

DOSTĘPNOŚĆ PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DO OBUDOWY BUDYNKU ZLOKALIZOWANEGO W POLSCE CENTRALNEJ

Dorota CHWIEDUK

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono dostępność promieniowania słonecznego dla powierzchni różnie zorientowanych i pochylonych stanowiących obudowę modelowego budynku zlokalizowanego w Warszawie. Na wstępie opisano zjawiska związane z przejściem promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską i powodujące jego osłabienie. Przedstawiono model anizotropowy promieniowania rozproszonego HDKR. Korzystając z tego modelu i rzeczywistych sum godzinnych promieniowania słonecznego, odpowiednio uśrednionych, przeprowadzono obliczenia symulacyjne napromieniowania powierzchni o różnym usytuowaniu, a w artykule zamieszczono wyniki obliczeń w postaci dobowych rozkładów napromieniowania półsferycznego, uśrednionych w kolejnych miesiącach roku. Na podstawie zamieszczonej interpretacji graficznej wyników, jak i analizy innych wyników symulacji numerycznej, przedstawiono wnioski odnośnie do kształtowania obudowy budynku w kontekście dostępności promieniowania słonecznego.

WPROWADZENIE

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. W artykule rozważono dostępność promieniowania słonecznego do powierzchni płaskich tworzących obudowę budynku, przy podstawowym ich usytuowaniu, tj. pochyleniu i zorientowaniu względem stron świata. Dostępność promieniowania decyduje o możliwości pozyskania energii promieniowania. W rozważaniach przyjęto, że wszystkie powierzchnie, poza tym że różnią się usytuowaniem (położeniem względem stron świata i pochyleniem), mają takie same warunki do odbioru energii promieniowania słonecznego, tj. nie są niczym zacieniane, ani nie ma w ich otoczeniu powierzchni o zwiększonej refleksyjności.

OSŁABIENIE PROMIENIOWANIA PRZEJŚCIEM PRZEZ ATMOSFERĘ ZIEMSKĄ

Promieniowanie słoneczne zanim dotrze do powierzchni Ziemi ulega różnego rodzaju oddziaływaniom i osłabia się. Promieniowanie słoneczne padające na zewnętrzną warstwę atmosfery ziemskiej jest promieniowaniem bezpośrednim. Docierając do atmosfery ziemskiej ulega częściowemu odbiciu od jej zewnętrznych warstw, powracając do przestrzeni kosmicznej. Następnie przechodząc przez atmosferę ziemską ulega

dalszemu osłabieniu, bowiem atmosfera ziemska częściowo pochłania i rozprasza promieniowanie słoneczne.

Procesy pochłaniania są bardzo istotne, bowiem w wyniku ich występowania ulega zmianie widmo promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi (w porównaniu z widmem promieniowania docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery ziemskiej). Krzywa rozkładu obniża się (osłabienie promieniowania) i jest bardziej „poszarpana” (zmiany gęstości strumienia energii przy różnych długościach fali). Występowanie procesów pochłaniania promieniowania zależy od długości fali (obszaru rozkładu widmowego) promieniowania, czyli ma charakter selektywny. Promieniowanie ultrafioletowe (o długościach fal $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$) jest całkowicie pochłaniane przez jony i cząsteczki tlenu, ozonu i azotu (chyba, że warstwa ozonowa uległa uszkodzeniu). W obszarze promieniowania widzialnego ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$) czysta atmosfera całkowicie przepuszcza promieniowanie słoneczne, które może nie osłabione dotrzeć do powierzchni ziemi. Zwykle około 20% promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni (krótkofalowe, $0,75 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$) jest absorbowane w atmosferze ziemskiej, głównie przez cząsteczki pary wodnej i dwutlenku węgla, i zjawisko ma charakter selektywny. W atmosferze ziemskiej oprócz absorpcji selektywnej ma miejsce pochłanianie nieselektywne przez aerozole atmosferyczne występujące na różnych wysokościach nad ziemią, dotyczy to całego widma promieniowania słonecznego.

