

Warstwa powierzchniowa przegrody budowlanej o szczególnych właściwościach absorpcyjnych i transmisyjnych promieniowania

Magdalena Grudzińska

*Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej,
Instytut Budownictwa, e-mail: m.grudzinska@pollub.pl*

Streszczenie: Praca dotyczy dwuczęściowej warstwy zewnętrznej przegrody budowlanej. Warstwa ta składa się z płytowej izolacji komórkowej wykończonoj tynkiem z kulek szklanych. Stanowi ona izolację transparentną, pozyskującą w sposób bierny energię promieniowania słonecznego. Cele pracy są następujące: (1) Opracowanie modelu matematycznego transmisji promieniowania słonecznego przez dwuczęściową warstwę powierzchniową; (2) Wyznaczenie podstawowych parametrów fizycznych komponentów warstwy, niezbędnych do określenia zysków promieniowania słonecznego na powierzchni absorbującej; (3) Wybór optymalnych cech warstwy powierzchniowej, zapewniających jak największe zyski promieniowania zimą przy jednoczesnym ograniczeniu przegrzewania latem. Zakres pracy obejmuje: wstęp, prezentację podstawowych zależności niezbędnych w pracy, model matematyczny transmisji promieniowania przez warstwę powierzchniową, badania komponentów warstwy powierzchniowej i dyskusję otrzymanych wyników, wybór optymalnego rozwiązania warstwy powierzchniowej oraz wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: fizyka budowli, budownictwo ekologiczne, bierne systemy heliogrzewcze, izolacje transparentne.

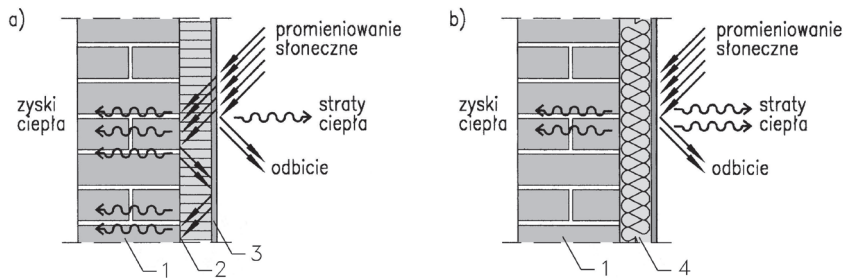
1. Wprowadzenie

W ostatnich latach wymagania ochrony cieplnej budynków ulegały stopniowemu zaostrzeniu. Jest to wynikiem dążenia do zmniejszenia zużycia energii pochodzącej ze źródeł konwencjonalnych na potrzeby centralnego ogrzewania. Najprostsze sposoby zmniejszenia strat ciepła – zwiększenie izolacyjności przegród poprzez zwiększenie grubości izolacji termicznej – mają skuteczność ograniczoną względami technologicznymi i konstrukcyjnymi. Pojawia się więc konieczność szukania i stosowania alternatywnych przegród budowlanych, umożliwiających nie tylko zmniejszenie strat ciepła, ale i zapewniających dodatkowe zyski energetyczne.

Kierunkiem badań stwarzającym szerokie możliwości w tym zakresie jest tzw. budownictwo ekologiczne, a szczególnie jego dziedziny związane z możliwościami wykorzystania energii słonecznej. Zasoby helioenergetyczne Polski są porównywalne z zasobami wielu krajów europejskich, prowadzących od lat zaawansowane badania nad możliwościami wykorzystania energii słonecznej oraz realizujących z powodzeniem projekty budowlane w ramach różnych programów wdrożeniowych. Za najbardziej obiecujące w polskich warunkach klimatycznych uważa się bierne

systemy termicznej konwersji energii promieniowania słonecznego, pozyskujące i rozprawdzające ciepło przy wykorzystaniu jedynie naturalnej konwekcji, promieniowania i przewodzenia, dzięki odpowiedniej konstrukcji budynku i jego przegród. Wieloletnie analizy działania systemów pasywnych prowadzone m. in. na Politechnice Rzeszowskiej, Śląskiej oraz Polskiej Akademii Nauk wskazują na możliwość i celowość ich stosowania dla poprawy bilansu energetycznego budynków (Kośny [9], Laskowski [10], Lichołai [11], Starakiewicz [12]).

Do systemów biernych zalicza się przegrody kolektorowo-akumulacyjne z tzw. „izolacją transparentną”, łączącą znaczną przepuszczalność promieniowania optycznego z dobrą izolacyjnością termiczną. Zasada działania izolacji przezroczystych może być porównywana z zasadą działania szklarni, przepuszczającej krótkofalowe promieniowanie słoneczne i zatrzymującej długofalowe promieniowanie ciepłe. Efektem tego jest wzrost temperatury w objętości przegrody oraz przepływ ciepła do wnętrza budynku.



Rys. 1. Zjawiska zachodzące w przegrodzie: a) z izolacją przezroczystą, b) z izolacją nieprzezroczystą. Oznaczenia: 1 – przegroda, 2 – absorber, 3 – izolacja transparentna, 4 – tradycyjna izolacja nieprzezroczysta.

Fig. 1. Energy transfer in a building compartment: a) with transparent insulation, b) with opaque insulation. Symbols: 1 – wall, 2 – absorber, 3 – transparent insulation, 4 – traditional opaque insulation.

Podstawowe grupy materiałów i wyrobów budowlanych które mogą być wykorzystane w charakterze izolacji transparentnych klasyfikuje się jako:

- elementy o układzie równoległym do powierzchni absorbera – np. równoległe warstwy szyb lub płyty z tworzyw sztucznych o komorach przebiegających wzdłuż powierzchni czołowych;
- elementy o układzie prostopadłym do powierzchni absorbera – np. płyty ze szkła lub tworzyw sztucznych, zbudowane z prostokątnych lub okrągłych komórek prostopadłych do lica elementu (tzw. płyty komórkowe);
- materiały mikroporowate – np. przezroczyste aerozele krzemionkowe o bardzo dużej porowatości (ok. 95% całej objętości stanowi powietrze).

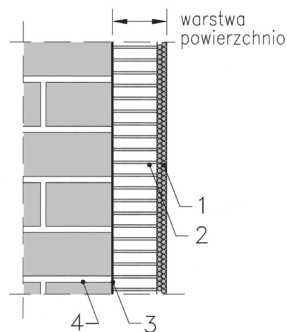
W niniejszej pracy planuje się wykorzystanie w konstrukcji warstwy powierzchniowej izolacji z płyt komórkowych o układzie prostopadłym do powierzchni absorbera. Wg badań niemieckich (Braun i Goetzberger [1]) ich skuteczność przewyższa skuteczność ścian typu Trombe'a (z izolacją o układzie równoległym) oraz systemów pasywnych wykorzystujących przeszklone przybudówki. Komórkowe płyty transparentne wytwarzane są ze szkła lub z tworzyw sztucznych o dobrej przepuszczalności promieniowania słonecznego, przede wszystkim z poliwęglanu, polietylenu lub polimetakrylanu metylu. Produkuje się je w dwóch podstawowych

rodzajach różniących się strukturą geometryczną – jako płyty kapilarne z elementów o przekroju kołowym i jako płyty typu „plaster miodu” (ulowe), z elementów o przekroju prostokątnym, kwadratowym lub heksagonalnym. Grubości ścianek wynoszą najczęściej od 20 do 100 μm , a średnice kanalików od 2 do 12 mm. Transparentne płyty komórkowe cechuje mała sztywność oraz mała odporność na uszkodzenia i oddziaływania środowiska zewnętrznego. Z tych względów wymagają one zastosowania zewnętrznej przezroczystej warstwy ochronnej, w postaci szyby lub cienkowarstwowego tynku z kulek szklanych.

Izolacje transparentne stosowane są obecnie coraz częściej w krajach Europy Zachodniej, przede wszystkim w Niemczech, Danii i Wielkiej Brytanii. Kilkuletnie analizy ich funkcjonowania potwierdzają możliwość znacznej redukcji kosztów ogrzewania metodami tradycyjnymi (nawet do 40%), lecz jednocześnie wskazują na problemy związane z zapewnieniem komfortu cieplnego i zabezpieczeniem przed przegrzewaniem budynków w okresie letnim (Dalenback [4], Stahl, Voss i Goetzberger [17], Twidell i Johnstone [21], Voss [22]).

W związku z powyższym podjęto próbę skonstruowania tzw. „inteligentnej przegrody budowlanej”, umożliwiającej absorpcję i magazynowanie energii słonecznej, a następnie przekazywanie jej do wnętrza budynku w sposób zapewniający użytkownikom komfort cieplny. Przegroda inteligentna była przedmiotem prac badawczych prowadzonych w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Politechniki Łódzkiej (Gawin, Romanowska i Klemm [5]). Podstawowe elementy składowe opracowanego tam modelu przegrody to:

- zewnętrzna warstwa powierzchniowa, będąca rodzajem izolacji transparentnej,
- powierzchnia absorbująca promieniowanie, wykonywana jako powłoka barwy czarnej,
- przegroda akumulacyjna, magazynująca ciepło i przekazująca je do wnętrza budynku.



