61	122,36	-1,73	-153,18	-273,45	-360,39
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-98,81	-84,17	-75,47	-40,14	-9,52	5,75	11,49	3,34	-19,07	-48,65	-69,44	-87,29
-138,92	-98,57	-45,31	53,72	131,72	160,75	164,58	131,94	59,71	-19,11	-85,92	-125,24
-88,54	-60,14	-20,79	48,95	104,14	123,94	125,80	101,70	49,43	-6,18	-53,36	-80,24
-33,14	-23,57	-10,97	12,55	31,07	37,97	38,90	31,18	14,07	-4,64	-20,52	-29,86
-121,68	-83,71	-31,76	61,50	135,20	161,91	164,70	132,88	63,50	-10,82	-73,88	-110,10
-17,25	-14,86	-13,55	-7,78	-3,49	-1,16	-0,12	-0,94	-3,79	-8,29	-12,04	-15,14

Tabela 3. Beta=90, Gamma= 90, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-395,68	-307,57	-229,94	-53,56	105,95	177,34	214,18	177,76	20,71	-141,32	-269,58	-356,97
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-97,97	-82,49	-73,48	-38,31	-5,92	9,48	17,12	10,40	-16,16	-47,41	-69,14	-87,02
-129,01	-78,55	-21,51	69,50	156,38	186,61	203,52	180,28	79,24	-8,49	-82,34	-122,08
-81,02	-44,95	-2,73	60,91	122,85	143,53	155,28	138,31	64,28	1,85	-50,65	-77,84
-30,80	-18,85	-5,36	16,27	36,89	44,08	48,09	42,60	18,68	-2,13	-19,67	-29,12
-111,82	-63,79	-8,08	77,18	159,74	187,61	203,37	180,91	82,96	-0,28	-70,32	-106,96
-17,20	-14,75	-13,42	-7,68	-3,36	-1,00	0,14	-0,63	-3,72	-8,21	-12,02	-15,12

Tabela 4. Beta=90, Gamma= 180, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-411,01	-341,39	-287,39	-131,99	2,40	84,26	109,63	59,06	-50,16	-180,67	-282,10	-363,25
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-99,17	-85,12	-77,93	-46,57	-19,49	-2,59	3,62	-4,97	-25,49	-51,56	-70,11	-87,51
-143,16	-109,75	-74,51	-0,67	66,40	105,61	112,48	76,95	17,70	-43,70	-93,89	-127,88
-91,75	-68,61	-42,94	7,75	54,64	82,11	86,27	60,09	17,71	-24,78	-59,40	-82,24
-34,14	-26,21	-17,86	-0,28	15,66	24,97	26,62	18,20	4,15	-10,44	-22,40	-30,49
-125,88	-94,82	-60,80	7,47	70,31	107,08	112,88	78,29	21,86	-35,22	-81,80	-112,73
-17,28	-14,93	-13,71	-8,14	-3,90	-1,47	-0,41	-1,34	-4,16	-8,47	-12,09	-15,15

Tabela 5. Beta=90, Gamma=0, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-637,41	-276,77	8,90	360,68	642,61	701,58	795,66	821,12	558,98	188,55	-331,92	-638,09
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-63,90	-52,19	-45,96	-23,18	-4,32	3,66	8,89	7,42	-5,27	-26,09	-44,12	-57,26
-404,82	-78,06	189,80	468,61	691,44	716,68	793,23	826,62	606,62	300,06	-169,71	-432,97
-318,58	-37,07	195,14	427,33	613,84	631,19	695,95	726,46	539,69	280,29	-123,41	-347,73
-51,26	-11,23	21,57	56,37	84,15	87,50	96,94	100,94	73,69	35,72	-22,00	-54,41
-369,84	-48,30	216,71	483,70	697,99	718,69	792,89	827,41	613,38	316,01	-145,41	-402,13
-34,98	-29,76	-26,91	-15,08	-6,55	-2,01	0,33	-0,78	-6,76	-15,95	-24,30	-30,83

Tabela 6. Beta=90, Gamma= -90, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-794,82	-591,30	-341,32	153,50	547,45	705,23	734,99	580,29	223,22	175,76	-506,60	-712,74
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-65,87	-56,12	-50,31	-26,76	-6,35	3,84	7,66	2,23	-12,71	-32,43	-46,29	-58,19
-560,26	-388,66	-156,06	265,01	598,30	720,15	733,79	590,99	278,30	-57,91	-342,21	-506,68
-454,80	-309,23	-107,83	249,44	532,78	634,76	644,48	520,83	252,40	-33,10	-274,60	-412,33
-70,16	-49,00	-20,50	31,51	72,67	87,77	89,55	72,09	33,68	-7,83	-42,97	-63,37
-524,95	-358,23	-128,33	280,95	605,46	722,53	734,03	592,91	286,08	-40,92	-317,56	-475,69
-35,31	-30,43	-27,73	-15,94	-7,15	-2,38	-0,24	-1,93	-7,78	-16,98	-24,65	-30,99

Tabela 7. Beta=90, Gamma=90, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-750,29	-501,31	-234,31	224,84	659,35	822,38	911,36	799,36	311,99	-127,81	-490,54	-698,56
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-65,32	-55,00	-48,99	-25,54	-3,95	6,32	11,42	6,93	-10,77	-31,61	-46,10	-58,02
-516,29	-299,79	-50,38	335,13	707,80	834,82	906,41	805,35	365,14	-10,78	-326,35	-492,68
-416,29	-231,41	-15,26	310,82	628,71	735,13	795,55	708,45	328,52	8,12	-260,71	-400,07
-64,80	-38,18	-7,64	40,04	85,99	101,72	110,57	98,18	44,25	-2,09	-41,04	-61,66
-481,09	-269,59	-22,90	350,86	714,70	836,86	906,11	806,63	372,77	6,03	-301,75	-461,73
-35,20	-30,20	-27,48	-15,73	-6,90	-2,04	0,30	-1,28	-7,63	-16,82	-24,61	-30,95

Tabela 8. Beta=90, Gamma=180, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-813,84	-641,50	-472,52	-91,99	250,97	454,83	498,40	330,92	32,88	-286,64	-542,42	-724,61
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-66,11	-56,75	-51,95	-31,04	-13,00	-1,73	2,41	-3,31	-16,99	-34,37	-46,74	-58,34
-579,04	-438,23	-285,62	23,81	308,47	475,32	502,45	347,16	92,24	-166,85	-377,59	-518,40
-471,23	-352,62	-221,27	38,35	279,07	420,33	441,86	307,54	89,79	-128,38	-305,56	-422,59
-72,44	-55,04	-36,28	2,14	37,41	58,00	61,42	42,37	10,99	-21,11	-47,28	-64,79
-543,68	-407,66	-257,55	40,49	316,48	478,33	503,28	349,91	100,77	-149,49	-352,84	-487,38
-35,37	-30,57	-28,07	-16,68	-8,01	-3,02	-0,83	-2,75	-8,53	-17,36	-24,75	-31,02