Oprócz procesów pochłaniania w atmosferze ziemskiej występuje rozpraszanie promieniowania słonecznego. Fotony światła słonecznego nie są w stanie rozerwać wiązań cząsteczek atmosfery i ulegają rozproszeniu we wszystkich kierunkach. Rozpraszanie jest procesem zależnym od długości fali promieniowania. Polega ono na oddziaływaniu promieniowania z materią, w wyniku którego zmienia się kierunek rozchodzenia się fali, ale długość fali pozostają bez zmian. Rozpraszanie dotyczy promieniowania widzialnego i podczerwonego, ma miejsce na cząsteczkach gazowych atmosfery (głównie O_2 , N_2 i H_2O) oraz na aerozolu atmosferycznym. Intensywność rozpraszania zależy od składu atmosfery, od jej wilgotności, zachmurzenia, zapylenia i zanieczyszczenia, a także od drogi przebytej przez promieniowanie słoneczne w atmosferze. Z kolei długość tej drogi zależy od położenia

J. JEWULSKI

Institut Techniki Ciepłej, Wydział MEiL,
Politechnika Warszawska, Warszawa

Institut Podstawowych Problemów Techniki,
Polska Akademia Nauk, Warszawa

Słońca, opisanego kątem zenitalnego padania promieni słonecznych i wysokości nad poziomem morza analizowanej powierzchni ziemi. Fakt ten jest uwzględniany poprzez wprowadzenie parametru optycznej masy atmosfery. Optyczna masa atmosfery jest określana jako stosunek masy atmosfery, przez którą przechodzi promieniowanie bezpośrednie, aby dotrzeć do danego punktu na Ziemi, do masy atmosfery, którą musiałoby przejść, gdyby Słońce znajdowało się w zenicie. Dla kątów zenitalnych w zakresie od 0° do 70° przyjmuje się, że wartość optycznej masy atmosfery jest odwrotnością funkcji cosinusa kąta padania promieni słonecznych powierzchni Ziemi (Duffie, Beckman, 1991).

Zjawisko rozpraszania promieniowania słonecznego w atmosferze jest zależne od ilości cząsteczek, które promieniowanie napotyka na swej drodze i od wymiarów tych cząsteczek względem danej długości fali promieniowania. Cząsteczki powietrza mają bardzo małe wymiary (np. tlen, azot) w stosunku do długości fali promieniowania. Zgodnie z teorią Rayleigha rozpraszanie na cząsteczkach powietrza jest znaczące jedynie dla małych długości fali, tzn. mniejszych niż $0,6 \text{ mm}$, dla których to współczynnik rozpraszania jest funkcją długości fali do minus czwartej potęgi (λ^{-4}). W związku z tym natężenie promieniowania rozproszonego rośnie szybko ze zmniejszaniem się długości fali. Dla fal w zakresie powyżej $0,6 \text{ mm}$ rozpraszanie na cząsteczkach powietrza jest pomijalnie małe.

W atmosferze występuje także rozpraszanie nieselektywne wynikające z istnienia wody i kurzu, czyli aerozoli, które dotyczą całego zakresu widma. Kurz i woda tworzą w atmosferze cząsteczki znacznie większych rozmiarów, jest to związane z gromadzeniem się cząsteczek wody w jednym miejscu i z kondensacją wody na cząsteczkach kurzu. Opis rozpraszania promieniowania na cząsteczkach wody i kurzu jest znacznie trudniejszy, ponieważ ich natura i koncentracja w atmosferze jest silnie zależna od czasu i miejsca występowania. Rozpraszanie na aerozoluach było badane min. przez Miego. Opracował on teorię zgodnie, z którą rozważa się rozpraszanie przez cząsteczki większe od $0,1$ długości fali, a współczynnik rozpraszania (dla aerozoli) jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali promieniowania. Przyjęto, że w atmosferze rzeczywistej współczynnik rozpraszania jest proporcjonalny do $1/\lambda^n$ (przy czym n zmienia się od 1 do 4, im atmosfera jest czystsza tym n jest bliższe wartości 4, a ze wzrostem zapylenia n maleje).

Reasumując, w przypadku bezchmurnego nieba intensywność rozpraszania zależy od pozycji Słońca na niebie, określonej poprzez kąt padania promieniowania, poprzez wielkość masy optycznej m , oraz od zawartości aerozoli w atmosferze. W przypadku nieba zachmurzonego rozpraszanie promieniowania w atmosferze oczywiście zwiększa się. Zależy ono od stopnia zachmurzenia nieba, rodzaju chmur i pozycji Słońca na niebie. Przy całkowitym zachmurzeniu nieba chmurami piętra niskiego i średniego, do powierzchni ziemi dociera praktycznie jedynie promieniowanie rozproszone. Przy całkowitym zachmurzeniu chmurami piętra wysokiego do powierzchni ziemi dociera niewielka ilość promieniowania bezpośredniego.