Rys. 2. Schemat przegrody inteligentnej z analizowaną warstwą powierzchniową. Oznaczenia: 1 – zewnętrzna warstwa ochronna, 2 – płyta komórkowa, 3 – absorber, 4 – przegroda akumulacyjna.

Fig. 2. “The intelligent building compartment” with the analysed outer layer. Symbols: 1 – protective outer layer, 2 – transparent insulation, 3 – absorber, 4 – heat storage wall.

W pracy zajęto się warstwą powierzchniową złożoną z płyty komórkowej i warstwy ochronnej w postaci tynku szklanego. Rozwiązanie takie podyktowane jest to prostotą wykonania i eksploatacji (warstwa nie wymaga dodatkowej obsługi w czasie użytkowania budynku) oraz stosunkowo niskim kosztem. Do magazynowania

energii słonecznej wykorzystane zostanie ciepło przemian fazowych materiałów określanych jako fazowo-zmienne (np.: kwasy tłuszczowe, umieszczone w matrycach gipsowych, ceramicznych lub cementowych), pozwalające na akumulację znacznych ilości ciepła w niewielkiej objętości oraz przy małym wzroście temperatury materiału. Dzięki temu dobowe wahania temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody są ograniczone, co umożliwi poprawę warunków klimatycznych w pomieszczeniach.

2. Cel, tezy i zakres pracy

Cele pracy są następujące:

- a) opracowanie modelu matematycznego transmisji promieniowania słonecznego przez dwuczęściową warstwę powierzchniową,
- b) wyznaczenie podstawowych parametrów fizycznych części składowych warstwy, niezbędnych do określenia zysków promieniowania słonecznego na powierzchni absorbującej,
- c) wybór optymalnych cech warstwy powierzchniowej, zapewniających maksymalne zyski promieniowania zimą i ograniczających przegrzewanie latem.

Jako podstawowe tezy pracy przyjęto, że czynniki wpływające na zdolność transmisji promieniowania warstwy zewnętrznej to:

- a) grubość warstwy ochronnej,
- b) średnica kulek szklanych warstwy ochronnej,
- c) grubość izolacji komórkowej,
- d) szerokość kanalików izolacji komórkowej,
- e) długość fali i kąt padania promieniowania.

Praca składać się będzie z następujących części:

- a) wstęp – obejmujący ogólny opis problemu oraz proponowanego rozwiązania, sformułowanie celu, tezy i zakresu pracy,
- b) prezentacja podstawowych zależności niezbędnych w pracy – zawierająca krótki opis praw fizycznych rządzących radiacyjną wymianą ciepła oraz związanych z nimi zależności analitycznych i eksperymentalnych; w części tej przedstawiony będzie ponadto sposób wyznaczenia natężenia promieniowania słonecznego padającego na dowolną płaszczyznę w dowolnym okresie czasu i stanie zachmurzenia,
- c) model matematyczny transmisji promieniowania przez warstwę powierzchniową – stanowiący własne opracowanie autorki,
- d) badania warstwy powierzchniowej oraz dyskusja otrzymanych wyników – opisujący metody i przedstawiający w formie graficznej wyniki przeprowadzonych badań części składowych warstwy, niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń wg przedstawionego modelu,
- e) wybór optymalnego rozwiązania warstwy powierzchniowej – analizujący dzienne zyski promieniowania na powierzchni absorbującej w wybranych dniach lata i zimy, oraz określający metodą optymalizacji wielokryterialnej parametry zapewniające jak największe zyski zimą i ograniczenie nagrzewania latem,
- f) wnioski.

3. Podstawowe zależności związane z radiacyjną wymianą ciepła

Praktyczny udział w radiacyjnej wymianie ciepła wymianie bierze promieniowanie optyczne o następujących długościach fali:

1 ÷ 280 nm – krótkofalowe promieniowanie nadfioletowe (daleki nadfiolet),
 280 ÷ 315 nm – średniofalowe promieniowanie nadfioletowe (średni nadfiolet),
 315 ÷ 380 nm – długofalowe promieniowanie nadfioletowe (bliski nadfiolet),
 380 ÷ 720 nm – promieniowanie widzialne,
 720 ÷ 1400 nm – krótkofalowe promieniowanie podczerwone (bliska podczerwień),

1400 ÷ 3000 nm – średniofalowe promieniowanie podczerwone (średnia podczerwień),

3000 ÷ 1000·10³ nm – długofalowe promieniowanie podczerwone (daleka podczerwień).

Wszystkie wielkości związane z radiacyjną wymianą ciepła można definiować w odniesieniu do wąskiego przedziału długości fali od λ do $\lambda + d\lambda$ jako wielkości monochromatyczne (z indeksem „ λ ”), lub w odniesieniu do całego zakresu widma promieniowania jako wielkości panchromatyczne.

Ilość energii o danej długości fali Q_λ docierającej do powierzchni ciała w jednostce czasu t określana jest jako strumień Φ_λ :

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt} \quad (1)$$

Natężenie promieniowania monochromatycznego I_λ padającego na powierzchnię to strumień promieniowania odniesiony do jednostkowej powierzchni F :

$$I_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dF} \quad (2)$$

Strumień padający na powierzchnię może zostać pochłonięty ($\Phi_{\alpha,\lambda}$), odbity ($\Phi_{\rho,\lambda}$) lub przepuszczony ($\Phi_{\tau,\lambda}$), co opisują w sposób ogólny równania:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\alpha,\lambda} + \Phi_{\rho,\lambda} + \Phi_{\tau,\lambda} \Rightarrow 1 = \frac{\Phi_{\alpha,\lambda}}{\Phi_\lambda} + \frac{\Phi_{\rho,\lambda}}{\Phi_\lambda} + \frac{\Phi_{\tau,\lambda}}{\Phi_\lambda} \Rightarrow 1 = \alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda \quad (3)$$

gdzie: α_λ – zdolność pochłaniania (absorpcji), ρ_λ – zdolność odbijania, τ_λ – zdolność przepuszczania promieniowania o danej długości fali.

Podstawowymi parametrami opisującymi cechy optyczne materiałów są odbijalność i transmisyjność, rozpatrywane dla promieniowania krótkofalowego z zakresu 280 ÷ 3000 nm.

3.1. Odbicie promieniowania

Zdolność odbijania promieniowania przez daną powierzchnię określona jest przez jej odbijalność ρ . W zależności od zakresu widma i kierunku promieniowania padającego i odbitego, można rozróżnić następujące podstawowe rodzaje odbijalności (Sala [16]):

- odbijalność monochromatyczna w kierunku γ promieniowania padającego z kierunku θ do normalnej;

$$\rho_{\lambda,\theta,\gamma} = \frac{\Phi_{\rho,\lambda,\gamma}}{\Phi_{\lambda,\theta}} \quad (4)$$

- odbijalność monochromatyczna do półprzestrzeni promieniowania padającego z kierunku θ :

$$\rho_{\lambda,\theta} = \frac{\Phi_{\rho,\lambda}}{\Phi_{\lambda,\theta}} \quad (5)$$

- odbijalność monochromatyczna do półprzestrzeni promieniowania padającego z półprzestrzeni:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\Phi_{\rho,\lambda}}{\Phi_{\lambda}} \quad (6)$$

gdzie: Φ_{ρ} – strumień promieniowania odbitego od jednostkowej powierzchni: w całym zakresie widma lub dla danej długości fali (indeks λ), do całej półprzestrzeni lub w jednostkowym kącie bryłowym w kierunku γ (indeks γ); Φ – strumień promieniowania padającego na jednostkową powierzchnię ciała: w całym zakresie widma lub dla danej długości fali (indeks λ), z całej półprzestrzeni lub z jednostkowego kąta bryłowego z kierunku θ (indeks θ).

Analogicznie określa się wielkości odbijalności panchromatycznej: $\rho_{\theta,\gamma}$, ρ_{θ} , ρ .

