BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

DOMINIK WŁODARCZYK, HENRYK NOWAK*

PORÓWNANIE TEORETYCZNYCH I POMIAROWYCH DANYCH NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA PŁASZCZYZNĘ ZACIENIONĄ

A COMPARISON OF THEORETICAL AND MEASURED DATA OF SOLAR RADIATION ON A SURFACE SHADED BY HORIZONTAL OVERHANG

Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie teoretycznych i pomiarowych wartości natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę pionową zacienioną horyzontalnym nadwieszeniem zacieniającym. Wartości pomiarowe zebrano na stanowisku badawczym zysków słonecznych zbudowanym na terenie Laboratorium Fotowoltaicznego SolarLAB Politechniki Wrocławskiej. Do obliczeń teoretycznych zastosowano izotropowy model natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę zacienioną horyzontalnym nadwieszeniem zacieniającym, zaproponowany przez Jonesa. Do porównania wartości teoretycznych i pomiarowych wykorzystano wskaźniki statystyczne.

Słowa kluczowe: *natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę zacienioną nadwieszeniem horyzontalnym, pomiary aktynometryczne, analiza statystyczna*

Abstract

A comparison of theoretical and measured data of solar radiation on a surface shaded by horizontal overhang was presented in this paper. Measurement data was collected on solar radiation structure built at Photovoltaic Laboratory SolarLAB at Wrocław University of Technology. An isotropic solar radiation on a shaded surface model, proposed by Jones, was used in theoretical analysis. Statistical coefficients were used in comparison between measured and theoretical data.

Keywords: *solar radiation on a surface shaded by horizontal overhang, solar radiation measurements, statistical analysis*

* Dr inż. Dominik Włodarczyk, dr hab. inż. Henryk Nowak, prof. PWr., Instytut Budownictwa, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Poprawne obliczanie natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnie zacienione jest niezbędne w procesie obliczania zysków słonecznych budynków wyposażonych w konstrukcje zacieniające, np. w nadwieszenia horyzontalne. Zyski słoneczne stanowią istotny element bilansu cieplnego budynku, tak więc bez ich dokładnego określenia nie można prawidłowo zaprojektować systemów grzewczych i klimatyzacyjnych w budynku.

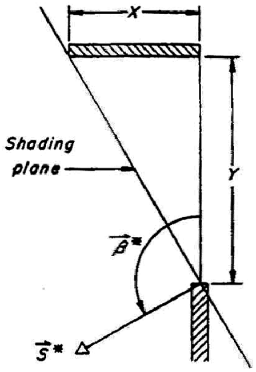
W artykule przedstawiono wyniki statystycznej analizy porównawczej danych teoretycznych i pomiarowych natężenia promieniowania słonecznego padającego na płaszczyznę zacienioną. Analizowano płaszczyznę pionową, zorientowaną w kierunku południowym, zacienioną horyzontalnym nadwieszeniem zacieniającym.

Dane teoretyczne wygenerowane zostały za pomocą modelu Jonesa [1], stosującego izotropowy model natężenia promieniowania słonecznego. Dane pomiarowe gromadzone były na specjalnie w tym celu zbudowanym stanowisku badania zysków słonecznych na płaszczyznę zacienioną na stanowisku pomiarowym w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB Politechniki Wrocławskiej.

Do analizy porównawczej zastosowano standardowe wskaźniki statystyczne. Na ich podstawie opracowano wnioski dotyczące możliwości stosowania izotropowego modelu zysków słonecznych na płaszczyznę zacienioną w polskich warunkach klimatycznych.

2. Teoretyczne modelowanie zysków słonecznych powierzchni zacienionej nadwieszeniem horyzontalnym

W 1980 roku Jones [1] opublikował model działania konstrukcji zacieniającej z horyzontalnym nadwieszeniem przy założeniu „nieskończonej” długości nadwieszenia. W obliczeniach natężenia promieniowania słonecznego na zacienione okno uwzględniono założenia izotropowego rozkładu promieniowania rozproszonego i odbitego od powierzchni gruntu. W swoim modelu Jones założył nadwieszenie o wysięgu *X*, które jest zamocowane