W momencie wschodu Słońca, lub zachodu, gdy znajduje się ono bezpośrednio nad horyzontem, całe promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni poziomej ziemi stanowi promieniowanie rozproszone. Ze wzrostem kąta wzniesienia Słońca udział promieniowania rozproszonego (przez warstwy atmosfery) maleje. Przy kącie wzniesienia Słońca powyżej

40° udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym dąży do minimum, przy czym nawet przy bardzo czystym i suchym powietrzu, jego udział jest na poziomie 20-25%. W krajach wyższych szerokości geograficznych kąty wzniesienia Słońca powyżej 40° występują tylko w ciepłych miesiącach w godzinach bliskich czasu południa słonecznego, stąd też warunki nasłonecznienia charakteryzuje duży udział promieniowania rozproszonego.

W wyniku przejścia przez atmosferę promieniowanie słoneczne ulega w mniejszym lub większym stopniu osłabieniu. Przy wzroście zachmurzenia osłabienie strumienia promieniowania słonecznego oczywiście wzrasta. Jednakże nawet przy słonecznej pogodzie, na skutek odbicia, pochłonięcia i załamania, mają miejsce straty energii promieniowania słonecznego w atmosferze są one w granicach od 10-25%. Natomiast przy dużym zachmurzeniu straty te mogą sięgać nawet 95%. Oprócz zachmurzenia wpływ na zmniejszenie strumienia promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi ma także zapylenie (zanieczyszczenie) atmosfery. Zapylenie może być wynikiem naturalnych zjawisk jak: erupcja wulkanów, pożary lasów, pył pustylny (duża koncentracja pyłu zwłaszcza w czasie burz piaskowych), a także może być wynikiem działalności człowieka: przemysł, ośrodki miejskie.

WYZNACZANIE NAPROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DOWOLNEJ POWIERZCHNI

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.

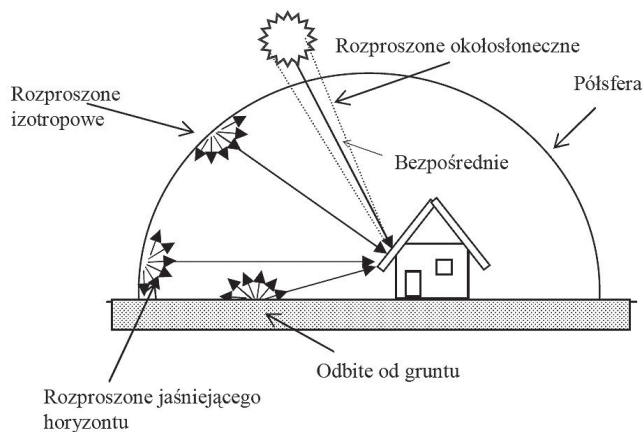
Do dowolnie usytuowanej powierzchni dociera promieniowanie słoneczne pólśferyczne. Dociera ono z całej półkuli nieboskłonu, czyli z kąta bryłowego równego $2 \pi \text{ sr}$. Pólśferyczne promieniowanie słoneczne odbierane przez poziomą powierzchnię nazywane jest promieniowaniem całkowitym. Promieniowanie 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 pólśferyczne 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 (2002) promieniowanie dyfuzyjne jest to „promieniowanie słoneczne pólśferyczne minus promieniowanie słoneczne bezpośrednie”, czyli dla powierzchni poziomej promieniowanie dyfuzyjne jest równoważne promieniowaniu rozproszonemu, a dla powierzchni pochylonej względem poziomu promieniowaniu rozproszonemu i odbitemu. Na rysunku 1 w sposób ideowy przedstawiono składowe promieniowania słonecznego pólśferycznego docierającego do obudowy budynku.

Określanie kierunku padania promieniowania rozproszonego jest złożone, z reguły przyjmuje się, że składa się ono z trzech składowych (Duffie, Beckman, 1991):

– promieniowania rozproszonego izotropowego, docierającego równomiernie ze wszystkich stron nieboskłonu (pólśfe-

ry), jego energia nie zależy od kierunku z którego dociera i od długości fali;

- 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.



Rys. 1. Idea padania promieniowania słonecznego półsferycznego i jego składowych na obudowę budynku

Napromieniowanie słoneczne (gęstość energii) półsferyczne godzinne I_c z uwzględnieniem poszczególnych składowych promieniowania słonecznego docierającego do dowolnie pochylonej i zorientowanej powierzchni można zapisać w następujący sposób:

$$I_c = I_{p,b} + I_{p,d,izo} + I_{p,d,oks} + I_{p,d,hz} + I_{p,o} \quad (1)$$

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.