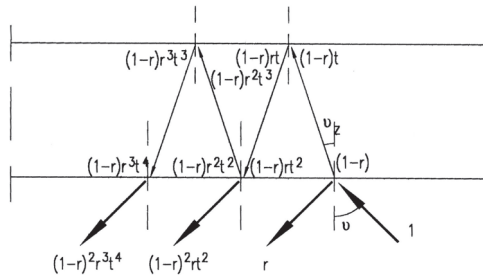
Rozkład przestrzenny strumienia promieniowania odbitego jest ściśle powiązany z długością fali i stopniem nierówności powierzchni oraz rodzajem materiału. Dla powierzchni idealnie gładkiej odbicie będzie miało charakter lustrzany, a dla powierzchni chropowatej – dyfuzyjny. Odbicie od powierzchni rzeczywistych ma charakter pośredni, opisywany jako superpozycja składowej kierunkowej $\rho_{\lambda,\theta}^s$ i dyfuzyjnej $\rho_{\lambda,\theta}^d$ (Beckmann i Spizzichino [2], Torrance i Sparrow [20]):

$$\rho_{\lambda,\theta} = \rho_{\lambda,\theta}^s + \rho_{\lambda,\theta}^d \quad (7)$$

gdzie:

$$\rho_{\lambda,\theta}^s = \frac{\Phi_{\rho,\lambda,\theta}}{\Phi_{\lambda,\theta}}, \quad \rho_{\lambda,\theta}^d = \frac{\Phi_{\rho,\lambda} - \Phi_{\rho,\lambda,\theta}}{\Phi_{\lambda,\theta}} \quad (8,9)$$

Odbijalność przezroczystej warstwy materiału o skończonej grubości będzie uzależniona od odbicia promieniowania nie tylko na górnej, ale i na dolnej powierzchni:



Rys. 3. Schemat drogi promieniowania odbijanego od warstwy materiału przezroczystego.
Fig. 3. Radiation reflected from a layer of transparent material.

Odbijalność takiej warstwy określona tzw. wzorem Stokesa jest większa niż sam współczynnik odbicia, i wynosi:

$$\begin{aligned} \rho_{\lambda,\theta} &= r_{\lambda,\theta} + (1 - r_{\lambda,\theta})^2 r_{\lambda,\theta} t_{\lambda,\theta}^2 + (1 - r_{\lambda,\theta})^2 r_{\lambda,\theta}^3 t_{\lambda,\theta}^4 + \dots = \\ &= r_{\lambda,\theta} + (1 - r_{\lambda,\theta})^2 r_{\lambda,\theta} t_{\lambda,\theta}^2 \frac{1}{1 - r_{\lambda,\theta}^2 t_{\lambda,\theta}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie: $t_{\lambda,\theta}$ – współczynnik transmisji promieniowania przez warstwę materiału o danej grubości, $r_{\lambda,\theta}$ – współczynnik odbicia promieniowania na powierzchni materiału wg wzorów Fresnela.

3.2. Transmisja promieniowania

Miarą przepuszczalności warstwy o skończonej grubości jest stosunek gęstości strumienia promieniowania wychodzącego z warstwy do gęstości strumienia promieniowania docierającego do warstwy. W zależności od zakresu widma i kierunku promieniowania padającego i transmitowanego, można rozróżnić następujące podstawowe rodzaje transmisyjności (Sala [16]):

- transmisyjność monochromatyczna całkowita (do półprzestrzeni) promieniowania kierunkowego padającego pod kątem θ :

$$\tau_{\lambda,\theta} = \frac{\Phi_{\tau,\lambda}}{\Phi_{\lambda,\theta}} \quad (11)$$

- transmisyjność monochromatyczna do półprzestrzeni promieniowania padającego z półprzestrzeni:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\Phi_{\tau,\lambda}}{\Phi_{\lambda}} \quad (12)$$

gdzie: Φ_{τ} – strumień promieniowania przepuszczonego przez jednostkową powierzchnię: w całym zakresie widma lub dla danej długości fali (indeks λ), do całej półprzestrzeni lub w jednostkowym kącie bryłowym w kierunku θ (indeks θ), Φ – strumień promieniowania padającego na jednostkową powierzchnię ciała: w całym zakresie widma lub dla danej długości fali (indeks λ), z całej półprzestrzeni lub z jednostkowego kąta bryłowego z kierunku θ (indeks θ).

Podobnie można zdefiniować przepuszczalności panchromatyczne: τ_{θ} , τ .

Wiele materiałów wykorzystywanych w inżynierii słonecznej transmituje kierunkowe promieniowanie widzialne nie tylko w postaci kierunkowej, ale też rozprasza je na powierzchniach i w całej objętości. Do opisu transmisyjności kierunkowej materiałów rozpraszających można wykorzystać współczynniki transmisyjności monochromatycznej kierunkowej oraz transmisyjności monochromatycznej dyfuzyjnej promieniowania padającego pod kątem θ :

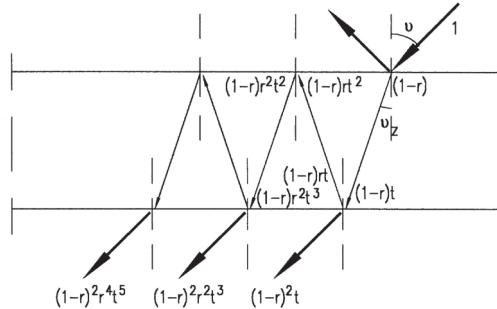
$$\tau_{\lambda,\theta}^s = \frac{\Phi_{\tau,\lambda,\theta}}{\Phi_{\lambda,\theta}}, \quad \tau_{\lambda,\theta}^d = \tau_{\lambda,\theta} - \tau_{\lambda,\theta}^s = \frac{\Phi_{\tau,\lambda} - \Phi_{\tau,\lambda,\theta}}{\Phi_{\lambda,\theta}} \quad (13,14)$$

Transmisja promieniowania w nieograniczonej objętości przezroczystego materiału jednorodnego wzdłuż drogi l jest opisana prawem Bouguera-Lamberta:

$$t_{\lambda,\theta} = \exp(-a_{\lambda}' \cdot l) \quad (15)$$

gdzie: $t_{\lambda,\theta}$ – transmisyjność promieniowania w nieograniczonej objętości materiału, a_{λ}' – liniowy współczynnik ekstynkcji uwzględniający absorpcję i rozproszenie promieniowania o danej długości fali wewnątrz materiału.

Jeśli rozpatrzmy warstwę materiału przezroczystego o skończonej grubości i pomijalnie małym rozpraszaniu wewnętrznym, to część padającego promieniowania kierunkowego zostanie odbita od górnej i dolnej powierzchni, a część pochłonięta przez warstwę.



Rys. 4. Schemat drogi promieniowania transmitowanego przez warstwę materiału przezroczystego.
Fig. 4. Radiation transmitted through a layer of transparent material.

Transmisyjność wypadkowa określona tzw. wzorem Stokesa będzie w rezultacie mniejsza niż transmisyjność samego materiału $t_{\lambda,\theta}$:

$$\tau_{\lambda,\theta} = (1 - r_{\lambda,\theta})^2 t_{\lambda,\theta} + (1 - r_{\lambda,\theta})^2 r_{\lambda,\theta}^2 t_{\lambda,\theta}^3 + \dots = t_{\lambda,\theta} \frac{(1 - r_{\lambda,\theta})^2}{1 - r_{\lambda,\theta}^2 t_{\lambda,\theta}^2} \quad (16)$$

gdzie: $t_{\lambda,\theta}$ – współczynnik transmisji promieniowania przez warstwę materiału o danej grubości, $r_{\lambda,\theta}$ – współczynnik odbicia promieniowania na powierzchni materiału wg wzorów Fresnela.

4. Podstawy fizyczne promieniowania słonecznego

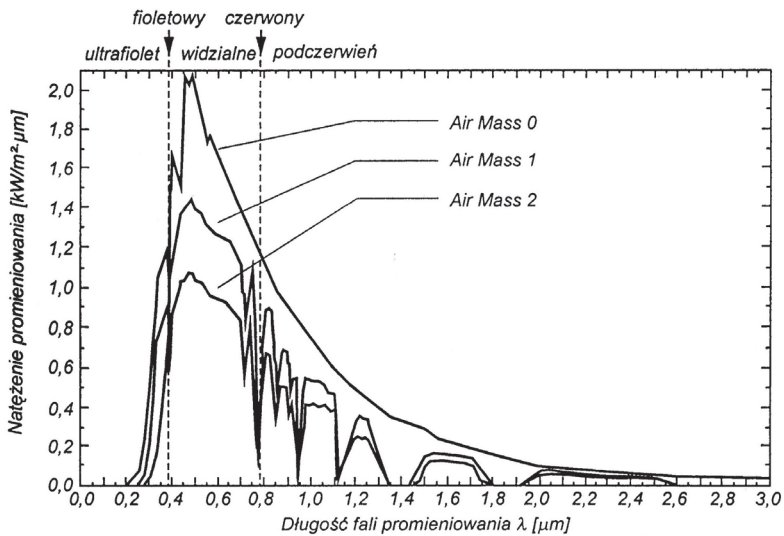
Słońce emituje promieniowanie elektromagnetyczne o bardzo szerokim zakresie długości fal, różniące się znacznie właściwościami fizycznymi. Oprócz promieniowania optycznego opisanego wyżej, w widmie słonecznym występuje promieniowanie X i γ o długościach fali < 1 nm oraz fale radiowe i mikrofały o długościach fali $> 1000 \cdot 10^3$ nm.