Tabela 9. Beta=45, Gamma= 0, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-376,52	-257,21	-150,10	45,92	223,34	272,43	309,01	280,22	121,42	-60,95	-236,59	-348,70
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-99,02	-80,70	-70,30	-30,77	7,69	19,74	27,41	21,03	-6,45	-42,70	-69,36	-89,09
-108,81	-29,99	55,15	161,43	260,16	271,45	288,06	272,12	170,24	67,17	-49,14	-111,74
-65,09	-7,57	55,97	131,04	201,88	208,16	219,71	208,37	133,73	59,60	-25,05	-69,50
-26,08	-7,43	12,70	37,96	61,42	64,16	68,10	64,31	40,18	15,72	-11,86	-26,71
-91,17	-14,99	68,68	169,00	263,31	272,31	287,81	272,68	173,91	75,32	-36,91	-96,21
-17,65	-15,00	-13,53	-7,57	-3,15	-0,86	0,25	-0,57	-3,67	-8,14	-12,23	-15,53

Tabela 10. Beta=45, Gamma= -90, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-411,36	-324,31	-233,71	-23,99	155,51	229,02	248,15	182,41	29,31	-141,40	-272,53	-365,14
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-101,87	-86,19	-77,14	-38,92	-2,54	13,25	18,30	6,29	-20,50	-52,06	-72,30	-90,44
-140,80	-91,60	-21,62	99,68	202,55	234,53	236,31	189,03	92,18	-3,92	-82,14	-126,84
-89,39	-54,37	-2,35	84,12	158,25	180,24	180,52	145,37	74,39	5,67	-50,13	-80,97
-33,62	-21,95	-5,40	23,42	47,83	55,43	55,88	44,71	21,78	-1,03	-19,64	-30,27
-123,01	-76,32	-7,75	107,53	206,08	235,67	236,40	190,08	96,18	4,64	-69,77	-111,24
-17,79	-15,28	-13,88	-7,86	-3,53	-1,14	-0,09	-1,04	-4,00	-8,56	-12,38	-15,60

Tabela 11. Beta=45, Gamma= 90, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-400,14	-301,45	-205,97	-5,31	185,51	258,92	297,15	243,37	53,26	-128,93	-268,39	-361,53
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-100,96	-84,32	-74,87	-36,72	1,96	17,70	25,61	15,43	-16,86	-50,60	-71,96	-90,14
-130,50	-70,61	3,85	116,16	228,05	259,98	278,01	240,86	112,49	7,09	-78,34	-123,52
-81,58	-38,44	16,98	96,65	177,59	199,50	212,11	184,64	89,82	14,01	-47,24	-78,46
-31,19	-17,00	0,61	27,30	53,85	61,44	65,73	56,94	26,58	1,56	-18,74	-29,49
-112,76	-55,44	17,59	123,94	231,43	260,94	277,83	241,58	116,40	15,57	-65,98	-107,94
-17,74	-15,16	-13,74	-7,78	-3,39	-0,96	0,18	-0,72	-3,91	-8,48	-12,36	-15,58

Tabela 12. Beta=45, Gamma= 180, okno 1 x 1 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-419,41	-346,80	-289,78	-113,44	78,03	177,58	195,83	99,95	-58,38	-186,77	-286,11	-369,73
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-102,53	-88,02	-81,71	-49,35	-14,43	5,37	10,28	-6,33	-33,86	-57,31	-73,40	-90,81
-148,20	-112,26	-73,12	20,66	136,96	190,97	192,01	119,21	17,86	-44,04	-94,61	-131,05
-94,98	-70,01	-41,40	23,99	108,14	146,89	146,60	92,04	18,20	-24,66	-59,56	-84,16
-35,37	-26,83	-17,55	4,82	32,42	45,21	45,49	28,30	4,23	-10,51	-22,59	-31,27
-130,35	-96,84	-58,95	28,80	140,56	192,10	192,09	120,34	22,44	-35,17	-82,15	-115,42
-17,85	-15,42	-14,17	-8,14	-3,60	-1,12	-0,08	-1,13	-4,58	-8,87	-12,46	-15,63

Tabela 13. Beta=45, Gamma= 0, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-680,68	-300,55	94,32	631,18	1125,50	1203,60	1292,00	1212,50	719,12	203,53	-356,41	-671,12
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-66,02	-53,80	-46,87	-20,51	5,13	13,16	18,28	14,02	-4,30	-28,46	-46,24	-59,39
-445,97	-100,23	276,14	736,44	1164,90	1209,20	1280,20	1211,40	765,79	317,41	-192,08	-463,86
-352,39	-54,58	272,69	663,41	1029,70	1063,50	1123,40	1064,80	680,34	296,67	-141,49	-372,84
-56,49	-14,11	31,91	88,89	141,81	147,53	156,29	147,78	93,10	37,85	-24,86	-58,37
-408,88	-68,69	304,60	752,29	1171,50	1211,10	1279,70	1212,60	773,45	334,52	-166,35	-431,21
-37,10	-31,54	-28,46	-15,85	-6,58	-1,81	0,50	-1,20	-7,66	-17,10	-25,73	-32,65

Tabela 14. Beta=45, Gamma= -90, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-824,99	-578,53	-252,10	350,98	863,42	1035,90	1056,70	834,04	362,83	-119,15	-505,35	-739,24
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-67,92	-57,46	-51,43	-25,94	-1,69	8,83	12,20	4,19	-13,66	-34,71	-48,20	-60,29
-588,38	-374,55	-65,72	461,67	909,62	1045,90	1050,90	842,77	418,87	0,97	-339,06	-531,08
-477,18	-294,96	-26,89	422,69	806,25	920,65	922,75	742,00	376,24	19,61	-270,30	-431,75
-73,80	-47,46	-9,65	55,50	110,72	127,61	128,37	102,95	50,99	-0,62	-42,72	-66,54
-550,98	-342,43	-36,54	478,19	916,97	1048,30	1051,10	844,96	427,22	18,99	-313,03	-498,29
-37,41	-32,12	-29,19	-16,52	-7,35	-2,39	-0,21	-2,19	-8,36	-18,02	-26,03	-32,79

Tabela 15. Beta=45, Gamma= 90, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-778,55	-483,88	-137,20	425,67	979,08	1151,30	1246,10	1069,70	455,10	-69,17	-488,19	-724,29
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-67,31	-56,21	-49,91	-24,48	1,31	11,80	17,07	10,28	-11,24	-33,74	-47,97	-60,09
-542,56	-281,14	47,66	534,90	1022,30	1158,30	1235,50	1072,30	508,71	49,99	-322,12	-516,33
-437,05	-213,17	72,42	486,81	904,93	1019,00	1084,30	942,97	454,97	62,46	-255,47	-418,83
-68,22	-36,10	4,14	64,40	124,43	141,31	150,84	130,89	61,92	5,35	-40,66	-64,74
-505,28	-249,26	76,56	551,21	1029,40	1160,30	1235,20	1073,90	516,89	67,81	-296,13	-483,58
-37,29	-31,88	-28,90	-16,32	-7,09	-2,04	0,34	-1,52	-8,18	-17,82	-25,99	-32,76

Tabela 16. Beta=45, Gamma= 180, okno 2 x 2 (m²)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-858,28	-671,58	-484,23	-8,29	562,90	836,23	853,54	514,28	23,92	-300,89	-561,50	-758,20
-168,69	-146,52	-134,95	-84,75	-44,50	-18,76	-6,46	-12,92	-42,38	-85,42	-118,09	-147,87
-68,35	-58,68	-54,48	-32,90	-9,62	3,58	6,85	-4,22	-22,57	-38,20	-48,94	-60,54
-621,24	-466,38	-294,81	109,36	617,02	851,40	853,15	531,42	88,87	-177,27	-394,47	-549,79
-505,90	-375,31	-227,45	113,71	549,19	749,61	748,81	468,49	87,73	-136,24	-318,78	-448,11
-77,81	-58,66	-37,55	12,78	75,37	104,16	104,52	65,32	10,75	-22,36	-49,48	-68,82
-583,71	-433,97	-265,00	126,49	624,56	853,77	853,33	533,81	98,48	-158,60	-368,26	-516,93
-37,52	-32,41	-29,81	-17,14	-7,53	-2,36	-0,19	-2,39	-9,61	-18,67	-26,21	-32,86