Rys. 1. Ilustracja „płaszczyzny zacienionej” (*shading plane*) w modelu Jonesa [1]
Fig. 1. Ilustration of shading plane in Jones model [1]

tuż nad oknem o wysokości *Y*. Wprowadzono pojęcie „płaszczyzny zacieniającej” (*shading plane*), biegnącej przez zewnętrzną krawędź nadwieszenia i dolną krawędź okna (rys. 1).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Według Jonesa promieniowanie słoneczne padające na płaszczyznę zacienioną nadwieszeniem horyzontalnym składa się z następujących składowych: bezpośredniej, rozproszonej od nieboskłonu, rozproszonej odbitej od powierzchni gruntu oraz rozproszonej odbitej od powierzchni gruntu, a następnie od spodu nadwieszenia. Można więc zauważyć brak typowo anizotropowych składowych promieniowania słonecznego, tj. zwiększonego natężenia promieniowania rozproszonego od tarczy słonecznej oraz rozproszonego z obszaru nad horyzontem. Jak do tej pory żaden z istniejących modeli natężenia promieniowania całkowitego na okno zacienione horyzontalnym nadwieszeniem nie został zweryfikowany doświadczalnie. Nie można zatem stwierdzić, czy wykorzystane w modelu Jonesa podejście izotropowe jest wystarczająco dokładne, czy też należy stosować modele bazujące na teorii anizotropowości promieniowania rozproszonego.

Natężenie promieniowania całkowitego na okno zacienione horyzontalnym nadwieszeniem wg modelu Jonesa oblicza się ze wzoru [1]

$$I_w^m = \sqrt{1+Z^2}\, r_b(\beta^*)\, I_b^m + \frac{1}{2} S_d^* I_d^m + \frac{1}{2} I^m \rho [1+\rho_o F_d^*] \tag{1}$$

gdzie:

- F_d^* – bezwymiarowy wskaźnik udziału promieniowania rozproszonego odbitego od spodu nadwieszenia, jakie otrzymuje okno zacienione,
- I_b^m – średnie w określonym przedziale czasu natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2],
- I_d^m – średnie w określonym przedziale czasu natężenie promieniowania słonecznego rozproszonego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2],
- I^m – średnie w określonym przedziale czasu natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2],
- I_w^m – średnie w określonym przedziale czasu natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na zacieniane okno [W/m^2],
- $r_b(\beta^*)$ – iloraz natężenia promieniowania pozaatmosferycznego na „płaszczyznę zacieniającą” i natężenia promieniowania pozaatmosferycznego na płaszczyznę horyzontalną,
- S_d^* – bezwymiarowy współczynnik udziału promieniowania rozproszonego, jakie otrzymuje okno zacienione,
- Z – bezwymiarowy współczynnik geometryczny wyrażający stosunek wysięgu nadwieszenia do wysokości okna,
- ρ – albedo gruntu,
- ρ_o – albedo spodu nadwieszenia.

3. Pomiary natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię zacienioną nadwieszeniem horyzontalnym

Stanowisko badawcze zysków słonecznych (fot. 1) uruchomiono w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB Politechniki Wrocławskiej. Do stelaża z kształtowników rurowych kwadratowych przymocowano wspornik o wysięgu 0,50 m, obudowany od spodu blachą ocynkowaną (zgodnie z [2] założono współczynnik odbicia promieniowania słonecznego 0,50). Pod nadwieszeniem horyzontalnym zamocowano dwa pyranometry CM21 firmy

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Kipp&Zonen, w celu pomiaru natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową zorientowaną na południe. Zastosowanie dwóch pyranometrów na różnych wysokościach pozwoliło nie tylko na podwojenie liczby danych pomiarowych, ale także na analizę zysków słonecznych przy różnej geometrii układu: pyranometr, krawędź nadwieszenia i położenie Słońca na nieboskłonie. Pyranometry zamontowano w odległości 0,30 i 0,60 m od nadwieszenia horyzontalnego. Nadwieszenie zacieniające zaprojektowano o szerokości 1,50 m po obu stronach osi pyranometrów, co przy wymiarach elementu czujnika mierzącego natężenie promieniowania słonecznego – średnica ok. 30 mm – pozwoliło traktować je jako nadwieszenie długie w stosunku do powierzchni zacienianej (zgodnie z założeniami Utzingera i Kleina [3]). Dodatkowo zamontowano także albedometr CM7B firmy Kipp&Zonen do pomiaru albedo oraz całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną. Nie mierzono natężenia promieniowania rozproszonego w płaszczyźnie horyzontalnej. Dane te były obliczane za pomocą empirycznego modelu opracowanego na podstawie danych aktynometrycznych z Legnicy. Model ten, stosujący w obliczeniach wskaźnik jasności atmosfery k_T, opracowano na potrzeby realizacji pracy [4].