Gęstość strumienia energii wypromieniowanego przez Słońce w całym zakresie długości fal na powierzchnię prostopadłą do kierunku promieniowania, poza atmosferą ziemską w średniej odległości między Ziemią a Słońcem, nazywana jest stałą słoneczną. Jako obowiązującą w pracy przyjęto wartość stałej słonecznej ustaloną przez NASA-ASTM w 1970 roku dzięki pomiarom poza atmosferą ziemską, wynoszącą $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$, gdyż na takiej wartości oparty jest wykorzystywany model obliczeniowy natężenia promieniowania słonecznego.

Podczas przejścia promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską zachodzi szereg zjawisk, powodujących zmianę jego wielkości i kierunku. Gdy Słońce nie

jest zasłonięte przez chmury część promieniowania dociera do powierzchni Ziemi jako promieniowanie bezpośrednie. Traktowane jest ono jako równoległa wiązka biegnąca od Słońca do Ziemi bez zmiany kierunku, i padająca na powierzchnię Ziemi pod kątem odpowiadającym kątowi wzniesienia Słońca nad horyzontem. Część promieniowania zostaje rozproszona lub pochłonięta w atmosferze i dociera do powierzchni Ziemi ze wszystkich kierunków na powierzchni nieboskłonu. Najczęściej promieniowanie to modeluje się jako dyfuzyjne, tzn. o jednakowym widmie i strumieniu dla każdego kierunku. Założenie takie jest tym bliższe rzeczywistości, im stopień zachmurzenia jest większy.

Zarówno rozpraszanie jak i absorpcja uzależnione są od składu atmosfery oraz od drogi, jaką promienie słoneczne przebywają w atmosferze. Stosunek drogi przez atmosferę promieniowania padającego na płaszczyznę horyzontu na pewnej wysokości nad poziomem morza, do drogi promieniowania Słońca w zenicie padającego prostopadle na płaszczyznę horyzontu na poziomie morza, określa się jako masę optyczną atmosfery.



Rys. 5. Widmo bezpośredniego promieniowania słonecznego poza atmosferą Ziemi (AM0) oraz dla AM1 i AM2 standardowej atmosfery średnio zanieczyszczonej.

Fig. 5. Spectral analysis of the direct solar radiation outside the atmosphere (AM0) and for AM1 and AM2 of the standard moderately contaminated atmosphere.

5. Model promieniowania słonecznego na dowolną płaszczyznę

Model przyjęty do obliczeń opracowany został w IPPT PAN i oparty jest na analizie statystycznej danych meteorologicznych z lat 1986 – 1995, ze stacji aktynowymetrycznych w Warszawie, Sulejowie, Suwałkach, Mikołajkach, Kołobrzegu, Pile, Gdyni i Zakopanym (Owczarek [12], Owczarek [13]). Pozwala on na wyznaczenie natężenia promieniowania słonecznego na dowolną płaszczyznę w dowolnym okresie czasu i stanie zachmurzenia, w oparciu o teorię ekstynkcji i rozpraszania promieniowania słonecznego.

Wypadkowa gęstość strumienia promieniowania I_{kG} na dowolną płaszczyznę jest sumą składowych:

$$I_{kG} = I_{kB} + I_{ksD} + I_{krD} \quad (17)$$

gdzie: I_{kB} – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego, I_{ksD} – gęstość strumienia promieniowania rozproszonego, I_{krD} – gęstość strumienia promieniowania odbitego od powierzchni terenu.

Natężenie promieniowania bezpośredniego na dowolną płaszczyznę o kącie nachylenia do poziomu β_k i azymucie α_k obliczyć można jako iloczyn skalarny:

$$I_{kB} = I_k \cdot \nu_k \quad (18)$$

$$I_k = I \cdot 1[\kappa_k - 0] \cdot [\kappa_H - 0] \quad (19)$$

gdzie: ν_k – wektor normalny do płaszczyzny, I_k – wektor natężenia promieniowania słonecznego obliczany z uwzględnieniem efektu cienia własnego płaszczyzny lub cienia horyzontu, I – wektor natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi:

$$I = I^{ex} \cdot \eta_1 \quad (20)$$

$$\eta_1 = \exp(-a_0 \cdot m_a \cdot P) \quad (21)$$

gdzie: I^{ex} – wektor natężenia promieniowania poza atmosferą, η_1 – całkowity współczynnik transmitancji, a_0 – ekstynkcja panchromatyczna atmosfery idealnej, m_a – masa optyczna atmosfery, P – współczynnik zanieczyszczenia atmosfery, przyjęty w postaci szeregu o współczynnikach P_i , $i = 1...6$, wyznaczanych na podstawie danych meteorologicznych dla kolejnego dnia roku d :

$$P = P_1 - P_2 \cos(w) - P_3 \cos(2w) + P_4 \cos(3w) + P_5 \sin(w) + P_6 \sin(2w) \quad (22)$$

$$w = d \frac{360}{365}$$

Natężenie promieniowania rozproszonego padającego na dowolną płaszczyznę I_{ksD} oblicza się jako iloczyn:

$$I_{ksD} = Z_H^{ex} \cdot \eta_{2,3} \cdot R_k \quad (23)$$

gdzie: $\eta_{2,3}$ - całkowity współczynnika transmitancji promieniowania rozproszonego zależny od stopnia zachmurzenia, opisany szeregiem potęgowym którego stałe określone są na podstawie danych meteorologicznych, Z_H^{ex} - pionowa składowa natężenia promieniowania bezpośredniego poza atmosferą, R_k - współczynnik uwzględniający wielkość wycinka półkuli nieboskłonu „widzianego” przez nachyloną płaszczyznę:

$$R_k = \frac{1 + \cos \beta_k}{2} \quad (24)$$

Natężenie promieniowania rozproszonego odbitego od terenu padającego na dowolną płaszczyznę I_{krD} oblicza się jako iloczyn:

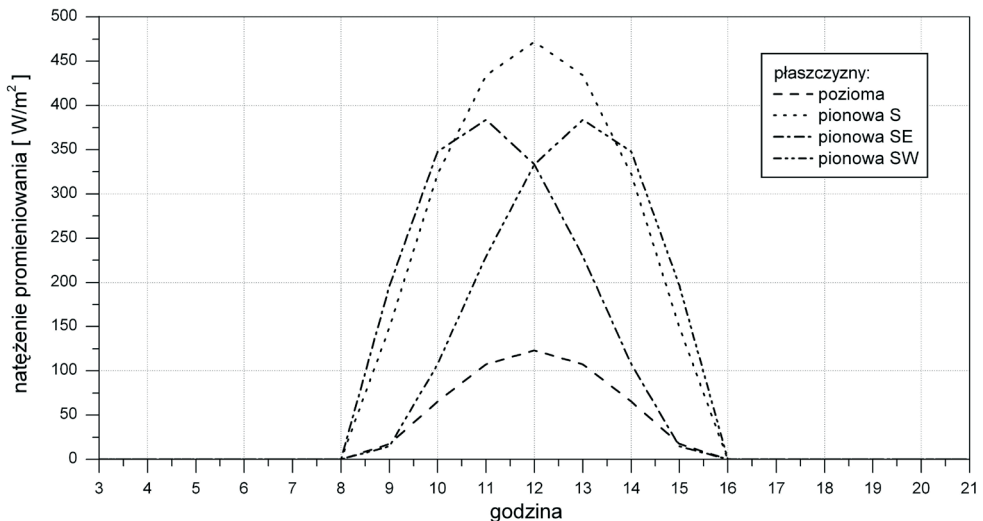
$$I_{krD} = (I_{sD} + Z_H)\rho_g(1 - R_k) \quad (25)$$

gdzie: I_{sD} – natężenie promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę poziomą, Z_H – pionowa składowa natężenia promieniowania bezpośredniego, ρ_g – współczynnik odbijalności otoczenia.

Na potrzeby analizy optymalizacyjnej obliczono natężenie promieniowania bezpośredniego i rozproszonego na płaszczyznach: poziomą, pionową skierowaną na południe, południowy wschód i południowy zachód, przy następujących założeniach:

- lokalizacja: Warszawa, szerokość geograficzna $\phi = 52^\circ$, wysokość nad poziomem morza $z = 0,1$ km,
- czas: 27 VI – 178 dzień roku, 26 XII – 360 dzień roku (dni o największym i najmniejszym natężeniu promieniowania na płaszczyznę poziomą), godziny od wschodu do zachodu Słońca,
- warunki atmosferyczne – ciśnienie $b = 1000$ hPa, niebo bezchmurne i w stanie pełnego zachmurzenia,
- teren otaczający budynek: czerwiec – roślinność sucha $\rho_g = 0,33$, grudzień – śnieg zleżały, $\rho_g = 0,46$,
- usytuowanie płaszczyzn:
 - płaszczyzna pozioma $\beta_k = 0^\circ$,
 - płaszczyzna pionowa skierowana na południe $\beta_k = 90^\circ$, $\alpha_k = 0^\circ$,
 - płaszczyzna pionowa skierowana na południowy wschód $\beta_k = 90^\circ$, $\alpha_k = -45^\circ$,
 - płaszczyzna pionowa skierowana na południowy zachód $\beta_k = 90^\circ$, $\alpha_k = 45^\circ$.

Przykładowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.

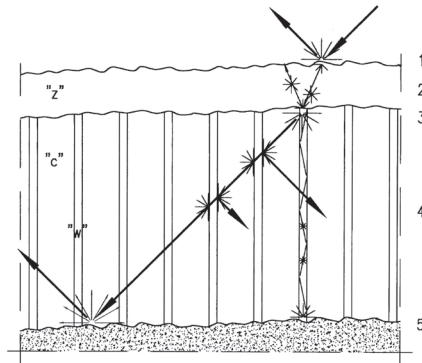


Rys. 6. Wartości chwilowe natężenia promieniowania bezpośredniego w stanie nieba bezchmurnego, 26 XII.

Fig. 6. Instantaneous direct irradiance on horizontal and vertical surfaces for the cloudless sky, 26 XII.

6. Model matematyczny transmisji promieniowania słonecznego przez warstwę powierzchniową

Własny model matematyczny transmisji promieniowania słonecznego, opracowany na potrzeby niniejszej pracy, uwzględniać będzie zjawiska zachodzące podczas przejścia promieniowania przez elementy składowe warstwy powierzchniowej: warstwę zewnętrzną i płytową izolację komórkową. Ponieważ transmisyjność warstwy zewnętrznej wyznaczona zostanie doświadczalnie, w analizach pominięto jej strukturę wewnętrzną (transmisję i rozproszenie w układzie kulki – spoiwo) opisując zdolność przepuszczania promieniowania współczynnikami makroskopowymi. Transmisyjność płytowej izolacji komórkowej określona zostanie analitycznie, w oparciu o cechy materiału ścianek i zasady optyki geometrycznej.



Rys. 7. Schemat przenikania promieniowania przez płytę transparentną z tynkiem szklanym.
Fig. 7. Radiation transmission through the transparent panel and glass protective layer.

Podczas przejścia promieniowania przez warstwę powierzchniową ma miejsce:

- Warstwa „1” – górna powierzchnia przegrody (powietrze – tynk) – odbicie na zewnątrz w postaci kierunkowej i rozproszonej, załamanie oraz rozproszenie do wewnątrz, absorpcja promieniowania na powierzchni,
- Warstwa „2” – wewnątrz tynku przezroczystego – rozpraszanie, pochłanianie, transmisja (w postaci kierunkowej i rozproszonej), wielokrotne odbicia i rozproszenie na obu wewnętrznych powierzchniach styku warstwy z powietrzem,
- Warstwa „3” – dolna powierzchnia tynku (tynk – izolacja płytowa) – załamanie i rozproszenie na zewnątrz, odbicie od powierzchni czołowej płyty komórkowej,
- Warstwa „4” – płyta transparentna – transmisja promieniowania (w postaci kierunkowej i rozproszonej) padającego na boczne powierzchnie ścianek oraz na powierzchnię górną płyty, odbijanie promieniowania (w postaci kierunkowej i rozproszonej) padającego na boczne powierzchnie ścianek izolacji transparentnej, absorpcja, rozpraszanie i odbicia wewnętrzne w materiale ścianek,
- Warstwa „5” – powierzchnia przegrody – absorpcja na powierzchni, odbicie wstecz w postaci kierunkowej i rozproszonej do obszaru płyty transparentnej.

Model transmisyjności całej warstwy powierzchniowej opracowano przyjmując następujące założenia: (1) powierzchnia warstwy jest nieskończenie wielka, (2) wiązka promieniowania padającego na górną powierzchnię warstwy pod kątem θ jest idealnie równoległa, (3) absorpcyjność materiału ścianek przyjęto jako pomijalnie małą, (4) założono idealną geometrię płyty komórkowej: równoległe ścianki o jednakowej grubości, brak odchylenia osi komórek od kierunku pionowego, brak

uszkodzeń krawędzi lub zanieczyszczeń ścianek, (5) rozproszenie promieniowania w objętości płyty ma charakter izotropowy, (6) dolna powierzchnia warstwy przylega do powierzchni idealnie czarnej, pochłaniającej w całości padające na nią promieniowanie, (7) transmisyjność wypadkową całej warstwy określono jako średnią ważoną transmisyjności warstwy zewnętrznej i układu komórek oraz warstwy zewnętrznej i materiału ścianek. (8) transmisyjność i odbijalność warstwy zewnętrznej oraz materiału ścianek płyty opisują makroskopowe współczynniki uwzględniające wielokrotne odbicia wewnętrzne w objętości elementu (analogiczne do wzorów Stokesa), rozpatrywane jako superpozycja dwu składowych – kierunkowej i dyfuzyjnej.

Transmisyjność wypadkowa τ_θ całego układu jest wyznaczana jako:

$$\tau_\theta = \frac{\tau_\theta^I + f_w \cdot \tau_\theta^{II}}{1 + f_w} \quad (26)$$

gdzie: τ_θ^I – transmisyjność promieniowania kierunkowego padającego pod kątem θ przez warstwę zewnętrzną i układ komórek, τ_θ^{II} – transmisyjność promieniowania kierunkowego padającego pod kątem θ przez warstwę zewnętrzną i materiał ścianek płyty komórkowej, f_w – względna powierzchnia przekroju poprzecznego ścianek.

Transmisyjność τ_θ^I obliczono jako sumę składowych:

$$\begin{aligned} \tau_\theta^I &= (\tau_{z1,\theta}^s) \tau_{c,\theta} + (\tau_{z1,\theta}^d) \tau_c + (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{c,\theta}^{d'} \rho_{z3}) \tau_c + (\tau_{z1,\theta}^d \tau_c' \rho_{z3}) \tau_c + \\ &+ (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{c,\theta}^{d'} \rho_{z3} \tau_c' \rho_{z3}) \tau_c + (\tau_{z1,\theta}^d \tau_c' \rho_{z3} \tau_c' \rho_{z3}) \tau_c + \dots = \\ &= (\tau_{z1,\theta}^s) \tau_{c,\theta} + (\tau_{z1,\theta}^d) \tau_c + (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{c,\theta}^{d'} + \tau_{z1,\theta}^d \tau_c') \frac{\rho_{z3} \tau_c}{1 - \tau_c' \rho_{z3}} \end{aligned} \quad (27)$$

gdzie: $\tau_{z1,\theta}^s$ – transmisyjność promieniowania w postaci kierunkowej przez warstwę zewnętrzną, $\tau_{z1,\theta}^d$ – transmisyjność promieniowania w postaci dyfuzyjnej przez warstwę zewnętrzną, $\tau_{c,\theta}$ – transmisyjność całkowita (kierunkowa i dyfuzyjna) promieniowania kierunkowego przez komórki izolacji, τ_c – transmisyjność promieniowania z półprzestrzeni przez komórki izolacji, $\tau_{c,\theta}^{d'}$ – składowa promieniowania rozpraszane wstecz przez komórki izolacji pochodząca od transmitowanego promieniowania kierunkowego, obliczana przy założeniu izotropowości promieniowania rozproszonego w objętości płyty, τ_c' – składowa promieniowania rozpraszane wstecz przez komórki izolacji, pochodząca od transmitowanego promieniowania rozproszonego, ρ_{z3} – odbijalność promieniowania z półprzestrzeni przez spodnią część warstwy zewnętrznej.

Transmisyjność τ_θ^{II} obliczono jako sumę składowych:

$$\begin{aligned} \tau_\theta^{II} &= (\tau_{z1,\theta}^s) \tau_{w,\theta} + (\tau_{z1,\theta}^d) \tau_w + (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{w,\theta}^{d'} \rho_{z3}) \tau_w + (\tau_{z1,\theta}^d \tau_w' \rho_{z3}) \tau_w + \\ &+ (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{w,\theta}^{d'} \rho_{z3} \tau_w' \rho_{z3}) \tau_w + (\tau_{z1,\theta}^d \tau_w' \rho_{z3} \tau_w' \rho_{z3}) \tau_w + \dots = \\ &= (\tau_{z1,\theta}^s) \tau_{w,\theta} + (\tau_{z1,\theta}^d) \tau_w + (\tau_{z1,\theta}^s \tau_{w,\theta}^{d'} + \tau_{z1,\theta}^d \tau_w') \frac{\rho_{z3} \tau_w}{1 - \tau_w' \rho_{z3}} \end{aligned} \quad (28)$$

gdzie: $\tau_{w,\theta}$ – transmisyjność całkowita (kierunkowa i dyfuzyjna) promieniowania kierunkowego przez materiał izolacji, τ_w – transmisyjność promieniowania z półprzestrzeni przez materiał izolacji, $\tau_{w,\theta}^{d'}$ – składowa promieniowania rozpraszane wstecz przez materiał izolacji pochodząca od transmitowanego promieniowania

kierunkowego, obliczana przy założeniu izotropowości promieniowania rozproszonego w materiale, τ_w – składowa promieniowania rozproszonego wstecz przez materiał izolacji, pochodząca od transmitowanego promieniowania rozproszonego, ρ_{z3} – odbijalność promieniowania z półprzestrzeni przez spodnią część warstwy zewnętrznej.