Summary

Solar energy availability and its natural thermal conversion in a building envelope is a subject of this dissertation. Solar radiation incidents on transparent and opaque elements of a building envelope and is transmitted through these elements into rooms, due to different heat and mass transfer, and optical phenomena, and can influence in a different way on energy balance of a building and in a consequence on its thermal comfort. The importance of knowledge of solar energy availability and its influence on energy balance of a building is crucial for building design and construction. In high latitude countries, like Poland, focus only on winter heating season can lead to overheating of rooms in summer. The main aim of the study is to evaluate mathematical model of solar radiation availability and thermal conversion of solar energy in a building envelope in changing conditions in time and to analyse it in details.

Nowadays, when a building envelope is designed and constructed according to energy savings measures, with high quality thermal insulation and building materials, the heat transfer through the opaque external walls takes the minor part in the total energy transport between the outdoor and indoor environment. An important element of the energy balance of a building is the heat needed for ventilation, even if recuperation of waste heat (from ventilation) is accomplished. However, the most important elements of the energy balance of a building are windows. Windows become the neuralgic energy element of the building envelope. The role of windows in the energy balance of a building increases with their size because of their relatively quick response to changing conditions of outdoor environment, i.e. ambient temperature and solar radiation. In middle and high latitude countries a lot has been already done for improving the opaque building envelope, but still not so much for windows.

For a purpose of the good building design it is necessary to calculate solar radiation availability on surfaces with different inclination and orientation. The calculations of solar radiation incident on surfaces with different azimuth and inclination angles have been performed using the averaged representative hourly solar radiation data for two models of solar radiation: the isotropic diffuse sky model, Hottel - Woertz - Liu - Jordan model, and the anisotropic sky model, e.g. HDKR, Hay - Davies - Klucher - Reindl. Results of comparative analysis have shown the distinction between two models and indicated the importance of the anisotropic model for its application in evaluation of energy balance of a building and design of a building. The results of calculations give indications for shaping of a building envelope and planning its surrounding.

To describe and solve problem of dynamics of processes in a building envelope and surrounding the mathematical model of energy transfer phenomena in opaque and transparent elements has been developed. Focus has been put on influence of solar energy and because of that special attention has been given to energy transfer through windows. The heat transfer through the external opaque walls has been treated less detailed.

In order to determine the effect of window and frame construction, size and orientation on a building's annual energy consumption for both heating and cooling, computational models have been developed. These models have taken into account the variations of ambient temperature, the direct and diffuse solar radiation, the thermal and optical properties of construction materials as well as actual component dimensions and orientation. In order to reduce the number of variables to a level that allows different design options to be compared in a meaningful way it has been useful to make some simplification. The first has been to

propose a 'representative averaged' ambient temperature and solar radiation regime (taken as that of Warsaw), together with a fixed room size and room temperature requirement. This means that the changes to annual energy use that are influenced by the changes in window size, orientation and inclination may be compared easily. The other simplification has been done in the modeling of energy transfer outside and inside the window and wall, as well as within the cavity formed by the glass sheets. A special quasi three dimensional heat transfer model of the window edges and frame, a simplified one dimensional model of the central part of glazing and one dimensional model of the opaque wall have been developed. They have included unsteady heat conduction in the window edges, window frame and walls, and fully detailed equations to describe the radiation exchange between the ground, the sky and window, solar radiation absorption, transmission or reflection on all surfaces, and the effects of orientation and inclination on them. The developed model allows many cases to be evaluated in a given time and allows broad conclusions to be drawn. For simulation of developed mathematical model the Matlab program has been used. The ambient temperature and solar radiation data for Warsaw have been built in to it. It is possible to change the wall construction materials (their parameters) and thicknesses together with window glass and frame sizes and properties as well as the inclination and orientation (slope and azimuth angles). Because of assumed and elaborated solar radiation representative model, 12 averaged days (one for each month) are simulated (with different time steps for different elements of building envelope), each day being repeated enough times to ensure a steady solution. Conduction within solids and radiative heat transfer with surrounding are based on the fundamental equations. Convection is dealt with using the approximated correlations for the various situations: internal, external, enclosed and for different slopes. The results of considered cases for a full year are presented in a range of graphical forms showing how the energy demand changes by month, by hour in the day and by contributory factor as required. Results of energy demand changes, for different window sizes, orientations and inclinations show the influence of solar energy on energy balance of considered room cases.

In result of simulation studies it has turned out that overheating in summer due to high insolation level could be a real problem for some buildings' shapes and constructions. To avoid the overheating in such buildings it would be necessary to introduce air-conditioning systems. If nothing is done for improvement of windows and there role in building design, especially to windows and rooms at attics, the residential and tertiary sectors are expected to give the real fast growing market for implementation of HVAC systems in the country. The problem is that in Poland during the designing process of residential buildings and most of tertiary sector the analysis of the heat needs is restricted only to winter heating season. The reduction of heat losses during the winter has become a priority. The care on heat gains during summer is not common. It can turn out very quickly, that the costs of energy delivered to the building for air conditioning, because of unacceptable summer comfort, could be higher than costs of energy supplied for space heating. The standard limits only for seasonal space heat consumption are not enough for effective annual energy conservation in buildings. The standard energy consumption indexes for space cooling (air-conditioning) should be also introduced as soon as possible.

Bibliografia

1. Aitken D.W.: *Frank Lloyd Wright's "Solar Hemicycle" revisited: measured performance following thermal upgrading*, The 17th National Passive Solar Conference, Vol. 17, 1992, 52–57
2. Akbari H., Pomerantz M., Taha H.: *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*, Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 2001, 295–310
3. Anderson B.: *Solar Energy: Fundamentals in Building Design*, Total Environmental Action, Inc., Harrisville, New Hampshire, 1975
4. Anderson E. E.: *Fundamentals of solar energy conversion*, Addison-Vesley Publ. Co., Reading, MA, 1982
5. Andre Ph., Nicolas J., Rivez J.F., Debbaut V.: *Analysis methodology, experimental investigation, and computer optimization of a passive solar commercial building in the Belgian climate*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 9–25
6. Anink D., Boonstra Ch., Mak J.: *Handbook of Sustainable Building*, James & James Ltd, London, 1998
7. Arasteh D.: *An Analysis of Edge Heat Transfer in Residential Windows*, Proceedings of ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV, Orlando, FL, 1989, 376–387
8. Arnold J.N., Bonaparte P.N., Catton I., Edwards D.K.: *Experimental Investigation of Natural Convection in a Finite Rectangular Region Inclined at Various Angles from 0 to 180 °*, Proceedings of the 1974 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Corvallis, OR, Stanford University Press, Stanford, CA, 1974
9. Asan H., Sancaktar Y.S.: *Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor*, Energy and Buildings, Vol. 28, No. 2, 1998, 159–166
10. Ashley R., Reynolds J.S.: *Overall and zonal energy end use in an energy conscious office building*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 75–83
11. ASHRAE: *Handbook of Fundamentals*, Chapter: *Solar Heat Gain Factors*, 1967
12. ASHRAE: *Standard method for determining and expressing the heat transfer and total optical properties of fenestration products*, BSR/ASHRAE Standard 142P (Public Review Draft), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, Georgia, 1996
13. ASHRAE: *Fundamentals, Handbook*, Chapter *Fenestration*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, SI Edition, Atlanta, 1997
14. ASTM 1991. *Standard procedures for determining the steady state thermal transmittance of fenestration systems*, ASTM Standard E 1423-91. In 1994