Do analizy i obliczeń napromieniowania wykorzystano model anizotropowy HDKR promieniowania słonecznego rozproszonego. Nazwa tego modelu pochodzi od pierwszych liter nazwisk badaczy, którzy przyczynili się do jego powstania. Hay i Davies przyjęli (Hay, Davies, 1985), że promieniowanie rozproszone składa się z promieniowania rozproszonego izotropowego i promieniowania rozproszonego okołosłonecznego, które przyjmuje ten sam kierunek rozchodzenia się tego promieniowania co promieniowanie bezpośrednie. Hay i Davies wprowadzili tzw. indeks anizotropowości promieniowania dyfuzyjnego, który jest funkcją transmisyjności (przezroczystości) atmosfery dla promieniowania bezpośredniego i odnosi się do promieniowania na zewnętrznej warstwie atmosfery, tj. warstwie okołozemskiej. W przypadku czystego nieba wartości indeksu anizotropowości są wysokie. Oznacza to, że w promieniowaniu rozproszonym dominuje promieniowanie okołosłoneczne. Przy dużym zachmurzeniu, jeżeli nie ma pro-

mieniowania bezpośredniego, to rozważany indeks jest równy zero i występuje jedynie izotropowe promieniowanie rozproszone atmosfery.

Kilka lat później Reindl (z grupą naukowców) skorzystał z modelu Haya i Daviesa, i dodał promieniowanie rozproszone jaśniejącego horyzontu, zgodnie z wcześniejszą teorią Kluchera (Klucher, 1979), przy czym tworząc bardziej udoskonalony model promieniowania uwzględnił współczynnik korekcji promieniowania dyfuzyjnego horyzontu zaproponowany przez Tempa i Coulsona (1977). Model ten został jeszcze później zmodyfikowany przez Kluchera poprzez wprowadzenie wskaźnika uwzględniającego stopień zachmurzenia. Ostatecznie napromieniowanie półsferyczne dowolnej powierzchni wg modelu HDKR oblicza się z zależności:

$$(2)$$

$$I_s(t) = (I_b(t) + I_d(t)A_d(t))R_b(t) + I_d(t)(1 - A_d(t))R_d(t) \left[1 + f(t) \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + (I_h(t) + I_o(t))\rho_g(R_o)$$

Wielkości napromieniowania godzinne I_b , I_d dotyczą powierzchni poziomej i są odpowiednio korygowane uwzględniając:

- naturę promieniowania w danym czasie, wynikającą z warunków meteorologicznych, opisaną współczynnikiem anizotropowości (równanie (3)) i wskaźnikiem stopnia zachmurzenia (równanie (4))
- pochycenie powierzchni, co uwzględni współczynnik korekcji promieniowania rozproszonego izotropowego, (równanie (5)), współczynnik korekcji promieniowania odbitego (równanie (6)), oraz człon równania (2), który odnosi się do promieniowania jaśniejącego horyzontu (i jest związany poprzez pochycenie (dokładnie $\frac{1}{2}$ kąta pochycenia) w funkcji sinus do trzeciej potęgi);
- usytuowanie powierzchni, w tym: pochycenie, orientację i jej lokalizację na Ziemi, oraz czas tj. porę dnia i roku, co jest związane ze zmieniającym się położeniem danej powierzchni względem Słońca, co opisują zależności geometrii sferycznej położenia Ziemi względem Słońca i co uwzględni współczynnik korekcji promieniowania bezpośredniego, opisany zgodnie z metodą Hottela-Woertza równaniem (7).

Poszczególne wielkości można wyznaczyć z następujących zależności:

$$A_d(t) = \frac{I_b(t)}{I_o(t)} = \frac{I_b(t)}{I_{sc}(t) \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n(t)}{365}\right) \cdot (\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t)))} \quad (3)$$

$$f(t) = \sqrt{\frac{I_b(t)}{I_b(t) + I_d(t)}} \quad (4)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (5)$$

$$R_o = \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (6)$$

$$R_b(t) = \frac{\sin(\delta(t))[\sin(\phi)\cos(\beta) - \cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)] + \sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))}{\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))} + \frac{\cos(\delta(t))[\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega(t)) + \sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega(t)) + \sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega(t))]}{\sin(\delta(t))\sin(\phi) + \cos(\delta(t))\cos(\phi)\cos(\omega(t))} \quad (7)$$