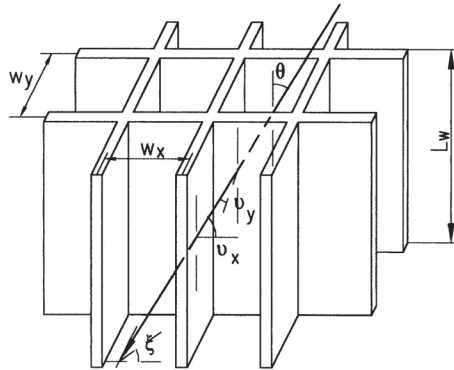
Aby obliczyć transmisyjność warstwy konieczne jest wyznaczenie parametrów warstwy zewnętrznej i izolacji komórkowej. Transmisyjność i odbijalność warstwy zewnętrznej (τ_{z1,θ^s} , τ_{z1,θ^d} , ρ_{z3}) wyznaczono doświadczalnie, a transmisyjność izolacji komórkowej obliczono wykorzystując model matematyczny Hollandsa, zmodyfikowany na potrzeby pracy w sposób umożliwiający analizę trójwymiarową w pełnym zakresie kątów padania promieniowania (Hollands, Iynkaran, Ford i Platzer [6], Hollands, Marshall i Wedel [7], Hollands, Raithby, Russel i Wilkison [8]). Umożliwia on wyznaczenie transmisyjności płyt o zadanej geometrii w oparciu o transmisyjność i odbijalność pojedynczej warstwy materiału ścianek, określone eksperymentalnie.

Liczba przecinanych ścianek w kierunkach x i y wynosi odpowiednio:

$$m_x = \frac{l_w}{w_x} \operatorname{tg} \theta \cos \zeta, \quad m_y = \frac{l_w}{w_y} \operatorname{tg} \theta \sin \zeta \quad (29)$$

Kąty padania promieniowania na ścianki komórek określone są jako:

$$\cos \vartheta_x = \sin \theta \cos \zeta, \quad \cos \vartheta_y = \sin \theta \sin \zeta \quad (30)$$



Rys. 8. Przenikanie promieniowania przez trójwymiarową izolację ulową.

Fig. 8. Radiation transmission through three-dimensional honeycomb insulation.

Odbijalność materiału z którego wykonane są ścianki (w funkcji kąta padania promieniowania θ) rozpatruje się jako superpozycję dwu składowych – odbijalności kierunkowej ρ_{1,θ^s} i dyfuzyjnej ρ_{1,θ^d} , wg wzoru:

$$\rho_{1,\theta} = \rho_{1,\theta^s} + \rho_{1,\theta^d} \quad (31)$$

Transmisyjność określa się analogicznie – jako sumę transmisyjności kierunkowej τ_{1,θ^s} i dyfuzyjnej τ_{1,θ^d} :

$$\tau_{1,\theta} = \tau_{1,\theta^s} + \tau_{1,\theta^d} \quad (32)$$

Ze względu na powtarzalność geometrii izolacji typu „plaster miodu”, fotony odbite i przepuszczone w danym punkcie mają statystycznie taką samą historię odbić i przejść przez ścianki komórek. Dla określenia transmisyjności całej płyty wystarczy określić transmisyjność pojedynczej komórki o nieprzezroczystych, adiabacyjnych ściankach, których grubość równa jest połowie grubości rzeczywistej. Efektywna odbijalność dyfuzyjna i kierunkowa ścianki dane są wzorami:

$$\rho_{1,e}^s = \rho_{1,\vartheta}^s + \tau_{1,\vartheta}^s, \quad \rho_{1,e}^d = \rho_{1,\vartheta}^d + \tau_{1,\vartheta}^d \quad (33, 34)$$

Materiał ścianek potraktowano jako tworzywo szare, o stałych własnościach optycznych w funkcji długości fali. Składowe $\rho_{1,\vartheta}^s$ i $\tau_{1,\vartheta}^s$ wynoszą wtedy (wg wzorów Stokesa i Fresnela):

$$\rho_{1,\vartheta}^s = r_\vartheta + (1 - r_\vartheta)^2 t_\vartheta^2 \frac{1}{1 - r_\vartheta^2 t_\vartheta^2} \quad (35)$$

$$\tau_{1,\vartheta}^s = (1 - r_\vartheta)^2 t_\vartheta \frac{1}{1 - r_\vartheta^2 t_\vartheta^2} \quad (36)$$

$$r_\vartheta = 0,5 \cdot \left(\frac{\sin^2(\vartheta - \vartheta_z)}{\sin^2(\vartheta + \vartheta_z)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\vartheta - \vartheta_z)}{\operatorname{tg}^2(\vartheta + \vartheta_z)} \right), \quad \frac{\sin \vartheta}{\sin \vartheta_z} = n \quad (37)$$

$$t_\vartheta = \exp \left(- \frac{na'd}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \vartheta}} \right) \quad (38)$$

gdzie: n – względny współczynnik załamania materiału ścianek, ϑ_z – kąt załamania promieniowania na granicy ośrodków, d – grubość ścianek, a' – liniowy współczynnik ekstynkcji promieniowania przechodzącego przez materiał ścianki, obejmujący rozpraszanie k_s' i absorpcję k_a' wewnątrz ścianki, określony na podstawie pomiarów transmisyjności i odbijalności kierunkowej dyfuzyjnej i całkowitej promieniowania padającego pod kątem 0° :

$$a' = k_s' + k_a' \quad (39)$$

Na podstawie powyższych zależności poszczególne transmisyjności składowe płyty wyznaczono jako:

$$\tau_{c,\theta} = (\rho_{1x,e}^s + 0,5(1 - \rho_{1x,e}^s))^{mx} \cdot (\rho_{1y,e}^s + 0,5(1 - \rho_{1y,e}^s))^{my} \quad (40)$$

$$\tau_c = \int_{\square} \tau_{c,\theta} d\theta \quad (41)$$

$$\tau_{c,\theta}^d = \tau_{c,\theta} - \tau_{c,\theta}^s, \quad \tau_{c,\theta}^s = (\rho_{1x,e}^s)^{mx} \cdot (\rho_{1y,e}^s)^{my} \quad (42)$$

$$\tau_c^d = \int_{\square} \tau_{c,\theta}^d d\theta \quad (43)$$

$$\tau_{w,\theta} = (1 - r_\theta^s)^2 e^{-a'lw'} + 0,5(1 - e^{-a'lw'}) (1 - r_\theta^s) \quad (44)$$

$$\tau_w = \int_{\square} \tau_{w,\theta} d\theta \quad (45)$$

$$\tau_{w,\theta}^{d'} = 0,5(1 - e^{-a'l_w'}) (1 - r_\theta') \quad (46)$$

$$\tau_w' = \int_{\Omega} \tau_{w,\theta}^{d'} d\theta \quad (47)$$

gdzie: r_θ' – odbijalność promieniowania na górnej i dolnej krawędzi ścianek wg wzorów Fresnela, l_w' – droga promieniowania wewnątrz ścianki, uwzględniająca wielokrotne odbicia na płaszczyznach bocznych:

$$l_w' = \frac{l_w \cdot n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (48)$$

Ilość promieniowania pochłanianego przez powierzchnię absorbera określa tzw. współczynnik transmisyjno-absorpcyjny ($\tau\alpha$). Uwzględnia on pochłanianie i odbijanie promieniowania przez elementy izolacji, a także wielokrotne odbicia od powierzchni absorbera i wewnętrznej powierzchni przeszklenia. Współczynnik transmisyjno-absorpcyjny dla przegrody z izolacją transparentną oraz chropowatą warstwą zewnętrzną można obliczyć jako (Symons [19]):

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau_\theta \alpha}{1 - (1 - \alpha)(\tau_{hc})^2 \rho_{z3}} \quad (49)$$

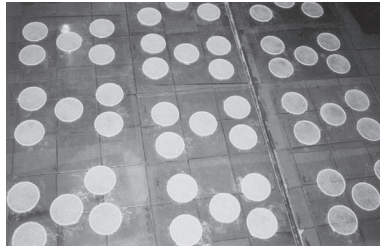
gdzie: τ_{hc} – transmisyjność płyty komórkowej dla promieniowania padającego z półprzestrzeni:

$$\tau_{hc} = \int_{\Omega} \frac{\tau_{c,\theta} + f_w \cdot \tau_{w,\theta}}{1 + f_w} \quad (50)$$

Jeżeli zdolność pochłaniania powierzchni absorbującej jest bliska 1, współczynnik transmisyjno-absorpcyjny jest w przybliżeniu równy transmisyjności τ_θ .