- Annual Book of ASTM Standards 04.07. American Society of Testing and Materials, 1160-1165
15. *Atlas klimatyczny Polski*. Część tabelaryczna. Zeszyty. PIHM, 1970
 16. Awbi H.B.: *Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection*, Energy and Buildings, Vol. 28, No. 2, 1998, 219 – 227
 17. Bac S., Rojek N. *Meteorologia i Klimatologia*, PWN, Warszawa 1979
 18. Badyda K.: *Współczesne technologie chłodnicze a wykorzystanie energii słonecznej*, Polska Energetyka Słoneczna nr 2/2005, 21 – 26
 19. Balcomb J.D., Hedstrom J.C., McFarland R.D.: *Simulation analysis of passive solar heated buildings-preliminary results*, Solar Energy, Vol. 18, No. 3, 1977, 277 – 282
 20. Balcomb J.D. (ed.): *Passive Solar Buildings*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992
 21. Bannister P.: *The Australian Greenhouse Rating Scheme: Performance Rating Commercial Buildings*, ISES 2001 Solar World Congress
 22. Benford F., Back J.E.: *A time analysis of Sunshine*. Trans. of American Illumination Engineering Society, 34, 1939, 200
 23. Bhargava A., Baccei B., Hammon R., Mrohs M.: *Solar orientation impacts on production home communities*, 2005 Solar World Congress Proceedings, The American Solar Energy Society
 24. Bibrowski Z.: *Energochłonność skumulowana*, IPPT PAN, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983
 25. Bilgen E.: *Experimental study of thermal performance of automated venetian blind window systems*, Solar Energy Vol. 52, No. 1, 1994, 3 – 7
 26. Bloem J.J.: *System Identification applied to building performance data*, Joint Research Centre European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1994
 27. Bloem J.J.: *System Identification competition*, Joint Research Centre European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1996
 28. Bogdańska B.: *Multiyears changes in global solar radiation in Poland*. Materiały Międzynar. Sympozjum „Monitoring of Solar Radiation and Total Atmospheric Ozone”, Poprad, 1997
 29. Bogdańska B.: *Sieć pomiarów promieniowania słonecznego w Polsce*. Materiały Sympozjum Pam. Prof. Gorczyńskiego UMK, 1999
 30. Bogdańska B. Podogrodzki J.: *Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995*. Materiały Badawcze IMGW, seria: Meteorologia, z. 30, Warszawa, 2000
 31. Bogdańska B., Podogrocki J.: *Tendencje zmian całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995* (grant wewn. IMGW)
 32. Boubekri M., Boyer L.L.: *Thermal loads, discomfort glare and emotions: A multifold problem for designing windows fully exposed to sunlight*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 125–130

33. Böer K.W. (ed.): *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society and its National Sections*, Vol. 1, 2, American Solar Energy Society Inc., Boulder, Colorado 2005
34. Brandemuehl M.J., Beckman W.A.: *Transmission of Diffuse Radiation Through CPC and Flat-Plate Collector Glazings*, Solar Energy, Vol. 24, 1980, 511
35. Braun J.E., Mitchel: *Solar geometry for Fixed and Tracking Surfaces*, Solar Energy, Vol. 31, 1983, 439
36. Budyłowski J.: *Model matematyczny promieniowania słonecznego dla potrzeb heliotechniki*. Archiwum Termodynamiki, Vol. 5, No. 1, 1984
37. Burmeister H., Kelner B.: *Climate surfaces: a quantitative building-specific representation of climates*, Energy and Buildings, Vol. 28, No. 2, 1998, 167–177
38. Bzowska D., Laskowski L., Mioduszevska - Wysocka M., Owczarek S.: *Wpływ środowiska fizycznego otaczającego budynek na rozwiązania materiałowe, konstrukcyjne i przestrzenne*, Prace IPPT 28/1990, Warszawa
39. Bzowska D., Kossecka E.: *Analiza probabilistyczna dobowych danych pogodowych dla Warszawy*. Prace IPPT, 10/1992
40. Bzowska D., Kossecka E.: *Analiza promieniowania słonecznego w Warszawie w aspekcie energetyki słonecznej*, Prace IPPT 4/1993, Warszawa
41. Charron R., Athienitis A.: *An international review of low and zero energy home initiatives*, 2005 Solar World Congress Proceedings, the American Solar Energy Society
42. Cheung C.K., Fuller R.J., Luther M.B.: *Energy-efficient envelope design for high-rise apartments*, Energy and Buildings Vol. 37, No. 1, 2005, 37–48
43. Chochowski A., Wieczorek J.: *Próba deterministycznego opisu napromienienia słonecznego powierzchni pochylej*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 1/1998
44. Chochowski A., Czekalski D.: *Słoneczne instalacje grzewcze*. Wyd. COIB, Warszawa, 1999
45. Chochowski A., Czekalski D., Obstawski P.: *Pomiary pyranometryczne na stanowisku SGGW-Ursynów*, Polska Energetyka Słoneczna nr 2/2005, 15–19
46. Chwieduk D.: *Współpraca systemu słonecznego z pompą ciepła w układzie szeregowym. Uproszczona metoda rozwiązywania równania bilansowego*, Archiwum Termodynamiki, Vol. 8, No. 3, 1987
47. Chwieduk D.: *An analysis of vertical ground heat exchangers coupled with a heat pump for a family house heating in Polish climatic conditions. Numerical simulation*, Archiwum Termodynamiki, 1993
48. Chwieduk D.: *Słoneczne i gruntowe systemy grzewcze. Zagadnienia symulacji funkcjonowania i wydajności cieplnej*, Studia z zakresu inżynierii, Nr 37, Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN, Warszawa, 1994
49. Chwieduk D.: *Analysis of utilisation of renewable energies as heat sources for heat pumps in building sector*, Renewable Energy, International Journal: 1-4/SEP-DEC/ 1996, Pergamon, Elsevier Sciences, Oxford