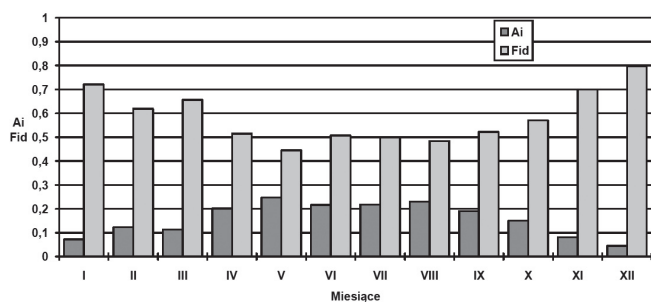
Przeprowadzono obliczenia napromieniowania słonecznego różnie usytuowanych powierzchni przy wykorzystaniu modelu promieniowania HDKR, opisanego równaniem (2) i z

nim związanymi równaniami (3) – (7), co opisano i przeanalizowano w kolejnej części artykułu.

WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Obliczenia napromieniowania powierzchni różnie usytuowanych przeprowadzono przy wykorzystaniu modelu promieniowania słonecznego HDKR korzystając z danych promieniowania słonecznego w postaci sum godzinnych promieniowania całkowitego i rozproszonego zmierzonych na powierzchni poziomej ziemi na stacji aktynometrycznej IM-iGW na Bielanach (Warszawa), a następnie uśrednionych w odpowiedni sposób (Chwieduk, Bogdańska, 2004).

Przed przedstawieniem wyników obliczeń symulacyjnych na rysunku 2 pokazano 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. 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 jaśniejącego horyzontu. Maj i sierpień (w naszych warunkach klimatycznych), jako istotny okres czasu w analizach pasywnych rozwiązań struktury budynku, powinny więc być poddawane szczególnym 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.



Rys. 2. Uśrednione dzienne wartości A_i indeksu anizotropowości i współczynnika F_{ld} udziału promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym w kolejnych miesiącach roku dla Warszawy

Na rysunkach 3-11 przedstawiono (zaczerpnięte i opisane w sposób szczegółowy w literaturze (Chwieduk, 2006)) interpretację graficzną wyników obliczeń symulacyjnych dotyczących rozkładów natężenia promieniowania sferycznego w czasie doby (wartości natężenia są obliczane co godzinę), promieniowania docierającego do powierzchni zewnętrznych obudowy: pionowych (rys. 3-6) i pochylonych względem poziomu pod kątem 450 (rys. 7-11) zwróconych w czterech podstawowych kierunkach świata, tj. kolejno południowym, wschodnim, zachodnim i północnym. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że szczególną uwagę, ze względu na napromieniowanie słoneczne, należy zwrócić na południową fasadę

budynku, co jest w pewnym sensie oczywiste, ale także na zachodnią, co praktycznie nie jest 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 przypadku pionowych elementów obudowy 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. 6 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 (rys. 3-6) 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.

Poza przedstawionymi w postaci graficznej na rys. 3-11 wynikami obliczeń symulacyjnych przeprowadzono także szereg innych obliczeń dotyczących napromieniowywania w dowolnym przedziale czasu różnie usytuowanych powierzchni. Na podstawie wszystkich otrzymanych wyników sformułowano wnioski odnośnie kształtowania obudowy budynku w kontekście jego nasłonecznienia (Chwieduk, 2006).

KSZTAŁTOWANIE 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 można dokonać 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 $Y=+45^\circ$). 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 $Y=0^\circ$ 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 jaśniejącego horyzontu. Największe wartości sum godzinnych promieniowania całkowitego występują w czerwcu w godzinach południowych, kiedy to przy małych pochyleniach oraz orientacji południowej i południowo-zachodniej ($g=0^\circ$, $Y=+45^\circ$) 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, należy główną fasadę budynku zwracać w stronę wschodnią (to dotyczy przede wszystkim budynków wykorzystywanych sezonowo w lecie) lub południowo-wschodnią, a nie na zachód lub południowo-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 ($\beta=65^\circ$, $Y=0^\circ$) średnie dzienne półsferyczne napromieniowanie wynosi około 2,5 MJ/(m² dzień). Napromieniowanie dzienne powierzchni pionowej południowej wynosi w tym okresie około 1,9 MJ/(m² dzień), czyli jest przeszło pięciokrotnie niższe niż w czerwcu. Natomiast w grudniu napromieniowanie powierzchni poziomej wynosi zaledwie 1,5 MJ/(m² 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 MJ/m², w tym godzinne napromieniowanie bezpośrednie wynosi około 0,3 MJ/m² (co stanowi 60% promieniowania półsferycznego). W zimie bardzo istotne jest odpowiednie pochylenie względem poziomu powierzchni odbierającej promieniowanie w celu zwiększenia udziału promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu półsferycznym. W przypadku większych pochyleni, 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 godzinne napromieniowania półsferycznego występują w południe, kiedy to przy korzystnych warunkach pochylenia ($\beta=45^\circ$) i orientacji południowej, wynoszą około 1,7 MJ/m², przy czym godzinne napromieniowanie bezpośrednie może dochodzić do 1,1 MJ/m², 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 pochyleni wzrasta składowa promieniowania odbitego i składowa promieniowania rozproszonego jaśniejącego 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.