Dane pomiarowe z pyranometrów i albedometru przesyłane były do data loggera Combilog 1020 firmy Theodor Friedrichs, zainstalowanego w szafie pomiarowej przy stanowisku badawczym modułów fotowoltaicznych. Dane z data loggera przesyłano przez przetwornik sygnału do serwera PC znajdującego się w budynku Laboratorium Fotowoltaicznego SolarLAB. Dane odczytywano z przyrządów w kroku dwusekundowym, a następnie w razie potrzeby całkowane do dłuższych przedziałów czasowych. Dane pomiarowe włączono do bazy danych parametrów meteorologicznych mierzonych w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB, dzięki czemu możliwa stała się kontrola przez Internet poprawności mierzonych wartości.

Fot. 1. Stanowisko badawcze zysków słonecznych w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB we Wrocławiu
Photo 1. Solar radiation measurement structure at Photovoltaics Laboratory SolarLAB in Wrocław

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Do bazy danych logowano również dane z nocy. Dzięki temu możliwy był pomiar dokładnie od momentu wschodu Słońca do jego zachodu. Analityczne ustalenie momentu wschodu i zachodu Słońca jest możliwe jedynie za pomocą metod przybliżonych, również warunki nieba zachmurzonego znacznie opóźniają pomiar pierwszych danych aktynometrycznych. Krótki krok czasowy pomiaru umożliwia bardzo precyzyjne określenie początku i końca wschodu i zachodu Słońca w danym dniu.

Dane gromadzone były w okresie od 24 maja do 10 grudnia 2007 r. Ponieważ standardem w pomiarach aktynometrycznych jest uśrednienie pomiaru do kroku godzinowego, napisano w tym celu specjalny całkujący program komputerowy w środowisku C++. Ostatecznie z obu pyranometrów CM21 uzyskano 5138 godzinowych danych pomiarowych, które posłużyły do statystycznej weryfikacji izotropowego modelu zysków słonecznych powierzchni zacienionej horyzontalnymi nadwieszeniami zacieniającymi.

4. Analiza statystyczna

Przeprowadzono analizę statystyczną wyników modelu izotropowego opartego na założeniach modelu Jonesa [1]. W analizie statystycznej uwzględniono następujące wskaźniki statystyczne: MBE – błąd średni, RMSE – pierwiastek błędu średniego kwadratowego, MBE [%] – względny błąd średni, RMSE [%] – pierwiastek względnego błędu średniego kwadratowego oraz CC – współczynnik korelacji. Wyniki analiz statystycznych modelu dla obu piranometrów i całej bazy danych przedstawiono w tab. 1.

Analizując dane statystyczne w tab. 1, można zaobserwować, że izotropowy model zysków słonecznych na zacienioną płaszczyznę pionową generuje małe wartości błędów statystycznych. W przypadku błędu średniego MBE model izotropowy uzyskuje korzystniejsze wartości dla pyranometru górnego, czyli dla warunków „bardziej" izotropowych. Mniejsze rozproszenie punktów teoretycznych (charakteryzowane przez pierwiastek błędu średniego kwadratowego RMSE) model ten uzyskuje dla pyranometru dolnego. Podobna sytuacja występuje również w przypadku współczynnika korelacji CC.