50. Chwieduk D.: *Utilisation of Solar Energy*. Opto-electronics Review, Journal of the Association of Polish Electrical Engineers, COSiW SEP, Warsaw, Vol. 5, No. 2, 1997, 147–153
51. Chwieduk D.: *Kierunki rozwoju budownictwa niskoenergetycznego*, IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię” ENERGODOM’98. Kraków-Mogilany, 14-17 października 1998, 75–90, Wyd. Politechnika Krakowska
52. Chwieduk D.: *Wykorzystanie map słońca do określania zacienienia budynków przez środowisko zewnętrzne*, VIII Konferencja Fizyki Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 2001, 39 – 51
53. Chwieduk D.: *Zacienianie budynków. Wykorzystanie diagramów drogi Słońca przy określeniu zacienienia*, Polska Energetyka Słoneczna nr 2-4/2004, 18 –22
54. Chwieduk, D.: *Towards Sustainable Energy Buildings*, Applied Energy 76, International Journal, 2003, 211 -217
55. Chwieduk D.: *Solar energy utilization*, Opto-electronics Review 12 (1), 2004, 13-20
56. Chwieduk D., Bogdańska B.: *Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions*, Renewable Energy Journal 29, 2004, 1569 - 1581
57. Chwieduk D., Jaworski M., Jędrzejuk H., inni: *Budynki i ich elementy przystosowane do uzysku i akumulacji energii cieplnej ze źródeł odnawialnych promieniowania słonecznego i ciepła powierzchniowych warstw gruntu*, Prace IPPT, 27/1990, Warszawa
58. Chwieduk D., Pluta Z., Wnuk R. *Wybrane aspekty wykorzystania energii promieniowania słonecznego w projektowaniu*. COIB. 1994 Warszawa.
59. Cieśliński J., Mikielwicz J.: *Niekonwencjonalne źródła energii*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996
60. *Clean energy Project analysis: RETScreen® Engineering & Cases Textbook, Solar water heating project analysis*, Minister of Natural Resources Canada, 2001–2004
61. Collins R.E., Simko T.M.: *Current status of the science and technology of vacuum glazing*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 189–213
62. Cooper P. I. *The absorption of solar radiation in solar stills*. Solar Energy, Vol. 12, No. 3, 1969
63. Cooper P.I.: *The effect of inclination on the heat transfer loss from flat - plate solar collectors*, Solar Energy, Vol. 27, No. 5, 1981, 413-420
64. Coulson K. *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press Inc. New York, 1975
65. Crosbie M.J.: *The Passive Solar. Design and Construction Handbook*. Steven Winter Associates. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1998
66. Croft D.R., Stone J.A.R.: *Heat transfer calculations using finite difference equations*, Applied Science Publishers Ltd, 1977

67. Curcija D., Goss W.P.: *New Correlations for Convective Heat Transfer Coefficient on Indoor Fenestration Surfaces—Compilation of More Recent Work*, ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI, Clearwater, FL, 1995
68. Dalenbäck J-O: *Solar heating with seasonal storage. Some Aspects of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage*, School of Civil Engineering, Chalmers University of Technology, praca doktorska, Göteborg, 1993
69. DeKay M.: *Capabilities of computerized tools for passive cooling and a case study comparison between three methods for analyzing the performance of night ventilated thermal mass*, The 17th National Passive Solar Conference ,vol. 17 (1992), 162–167
70. Depecker P., et. al.: *Design of Buildings Shape and Energetic Consumption*, Building and Environment, Vol. 30, No. 2, 2001, 201-222
71. Domański R.: *Wymiana ciepła. Laboratorium dydaktyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996
72. Domański R., Jaworski M., Rebow M.: *Wymiana ciepła. Komputerowe wspomaganie obliczeń. Tablice właściwości termofizycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996
73. Domański R.: *Magazynowanie energii cieplnej*. PWN Warszawa, 1990
74. Duffie J.A., Beckman W.A., Klein S.A.: *Solar Heating Design by the F-Chart Method*, J. Wiley, Interscience Publication, 1978
75. Duffie J. A., Beckman W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991
76. Dyrektywa UE 2002/91/EC z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków
77. Dzieniszewski W.: *Stany termiczne ustrojów o wielokomórkowych strukturach w procesach przewodzenia ciepła*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 1994
78. Eames P. C., Zhao J. F., Wang J., Fang Y.: *Advanced glazing systems*, Polska Energetyka Słoneczna 1-2/2006, 27–30
79. ElSherbiny S.M., Raithby G.D., Hollands K.G.T.: *Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers*, Journal of Heat Transfer 104, 1982, 96–102
80. Esbensen T., Hendriksen O.J., Gramkow L.: *Solar Community in Kolding, Denmark*, ISES 2001 Solar World Congress, Adelaide
81. Esbensen T., Gramkow L.: *Integrated solar technologies*, Polska Energetyka Słoneczna 1-2/2006, 22–26
82. Estrada-Gasca C.A., Nair P.K., Alvarez-Garcia G.: *Heat gain in a window with a chemically deposited SnS-Cu_xS thin film*, The 17th National Passive Solar Conference Vol. 17, 1992, 25–29
83. Fang Y., Eames P. C., Norton B., Hyde T.J.: *Effect of glass thickness on the thermal performance of evacuated glazing*, World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004), 2004, Elsevier Ltd. Ed. AAM Sayigh

84. Feist W.: *The Passive Houses at Darmstadt/Germany*, Institute Housing and Environment, Darmstadt, 1995
85. Feuermann D., Novoplansky A.: *Reversible low solar heat gain windows for energy savings*, Solar Energy Vol. 62, No. 3, 1998, 169–175
86. Finayson E.U., Arasteh D.K., Huizenga C., Rubin M.D., Reilly M.S.: *Window 4.0: documentation of calculation procedures*, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, 1993
87. Furbo S., Shah L.J.: *Thermal Advantages for Solar Heating Systems with a Glass Cover with Antireflection Surfaces*, ISES 2001 Solar World Congress
88. Garrison J.D.: *Evaluation of a thermally insulating vacuum window*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 43–47
89. Gawin D., Kossecka E. (red.): *Komputerowa fizyka budowli. Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach*, Politechnika Łódzka, Łódź 2002
90. Gdula S.J. (red.), praca zbiorowa: *Przewodzenie ciepła*, Państwowe Wydawnictwo - Naukowe, Warszawa 1984
91. Georg A., Graf W., Schweiger D., Wittwer V., Nitz P., Wilson H.R.: *Switchable glazing with a large dynamic range in Total Solar Energy Transmittance (TSER)*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 215–228
92. Gilat A.: *Matlab[®] An Introduction With Applications*, John Wiley & Sons, Inc., USA 2004
93. Goetzberger A.: *Transparent insulation technology for solar energy conversion*, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg 1991
94. Gogół W.: *Wymiana ciepła. Tablice i wykresy*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976
95. Gogół W. (red.), praca zbiorowa. *Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych.: Ekspertyza Komitetu Termodynamiki i Spalania Polskiej Akademii Nauk*, Wydział IV Nauk Technicznych, XII 1993, Warszawa
96. Gogół W.: *Helioenergetyka*, Polska Energetyka Słoneczna nr 1/2003, 8–9
97. Gombert A., Glaubitt W., Rose K., Dreiholz J., Zanke C., Bläsi B., Heinzl A., Horbelt W., Sporn D., Döll W., Wittwer V., Luther J.: *Glazing with very high solar transmittance*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 177 – 188
98. Gordon J.: *Solar energy the state of the art.*, ISES position papers, UK 2001
99. Grabarczyk S.: *Fizyka Budowli Komputerowe wspomaganie budownictwa energooszczędnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
100. Granqvist C.G.: *Progress in electrochromics: tungsten oxide revisited*, Electrochim. Acta, 44, 1999, 3005–3015
101. Hassan M.A., Shaalan M.R., El-Shazly K.M: *Effects of window size and location and wind direction on thermal comfort with single-sided natural ventilation*, World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004). Copyright 2004. Published by Elsevier Ltd. Editor AAM Sayigh