7. Badania elementów warstwy powierzchniowej

Próbki wykonano z kulek szklanych o różnych średnicach, wykorzystując frakcje rozdzielone podczas analizy sitowej: 200-315 μm (2-3), 315-400 μm (3-4), 400-630 μm (4-6), 630-800 μm (6-8). Połączono je ze sobą przy pomocy bezbarwnej i przezroczystej żywicy epoksydowej. Wykonano łącznie 72 próbki, o grubościach 1, 2 i 3 mm oraz różnych granulacjach mikrokulek szklanych. Próbki oznaczono symbolami (np. 23101), w których dwie pierwsze cyfry oznaczają granulację kulek szklanych, trzecia cyfra – grubość próbki, a dwie ostatnie cyfry – numer kolejnej próbki.



Rys. 9. Próbki warstwy tynku szklanego.

Fig. 9. Samples of the outer layer.

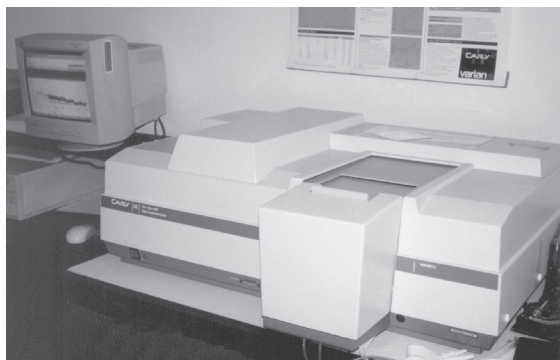
7.1. Badania cech związanych z konwersją energii promieniowania słonecznego

W ramach pracy przeprowadzono badania elementów składowych pozwalające na ocenę ich przydatności do wykonania warstwy powierzchniowej oraz następujące badania zewnętrznej warstwy ochronnej niezbędne do wyznaczenia transmisyjności całej warstwy powierzchniowej:

- transmisyjność kierunkowa dla kątów padania promieniowania 0° , 20° , 40° , 60° , 80° ,
- transmisyjność całkowita dla kąta padania promieniowania 0° ,
- odbijalność całkowita dla kąta padania promieniowania 0° .

Wielkości pomierzono w funkcji długości fali w zakresie od 299 nm do 2000 nm, co 1 nm. Zakres ten obejmuje średni i bliski nadfiolet (do 380 nm), promieniowanie widzialne ($380 \div 720$ nm) oraz bliską i średnią podczerwień (powyżej 720 nm), a więc przedziały widma najbardziej istotne z punktu widzenia fototermicznej konwersji energii promieniowania słonecznego.

Pomiary transmisyjności i odbijalności przeprowadzono przy użyciu spektrofotometru typu Cary 5E, pozwalającego na określenie transmisyjności i odbijalności próbek materiałów przezroczystych.



Rys. 10. Spektrofotometr typu Cary 5E, z przodu komora do umieszczania próbek.

Fig. 10. Spectrophotometer Cary 5E, in the front – the chamber for the samples.

Podstawowymi elementami układu pomiarowego są:

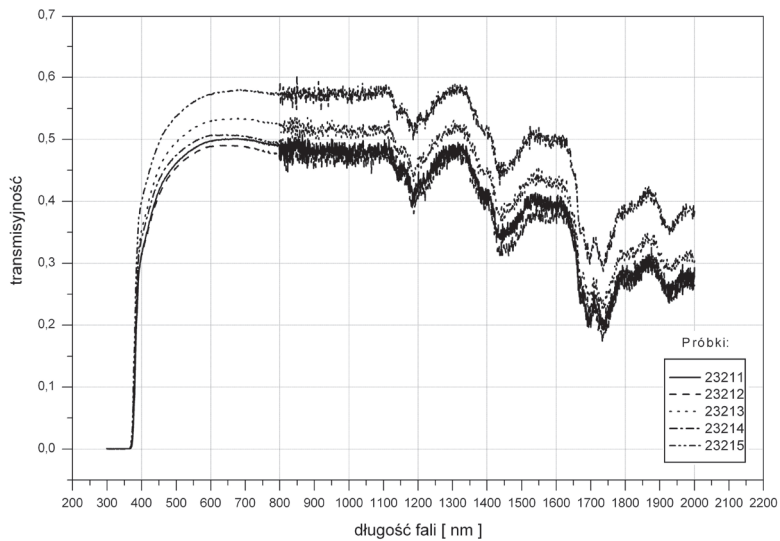
- Źródła promieniowania wraz z układem kierującym wiązkę na powierzchnię próbki – lampa: deuterowa, pracująca w zakresie długości fali od 175 nm do 300 nm, oraz lampa jodowo-kwarcowa, pracująca w zakresie od 300 nm do 3300 nm.
- Komora do umieszczania próbek, o wewnętrznych powierzchniach pokrytych materiałem o wysokim współczynniku pochłaniania promieniowania.
- Miernik natężenia promieniowania (kierunkowego i rozproszonego), przechodzącego lub odbitego przez próbkę. Układ detekcyjny stanowią dwa detektory: fotopowielacz pracujący w zakresie nadfioletu i światła widzialnego (od 175 nm do 800 nm), oraz detektor z siarczku ołowiu pracujący w podczerwieni (od 800 nm do 3300 nm). Transmisyjność i odbijalność do półprzestrzeni mierzone są za pomocą sfery całkującej, stanowiącej wyposażenie dodatkowe spektrofotometru.

- d) Układ analizujący dane pomiarowe – mikrokomputer połączony ze spektrofotometrem, umożliwiającą pozyskiwanie, przetwarzanie i przechowywanie danych pomiarowych.

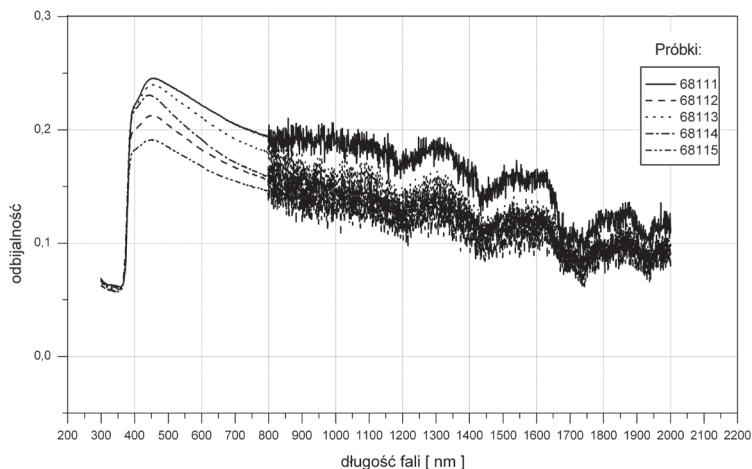
7.2. Dyskusja wyników badań

Badania materiałów składowych wykazały ich wysoką transmisyjność, przede wszystkim dla długości fali z zakresu promieniowania widzialnego, co wskazuje na przydatność do wykonania poszukiwanej warstwy powierzchniowej.

Przykładowe wyniki badań cech optycznych próbek warstwy zewnętrznej w funkcji długości fali przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11. Transmisyjność całkowita próbek dla kąta padania promieniowania 0° .
Fig. 11. Total transmissivity of samples for the radiation incidence 0° .



Rys. 12. Odbijalność całkowita próbek dla kąta padania promieniowania 0° .
Fig. 12. Total reflectivity of samples for the radiation incidence 0° .

Wielkości mierzone w funkcji długości fali uśredniono wg ogólnego wzoru:

$$\tau = \frac{\int_{299}^{2000} \tau_{\lambda} d\lambda}{\int_{299}^{2000} d\lambda} . \quad (51)$$

Pozwoliło to na bardziej przejrzystą analizę cech warstwy zewnętrznej w funkcji grubości próbek i granulacji kulek szklanych. Dla mierzonych wielkości dobrano krzywe regresji metodą najmniejszych kwadratów. Równanie ogólne krzywych przyjęto w postaci: $y = y_0 + A \cdot \exp(-x/t)$, analogicznej do równań fizycznych opisujących zjawiska transmisji i odbicia promieniowania. Przykładowe wyniki pomiarów transmisyjności kierunkowej i do półprzestrzeni w funkcji grubości próbek i granulacji kulek szklanych przedstawiają rysunki 13 i 14.