Tabela 1

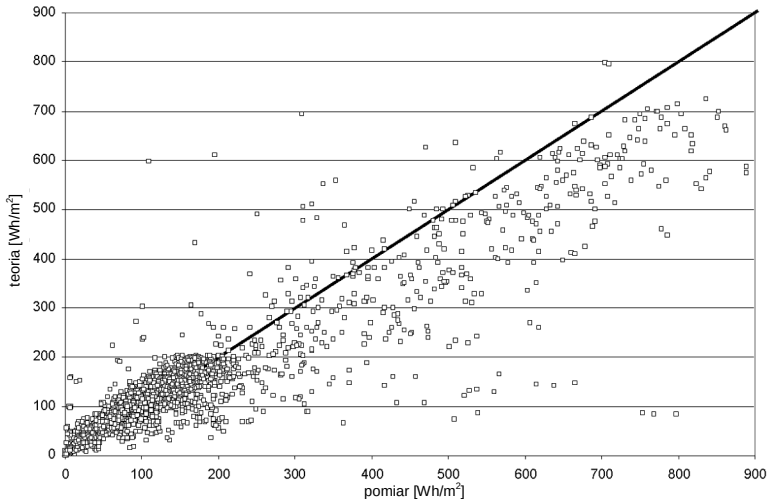
Wskaźniki statystyczne izotropowego modelu zysków słonecznych zacienionej powierzchni pionowej dla całej bazy danych pomiarowych

Baza danych pomiarowych	Liczebność bazy danych	MBE [Wh/m^2]	RMSE [Wh/m^2]	MBE [%]	RMSE [%]	CC [–]
Pyranometr góra	2569	-0,96	50,34	-1,18	61,81	0,8904
Pyranometr dół	2569	-3,10	53,53	-2,55	44,00	0,9484
Całość	5138	-2,03	51,96	-2,00	51,18	0,9315

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie danych teoretycznych, generowanych przez model izotropowy, z danymi pomiarowymi. Zaobserwowano, że w zakresie wartości pomiarowych od 0 Wh/m^2 do ok. 300 Wh/m^2, czyli głównie w warunkach nieba zachmurzonego i/lub zacienienia kopułki pyranometru, model dość dobrze odwzorowuje rzeczywistość. Dotyczy to ok. 93,25% danych. Powyżej tego zakresu model izotropowy zdecydowanie zaniża wartości natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę

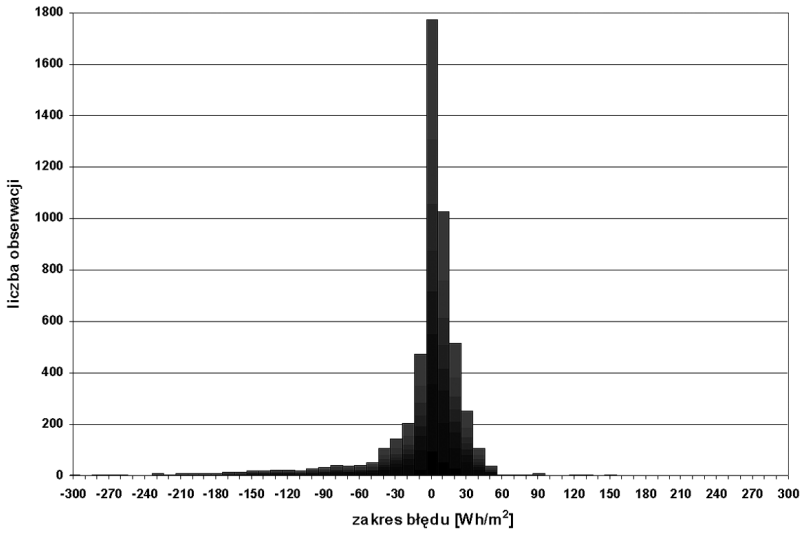
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zacienianą. Pomimo że ta sytuacja dotyczy jedynie ok. 6,75% danych, niemniej jednak może mieć duży wpływ na bardzo dobry wynik wskaźników statystycznych modelu izotropowego dla całej bazy danych (tab. 1).



Rys. 2. Porównanie wyników pomiarów całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę zacienioną nadwieszeniem horyzontalnym z wynikami izotropowego modelu zysków słonecznych

Fig. 2. A comparison of measured and theoretical data of solar radiation on a surface shaded by horizontal overhang, generated by isotropic model



Rys. 3. Histogram błędów generowanych przez model izotropowy

Fig. 3. A histogram of errors generated by isotropic model

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W celu zobrazowania rozkładu błędów, rozumianych jako różnica pomiędzy wartością teoretyczną a wartością pochodzącą z pomiaru, dla modelu izotropowego wykonano histogram błędów (rys. 3). Jako szerokość przedziału błędu przyjęto 10 Wh/m^2. Analizowano cały zakres błędów generowanych przez model, tj. od ok. –720 Wh/m^2 do ok. 600 Wh/m^2. Tak duże błędy modeli teoretycznych w stosunku do danych pomiarowych wystąpiły praktycznie pojedynczo, przez co nie prezentowano ich w skali histogramu.