102. Hay J.E, Davies J.A.: *Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface*, Proceedings First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 59, 1985, Ministry of Supply and Service Canada
103. Hildon A., Palmer J., Seager A., Brown J., Alexander D., Vaughan N., Jenkins H., O’Sullivan P.: *The energy performance assessment project and some early findings*, 1989, Second European Conference on Architecture, Paris, France, 419–422
104. Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 1986
105. Hollands K.G.T, Unny T.E, Raithby G.D., Koniczek L.: *Freez Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers*, Journal of Heat Transfer, Vol. 98, 1976, 189–193
106. Hollands K.G.T., Hum J.E., Wright J.L.: *Analytical Model for the Thermal Conductance of Double-Compound Honeycomb Transparent Insulation, with Validation*, ISES 2001 Solar World Congress
107. Holman J.P.: *Heat Transfer*, McGraw-Hill Higher Education 2002
108. Holzberlein T. M., *Don’t let the trees make a monkey of you*. Proc.4th national Passive Solar Conference, Kansas City, MO, Oct.3-5, 1979, 416
109. Hottel H.C., Whiller A.: *Evaluation of flat plate solar collector performance*, Trans. Conf. on Use of Solar Energy, II Arizona, 1955
110. Hottel H.C., Woertz B.B.: *Performance of flat plate solar collectors*. Trans. ASME 64/91, 1942
111. Hrastnik B.: *Sunsen Program korištenja energije sunca Prethodni rezultati i buduće aktivnosti*, Energetski insitut “Hrvoje Požar”, Zagreb, 1998
112. Humm O.: *NiedrigEnergie und PassiveHauser*, Okobuch Verlag, Staufen bei Freiburg 1998
113. Igawa N., Koga Y., Matsuzawa T., Nakamura H.: *Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution*, Solar Energy, 77, 2004, 137–157
114. Instalacje wewnętrzne w budynkach. Praca zbiorowa. Praktyczny poradnik. Tom 2. Część 10. Rozwiązania niekonwencjonalne. Wyd. WEKA sp. z o.o., 2000 Warszawa
115. ISO 15099, *Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations*, 2003
116. ISO 10077-1:2000(E), *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: Simplified method*, 2000
117. ISO 10077-2:2003(E), *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames*, 2003
118. ISO/DIS 10077-1 (Draft International Standard), *Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General*, 2004
119. Jaskólski K.: *Struktura promieniowania słonecznego w Polsce, jej zmiany w różnych miejscach kraju*, Raport Instytutu Energetyki Nr 6.1.01.01, PR-8, 1981

120. Jesch L.F.: *Transparent insulation technology*, ETSU – OPET For the Commission of the European Communities Directorate-General XVII for Energy, UK 1993
121. Jędrzejuk H., Laskowski L., Marks W., Mioduszevska-Wysocka M., Owczarek S., Zagórska E.: *Rozwój kierunków projektowania energooszczędnych budynków mieszkalnych*, Prace IPPT 2/1989, Warszawa
122. Jędrzejuk H.: *Optymalizacja osiedli mieszkaniowych*, Studia z Zakresu Inżynierii nr 37, Warszawa 2006
123. Jones R.W., Balcomb J.D., McFarland R.D., Wray W.O.: *Passive Solar Design Handbook*, Vol. 3: Passive Solar Design Analysis, DOE/CS-0127/3, Washington, DC: U.S. Department of Energy, 1982
124. Kaan H. F; de Boer B.J.: *Passive houses: achievable concepts for low CO₂ housing*, 2005 Solar World Congress Proceedings, the American Solar Energy Society
125. Kaiser H.: *Wykorzystanie energii słonecznej*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1995
126. Kalinowski E.: *Przekazywanie ciepła i wymienniki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995
127. Kapur N. K.: *A comparative analysis of the radiant effect of external sunshades on glass surface temperatures*, Solar Energy, 77, 2004, 407–419
128. Karlsson J.: *Windows – Optical Performance and Energy Efficiency*, Acta Universitatis Upsaliensis, Upsala 2001
129. Kavianig M.: *Principals of heat transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York 2002
130. Kaćki E.: *Termokinytyka*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966
131. Kim J-J: *Modeling of Reflected Solar Radiation from Adjacent Building Surface*, The 17th National Passive Solar Conference, Vol. 17, 1992, 14–18
132. Kisielewicz T.: *Efektywne wykorzystanie energii słonecznej w budynkach energooszczędnych*, Polska Energetyka Słoneczna nr 2/2005, 5–10
133. Klemm P. (red), praca zbiorowa: *Budownictwo ogólne*, tom 2, Arkady, Warszawa 2005
134. Klucher T.M.: *Evaluating Models to Predict Insulation on Tilted Surfaces*, Solar Energy, Vol. 23, 1979, 111
135. Kondratyew K. *Radiation in the atmosphere*. Academic Press, New York 1962
136. Kossecka E., Bzowska D.: *Estimation of solar radiation on inclined surfaces. The clearness indices method*, Archives of Civil Engineering, XL, 1, 1994
137. Kossecka E., Gawin D., Więckowska A., 2001, *Typowy Rok Meteorologiczny do symulacji procesów cieplno-wilgotnościowych w budynkach*, Mat. XLVII Konferencji Nauk

138. Kossecka E., Chochowski A., Czekalski D.: *Pomiary i analiza promieniowania na płaszczyznę nachyloną*, Polska Energetyka Słoneczna nr 1/2003, 10 – 13
139. Kotarska K., Kotarski Z.: *Ogrzewanie energią słoneczną: systemy pasywne*, Wyd. NOT-SIGMA, Warszawa, 1989
140. Kristl Ž., Krainer A.: *Energy evaluation of Urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method*, Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 2001, 23 – 34
141. Ladener H.: *Solaranlagen Planung, Bau & Selbstbau von Solarsystemen zur Warmwasserbereitung und Raumheizung*, Staufen bei Freiburg: ökobuch, 1994
142. Ladener H., Späte F.: *Solaranlagen Handbuch der termischen Solarenergienutzung*, Staufen bei Freiburg: ökobuch, 1999
143. Lam J., Li D.H.W.: *An analysis of daylighting and solar heat for cooling-dominated office buildings*, Solar Energy Vol. 65, No. 4, 1999, 251–262
144. Laskowski L.: *Systemy biernego ogrzewania słonecznego Zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*, Studia z zakresu inżynierii nr 34, Warszawa 1993
145. Laskowski L.: *Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
146. Lawrence Berkeley Laboratory, 1987, *Window 3.0 users guide*, Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA
147. Lawrence Berkeley Laboratory: *DOE-2, a computer program for building energy analysis*, BEGG, U.S. Department of Energy, Berkeley, California, 1979
148. Lee K.S.: *New graphic approach to solar radiation, solar azimuth and solar altitude angle*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 227–232
149. Lestrade J.P., Acock B., Trent T.: *The effect of cloud layer plane albedo on global and diffuse insulation*, Solar Energy, Vol. 44, No. 2, 1990, 115–121
150. Lewandowski W.M.: *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001
151. Lichołaj L.: *Analiza funkcjonowania pasywnych systemów ogrzewania słonecznego i prognozowanie ich efektywności energetycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000
152. Liddament M.W.: *A Guide to Energy Efficient Ventilation*, IEA Energy Conservation in Buildings & Community Systems Annex V. Air Infiltration and Ventilation Centre, Great Britain 1996
153. Liu B.Y., Jordan R.C.: *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*, Solar Energy, Vol. 4, No. 3, 1960
154. Liu B.Y., Jordan R.C.: *The Long Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors*, Solar Energy 7, 53, 1963