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 $\beta \rightarrow 90^\circ$, bez względu na to należy unikać powierzchni poziomych i o małych kątach pochylenia;
- główna fasada powinna być zorientowana w zakresie kątów azymutalnych:
 $-90^\circ \leq \gamma \leq 0^\circ$; należy unikać orientacji w kierunku zachodnim, szczególnie w zakresie $+30^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$, konieczne jest zacielenie (dla $0^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$);

– dla okresu przejściowego o umiarkowanym poziomie napromieniowania:

- główna fasada powinna być zwrócona w stronę południową ($\gamma \rightarrow 0^\circ$),
- powierzchnie obudowy powinny być pochylone pod kątem $\beta \geq 40^\circ$, 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 zacielenie budynku;
- należy stosować duże pochylenia powierzchni:
 $50^\circ < \beta < +70^\circ$; zalecane 60° .

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, łącznie z okresem wakacyjnym 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° do $+90^\circ$. Należy od tej strony budynek zacieleniać, 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 zacieleniające 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 pochyłeń, 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 zacieleniana. Powierzchnie pionowe zachodnie są narażone na przegrzewanie latem bardziej niż powierzchnie południowe i powinny być szczególnie zacieleniane 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 połaci 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 pochyłym dachu od strony zachodniej.

Zgodnie z otrzymanymi wynikami najlepsze warunki następczenia w ciągu roku ma powierzchnia pochyłona pod kątem 40° , następnie 45° i 30° , w zakresie kątów azymutalnych od -15° do $+45^\circ$. Zalecane zorientowanie powierzchni odpowiada kątowi $+15^\circ$. Powierzchnie pochyłone 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 pochylenia zalecanego do stosowania uogólnioną formułą Duffiego i Beckmana (Duffie, Beckman, 1991) wg której zalecane pochylenie powierzchni pozyskujących promieniowanie słoneczne dla Warszawy jest w granicach od 42° do 62° . Oznacza to, że ogólne uniwersalne formuły dotyczące dostępności promieniowania słonecznego nie sprawdzają się. Konieczna jest znajomość rzeczywistych warunków napromieniowania w danym rejonie, czyli dostęp do rzeczywistych zmierzonych danych napromieniowania.

SPIS SYMBOLI

A_i – współczynnik anizotropowości
 f – wskaźniki stopnia zachmurzenia
 G – natężenie promieniowania słonecznego W/m^2
 I – godzinne napromieniowanie słoneczne J/m^2
 n – numer dnia w roku
 R – współczynnik korekcji promieniowania słonecznego
 t – czas s

INDEKSY

b – bezpośrednie
 d – rozproszone
 izo – izotropowe
 hz – jaśniejszego horyzontu
 o – odbite
 oks – okołosłoneczne
 p – Powierzchnie pochyłone

SYMBOLY GRECKIE

β – kąt pochylenia względem poziomu deg
 δ – deklinacja deg
 γ – kąt azymutalny deg
 λ – przewodność cieplna $\text{W}/(\text{mK})$
 λ – długość fali μm
 ρ – refleksyjność szerokość geograficzna deg
 ω – kąt godzinny słońca deg

LITERATURA

- Chwieduk D.: *Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku*. PRACE IPPT · IFTR REPORTS. pp. 1-264, 11/2006, Warszawa 2006
- 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
- Duffie J. A., Beckman W. A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991
- 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
- Klucher T. M.: *Evaluating Models to Predict Insulation on Tilted Surfaces*, Solar Energy, Vol. 23, 1979, 111
- PN-EN ISO 9488 *Energia słoneczna – Terminologia*, Warszawa 2002
- Temps R. C., Coulson K.L.: *Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations*, Solar Energy, 19, 1977, 179