Rozkład błędów dla modelu izotropowego nie jest symetryczny względem najczęściej występującej wartości w przedziale 0–10 Wh/m^2, którą zaobserwowano 1773 razy. Pierwsza najczęściej występująca ujemna wartość błędu (tj. –10–0 Wh/m^2) jest dopiero czwartą najczęściej występującą wartością (liczba obserwacji 473), co pozwala stwierdzić, że w zakresie małych błędów model izotropowy znacznie zawyża generowane wartości natężenia promieniowania słonecznego. W przypadku błędów dużych, tj. ±50 Wh/m^2, bardzo duża ich liczba występuje po stronie ujemnej, zaś po stronie dodatniej są obserwowane bardzo rzadko. Sugeruje to, że dla dużych wartości natężenia promieniowania słonecznego model izotropowy zaniża generowane dane. Potwierdza to spostrzeżenia poczynione dla rys. 2.

5. Podsumowanie

Zyski słoneczne budynku stanowią istotny element jego bilansu cieplnego w skali roku. Precyzyjne obliczanie zysków słonecznych okien niezacienionych jest obecnie możliwe ze względu na stosowanie dokładnych modeli anizotropowych natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone, w tym pionowe. Dokładność tych modeli została wielokrotnie zweryfikowana doświadczalnie.

W przypadku modeli teoretycznych natężenia promieniowania całkowitego na okno zacienione horyzontalnym nadwieszeniem wszystkie dostępne w literaturze przedmiotu modele stosują teorię izotropowości. Dodatkowo, żaden z nich nie został zweryfikowany doświadczalnie. Nie można zatem wysunąć miarodajnych wniosków o dokładności tych modeli. Prezentowana praca uzupełnia omawiany obszar wiedzy o statystyczną analizę porównawczą danych teoretycznych i pomiarowych natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę zacienianą horyzontalnym nadwieszeniem. Do analiz teoretycznych zastosowano model zaproponowany przez Jonesa [1]. Dane pomiarowe zebrano na stanowisku badawczym zlokalizowanym na terenie Laboratorium Fotowoltaicznego SolarLAB Politechniki Wrocławskiej. Analizę statystyczną przeprowadzono za pomocą standardowych wskaźników statystycznych stosowanych w podobnych analizach danych aktynometrycznych.

Za pomocą porównawczej analizy statycznej danych teoretycznych i pomiarowych natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę zacienioną stwierdzono, że opisany w artykule model izotropowy Jonesa [1] bardzo dokładnie odwzorowuje rzeczywistość dla całej bazy danych pomiarowych. Niestety, analizy rozkładu błędów (histogramy) generowanych przez prezentowany model wskazują, że dobry wynik dla całej bazy danych pomiarowych wynika z faktu redukowania się błędów dodatnich w zakresie małych natężeń promieniowania słonecznego oraz błędów ujemnych w zakresie natężeń większych (fot. 1, rys. 2). Oznacza to, że model ten może być używany do ogólnego obliczania wartości natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny zacienione w długich okresach

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

pomiarowych (zapewni to redukcję błędów generowanych przez model). Do bardziej szczegółowych analiz należałoby sformułować model anizotropowy, co postulowali już w 1991 r. Duffie i Beckman [5], a co zostało zrealizowane w pracy [4].

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006–2009 jako projekt badawczy N506 042 31/2292.

Literatura

[1] Jones R., *Effects of overhang shading of windows having arbitrary azimuth*, Solar Energy, 24, 1980, 305-312.
[2] ASHRAE, *Fundamentals Handbook*, 1997.
[3] Utzinger D., Klein S., *A method of estimating monthly average solar radiation on shaded receivers*, Solar Energy, 23, 1979, 369-378.
[4] Włodarczyk D., *Analiza wpływu fotowoltaicznych nadwieszeń zacieniających na bilans energetyczny budynku*, praca doktorska, raport serii PRE 2/08, Instytut Budownictwa, Politechnika Wrocławska, 2008.
[5] Duffie J., Beckman W., *Solar engineering of thermal processes*, 2nd edition, John Wiley&Sons, 1991.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