155. Lund H.: *Test Reference Years TRY*, Commission of the European Communities, report no. EUR 9765, Technical University of Denmark, Department of Building and Energy, 1985
156. Lushiku E.M., O'Shea K.R.: *Ellipsometry in the study of selective radiation-absorbing surfaces*, Solar Energy Vol. 18, No. 3, 1977, 271 – 276
157. Malczewski J., Piekarski M.: *Modele procesów transportu masy, pędu i energii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992
158. Marks W., Owczarek S. (red.): *Optymalizacja wielokryterialna budynków energooszczędnych*, Studia z zakresu inżynierii nr 46, Warszawa 1999
159. Marks W. (red.): *Optymalizacja w fizyce budowli, Sekcja Fizyki Budowli Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN Studia z zakresu fizyki budowli*, Łódź 2001
160. Martin C.L., Goswami D.Y.: *Solar Energy Pocket Reference*, ISES 2005
161. Mazria E.: *The Passive Solar Energy Book*. Rondale Press, Emmaus, PA, 1979
162. McCluney R.: *Determining solar radiant heat gain of fenestration systems*, Passive Solar Journal, 4(4), 1987, 439 – 487
163. Meinel A. B., Meinel M. P. *Applied Solar Energy*, Addison-Wesley, London, 1977
164. Miguel A., Bilbao J.: *Test reference year generation from meteorological and simulated solar radiation data*, Solar Energy, Vol. 78, No. 6, 2005, 695–703
165. Mikielawicz J., Gumkowski S. *O możliwościach wykorzystania energii słonecznej w warunkach krajowych*. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna. No 3. 1994
166. Mikielawicz J.: *Modelowanie procesów ciepłno - przepływowych*, Maszyny Przepływowe tom 17, IMP PAN, Wydawnictwo PAN 1995
167. Milburn D.I., Hollands K.G.T., Kehl O.: *On measurement techniques for the spectral absorptance of glazing materials in the solar range*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 163 – 168
168. Mirowski A., Lange G., Jeleń I.; *Materiały do projektowania kotłowni i nowoczesnych systemów grzewczych*, Viessman, 2004
169. Montgomery D., Keown S.I., Heisler, 1982, *Solar blocking by common trees*. Proc.7th national Passive Solar Conference, Knoxville, TN, Aug.30-Sept., 473
170. Motloch J.L., Song K.D.: *Approximating tree transmissivity using visual and image capture/interpretation methods*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 335 -339
171. Nantka M.B: *Poprawa właściwości przegród oszklonych w aspekcie ograniczenia strat ciepła budynków*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja Nr 9(282), Warszawa, 1993, 275 – 287
172. Nowak H.: *Oddziaływanie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa

- Politechniki Wrocławskiej nr. 72, Seria: Monografie nr. 31, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999
173. Nowicki J. Promieniowanie słoneczne jako źródło energii. Arkady, Warszawa, 1980
174. Olgyay A., Olgyay V.: *Solar Control and Shading Devices*, Chap. 8 Princeton, NJ Princeton University, 1957
175. Olgyay V. Telkes M.: *Solar heating design for houses*, Progressive Architecture, March 1959, 195 – 207
176. Owczarek S.: *Optymalizacja kształtu budynków energooszczędnych o podstawie wieloboku*, Studia z zakresu inżynierii nr 32, Warszawa 1992
177. Palmer J., Watkins R., Seager A., Trollope M.: *The U.K. passive solar energy performance assessment project*, 1991 Solar World Congress Vol. 3, part 1, 2516 – 2521
178. Panek A., Turlejski S., Zelman H., Krattiuk M.: *Stochastyczny model klimatu Polski – identyfikacja i symulacja*, Sprawozdanie za lata 1987–1990 z realizacji tematu 4.4/CPBP 02.21: Modelowanie i badanie komfortu cieplnego w pomieszczeniach, kier. Okołowicz Grafowska B., Instytut Ogrzewnictwa I Wentylacji Politechniki Warszawskiej
179. Papadopoulos A.M.: *State of the art. In thermal insulation materials and aims for future developments*, Energy and Buildings, Vol. 37, No. 1, 2005, 77–86
180. Papuas A., Loew E., Scotland-Stewart T., Krarti M.: *Impact of shape on residential buildings energy performance*, Proceedings of ISEC2005, 2005 International Solar Energy Conference, August 6–12, 2005 Orlando, Floryda
181. Pereira F.O.R., Silva C.A.N., Turkienikz B.: *A methodology for sunlight Urban planning: a computer based solar and sky vault obstruction analysis*, Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 2001, 217–226
182. Perez R., et al.: *An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloped surfaces – Description, performance validation, and site dependency evaluation*, Solar Energy, Vol. 36, 1986, 481-98
183. Perez R., Seals P., Ineichen P., et al: *A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces*, Solar Energy, Vol. 39, 1987, 221
184. Perez R., Seals P., Zelenka A., Ineichen P.: *Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: Prospects for performance improvements*, Solar Energy, Vol. 44, No. 2, 1990, 99 – 108
185. Pluta Z.: *Wpływ zmian temperatury zewnętrznej oraz promieniowania słonecznego na efektywne straty ciepła przez przegrody zewnętrzne budynku*, Prace IPPT, 8/1992, Warszawa
186. Pluta Z., Wnuk R.: *Zastosowanie metody bilansu elementarnego do szacowania strat ciepła przez zewnętrzne przegrody budowlane*, Prace IPPT, 18/1992, Warszawa

187. Pluta Z.: *Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
188. Pluta Z.: *Słoneczne instalacje energetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
189. PN-B-02025, *Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego*, lipiec 2001
190. PN-EN ISO 9488 *Energia słoneczna - Terminologia*, Warszawa 2002
191. PN-EN ISO 10077-1, *Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji Obliczanie współczynnika przenikania ciepła Część 1: Metoda uproszczona*, styczeń 2002
192. Pollard A., O'Driscoll R., Pinder D.N.: *The Impact of Solar Radiation on the Air Temperature within a Residential Building*, ISES 2001 Solar World Congress
193. Pomierny W.: *Numeryczne modelowanie procesów cieplnych w układach ogrzewania słonecznego, charakterystyki sprawności długoterminowej*, Archiwum Termodynamiki, Vol. 8, No. 3, 1987
194. Popiołek Z. (red.), praca zbiorowa: *Energooszczędne kształtowanie środowiska wewnętrznego*, Politechnika Śląska, Gliwice 2005
195. Potter D.: *Metody obliczeniowe fizyki, fizyka komputerowa*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1982
196. *Promieniowanie słoneczne*. D-20/78/83. Publikacje Instytutu Geofizyki PAN. 1983
197. Prudnicki J. *Metody opracowań klimatologicznych*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1981
198. Quaschnig V., Hanitsch R.: *Irradiance calculation on shaded surfaces*, Solar Energy, Vol. 62, No. 5, 1998, 369-375
199. Räuber A.: *Renewable Energy Status – Outlook – Research Goals*, The Federal Minister for Research and Technology, Bonn 1992
200. Recknagel, Sprenger, Hönamann, Schramek: *Poradnik. Ogrzewnictwa i Klimatyzacja z uwzględnieniem chłodnictwa i zaopatrzenia w ciepłą wodę, EWFE – wydanie I*, Gdańsk 1994
201. Redmund J., Salvisberg E., Kunz S.: *On the generation of hourly shortwave radiation data on tilted surfaces*, Solar Energy, Vol. 62, No. 5, 1998, 331–344
202. Reindl D. T., Duffie J. A., Beckman W. A.: *Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models*, Solar Energy, 45, 9, 1999
203. Reppeler J., Edmonds I.R.: *Angle-selective glazing for radiant heat control in buildings: theory*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 245–253
204. Robinson D., Stone A.: *Solar radiation modeling in the urban context*, Solar Energy, Vol. 77, 2004, 295–309
205. Roche P., Milne M.: *Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller*, Solar Energy 77, 2004, 421–434

206. Rubin M., Rottkay K., Powles R.: *Window optics*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 149 – 161
207. Rylewski E.: *Energia własna. Nowoczesne rozwiązania budownictwa niskoenergetycznego*, TINTA Agencja Informacyjno-Wydawnicza, Warszawa 2002
208. Sayigh A.A.M. (ed.): *Solar Energy Engineering*, Academic Press, London, 1997
209. Schulz H., Chwieduk D. *Wärme aus Sonne und Erde Energiesparende Heizungssysteme mit Erdwärmespeicher, Solarabsorber und Wärmepumpe*. Okobuch Verlage, Staufen bei Freiburg, 1995
210. Sfeir A.: *A stochastic model for predicting solar system performance*, Solar Energy 25 (1980) 2, 149 – 154
211. Shewen E., Hollands K.G.T., Raithby G.D: *Heat transfer by natural convection across a vertical air cavity of large aspect ratio*, Journal of Heat Transfer, Vol. 118, 1996, 993 – 995
212. Smith G.B., Dligatch S., Sullivan R., Hutchins M.G.: *Thin film angular selective glazing*, Solar Energy, Vol. 62, No. 3, 1998, 229–244
213. Smolec W.: *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000
214. Spencer J.W.: *Fourier Series Representation of the Position of the Sun*. Search, 2 (5), 1971, 172
215. Stahl W., Voss K., Goetzberger A.: *The self-sufficient solar house in Freiburg*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 111–125
216. Staniszewski B.: *Wymiana ciepła Podstawy teoretyczne*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980
217. Summers L.H., Kalisperis L.N., Steinman M.: *Human thermal comfort design method for indoor climate*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 3–14
218. Swinbank W.C.: *Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, 1963, 339–348
219. Szargut J. (red.), praca zbiorowa: *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 1992
220. Szokolay S.V (red.). *Solar Energy and Building*. Arnold. 1975
221. Szokolay S.V.: *Environmental science handbook for architects and builders*, John Wiley & Sons, New York 1980
222. Teller J., Azar S.: *Townscope II – A computer system to support solar access decision-making*, Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 2001, 187 – 200
223. Temps R.C, Coulson K.L: *Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations*, Solar Energy, 19, 1977, 179
224. Tombazis A.N., Preuss S.A.: *Design of passive solar buildings in urban areas*, Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 311–318, Elsevier Science Ltd., UK 2001

225. Tripanagnostopoulos Y., Siabekou Ch., Tonui J. K.: *The fresnel lens concept for solar control of buildings*, Proceedings of the International Conference PALENC2005, Santorini, Greece, 2005, 977-982
226. Tsangrassoulis A., Santamouris M., Geros V., Wilson M., Asimakopoulos D.: *A method to investigate the potential of south-oriented vertical surfaces for reflecting daylight onto oppositely facing vertical surfaces under sunny conditions*, Solar Energy Vol. 66, No. 6, 1999, 439-446
227. Twidell J.W., Johnstone C., Zuhdy B., Scott A.: *Strathclyde university's passive solar, low-energy, residences with transparent insulation*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 85-109
228. Twidell J., Weir T.: *Renewable Energy Resources*, E&FN SPON, London, University Press Cambridge, 1996
229. Utzinger M.: *Sustainable communities: ecological design of the 21st century suburb*, The 17th National Passive Solar Conference, Vol. 17, 1992, 216-221
230. Utzinger D.M., Klein S.A.: *A method of estimating monthly average solar radiation on shaded surfaces*, Proceedings 3d National Passive Solar Conference, San Jose, CA, January 11-13, 1979, Newark, De: American Section of the International Solar Energy Society, 295
231. Vartiainen E., Peippo K., Lund P.: *Daylight optimization of multifunctional solar facades*, Solar Energy, Vol. 68, No. 3, 2000, 223-235
232. Veziroglu T. N. (ed.): *Solar energy and conservation*, Pergamon Press, Oxford 1978
233. Voss K., Goetzberger A., Bopp G., Häberle A., Heinzl A., Lehmborg H.: *The Self-Sufficient Solar House Freiburg – Results of Three Years of Operation* (internal report)
234. *Warunki techniczne, jakimi powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r., Komentarz do rozporządzenia, Biblioteka „Buduj z nami”, Polska Izba Przemysłowo-Handlowa Budownictwa, Warszawa 2002
235. Weiss W., Bergmann I., Faninger G.: *Solar heat Worldwide Markets and Contribution to the Energy Supply 2004*, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Austria 2006
236. Więckowska A., Gawin D., Koniarczyk M., Kossecka E.: *Typowy rok meteorologiczny i jego zastosowanie do symulacji wilgotnościowych i energetycznych budynków*, Polska Energetyka Słoneczna nr 1/2004, 21 – 26
237. Wiśniewski S.: *Wymiana ciepła*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979
238. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: *Wymiana ciepła*, Podręczniki Akademickie – Mechanika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000
239. Wnuk R.: *Numeryczne modelowanie aktywnego bezpośredniego systemu podgrzewu ciepłej wody użytkowej z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego*, Prace IPPT, 38/1991, Warszawa
240. Wnuk R.: *Budowa Domu Pasywnego w praktyce*, Przewodnik Budowlany 2006, Warszawa 2006

241. Work Programme for the specific programme for research, technological development and demonstration: Integrating and strengthening the European Research Area. Work Programme. 6.1 Sustainable energy systems, SP1 – Priority 6-1. EC, Community Research, 2004
242. Wołoszyn M. A.: *Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie jednorodzinym*, COIB, Warszawa 1991
243. Wright J.L.: *Correlation for quantifying convective heat transfer between window glazings*, Communication prepared for ASHRAE SPC-142 (Standard method for determining and expressing the heat transfer and total optical properties of fenestration products), 1991
244. Wright J.L.: *A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazings*, ASHRAE Transactions, 106, Pt. 2, 1996
245. Wu Holu: *The Effect of Using Nighttime Ventilation and Building Thermal Mass for Passive Cooling*, The 15th National Passive Solar Conference, Vol. 15, 1990, 145– 49
246. Yezioro A., Shaviv E.: *Shading: a design tool for analyzing mutual shading between buildings*, Solar Energy, Vol. 52, No. 1, 1994, 27–37
247. Zapałowicz Z.: *Instalacje słoneczne w Polsce na progu XXI wieku*, 5th Int. Conf. on Unconventional, Electromechanical and Electrical Systems, 2001, Supplement, Szczecin, 233-238
248. Zarzycki R. (red.): *Gospodarka komunalna w miastach*, Polska Akademia Nauk Oddział w Łodzi, Komisja Ochrony Środowiska, Łódź 2001
249. Zawadzki M. (red.): *Kolektory Słoneczne, Pompy Ciepła - Na Tak*, Polska Ekologia 2003