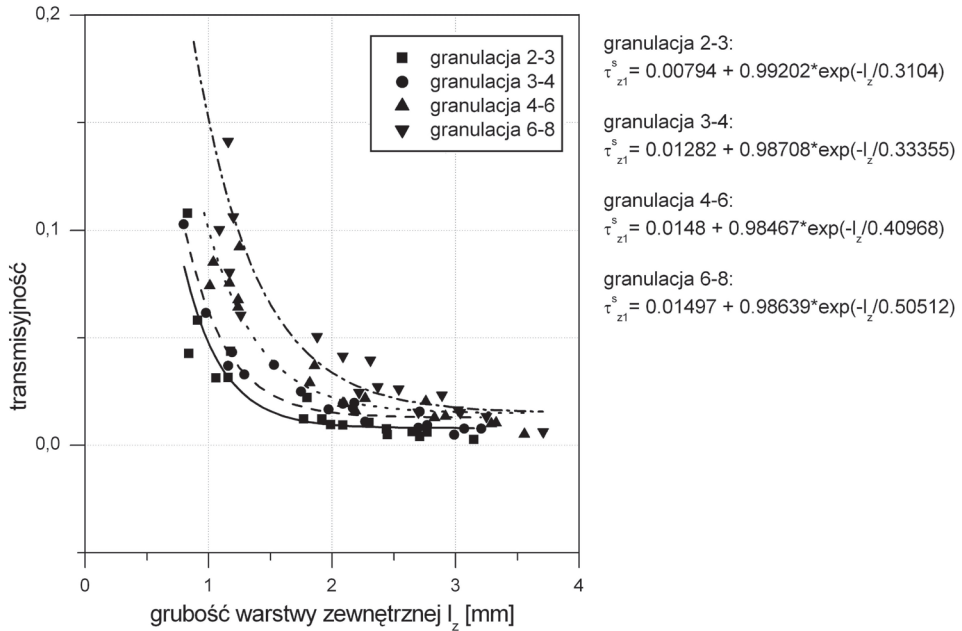
Na podstawie wyników badań transmisyjności kierunkowej $\tau_{z1,0^\circ}$ oraz transmisyjności do półprzestrzeni $\tau_{z1,0^\circ}$ stwierdzono, że:

- transmisyjność maleje wraz ze wzrostem grubości próbek dla wszystkich granulacji kulek szklanych,
- transmisyjność kierunkowa maleje szybciej dla grubości do 1,5 mm; powyżej 1,5 mm zmniejszenie transmisyjności wraz ze wzrostem grubości następuje w mniejszym tempie,
- spadek transmisyjności do półprzestrzeni jest równomierny w całym badanym przedziale grubości próbek,
- transmisyjność rośnie wraz ze wzrostem średnicy kulek szklanych dla wszystkich grubości próbek,
- przyrost transmisyjności kierunkowej próbek o różnej granulacji jest tym większy, im mniejsza ich grubość, a przyrost transmisyjności do półprzestrzeni jest w przybliżeniu stały i niezależny od grubości próbek,
- transmisyjność wszystkich próbek maleje wraz ze wzrostem kąta padania promieniowania.

Przykładowe wyniki pomiarów odbijalności do półprzestrzeni $\rho_{z3,0^\circ}$ oraz krzywe regresji dla kąta padania promieniowania 0° w funkcji grubości próbek i granulacji kulek szklanych przedstawia rysunek 15.

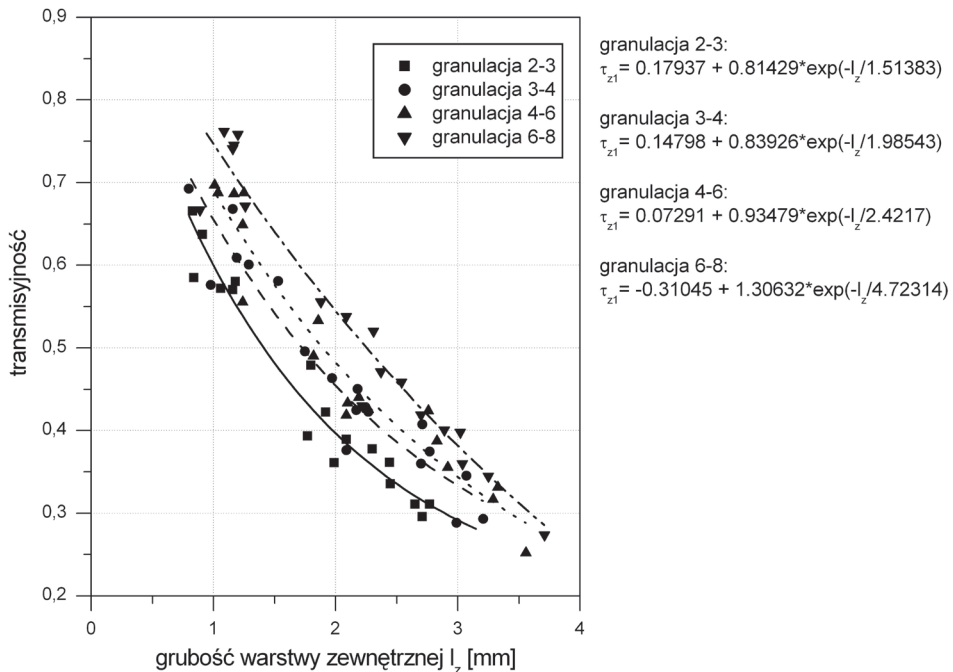
Na podstawie badań odbijalności do półprzestrzeni $\rho_{z3,0^\circ}$ można stwierdzić, że:

- odbijalność rośnie wraz ze wzrostem grubości próbek dla wszystkich granulacji kulek szklanych,
- tempo spadku odbijalności nieznacznie rośnie dla grubości próbek mniejszych niż 1,5 mm,
- odbijalność maleje wraz ze wzrostem średnicy kulek szklanych dla wszystkich grubości próbek,
- różnica pomiędzy odbijalnościami próbek o różnych granulacjach jest w przybliżeniu stała w całym badanym przedziale grubości.



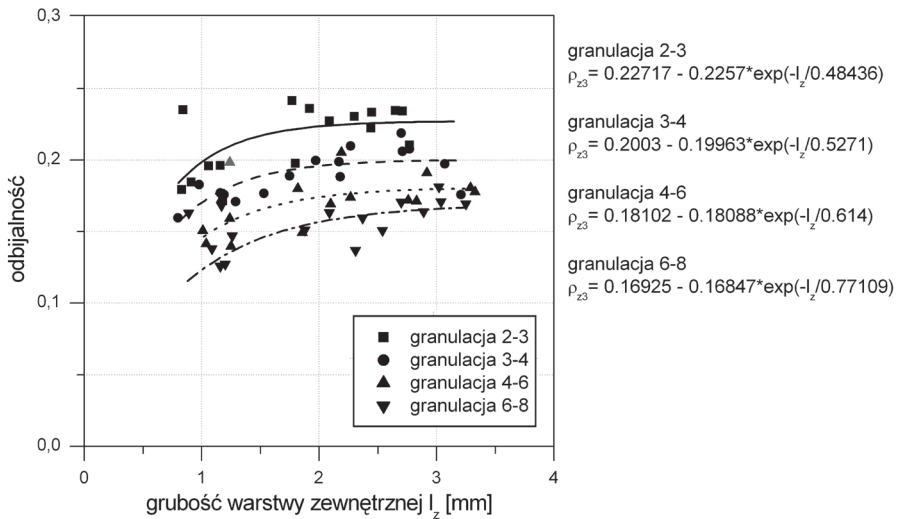
Rys. 13. Transmisyjność promieniowania kierunkowego w postaci kierunkowej dla kąta padania promieniowania 0° .

Fig. 13. Direct transmissivity of the direct radiation for the radiation incidence 0° .



Rys. 14. Transmisyjność promieniowania kierunkowego do półprzestrzeni dla kąta padania promieniowania 0° .

Fig. 14. Hemispherical transmissivity of the direct radiation for the radiation incidence 0° .



Rys. 15. Odbijalność promieniowania kierunkowego do półprzestrzeni dla kąta padania promieniowania 0° .

Fig. 15. Hemispherical reflectivity of the direct radiation for the radiation incidence 0° .

8. Wybór optymalnego rozwiązania warstwy powierzchniowej

W obliczeniach transmisyjności analizowanej warstwy powierzchniowej przyjęto następujące założenia:

- grubość zewnętrznej warstwy ochronnej zmienia się od 1 do 3 mm, a granulacje kulek szklanych wynoszą: 200-315 μm , 315-400 μm , 400-630 μm , 630-800 μm ,
- transmisyjność i odbijalność warstwy zewnętrznej określono na podstawie wyników badań,
- izolacja komórkowa wykonana jest z folii akrylowej gr. 31 μm ; względny współczynnik załamania promieniowania przyjęto stały w całym zakresie widma i równy 1,48, a współczynnik ekstynkcji folii obliczony wg wzoru Stokesa wynosi 0,266 1/mm,
- szerokość komórek płyty zmienia się w zakresie od 2 do 10 mm a grubość od 60 do 120 mm; ograniczenie wymiarów podyktowane jest koniecznością ograniczenia strat ciepła z powierzchni absorbera,
- powierzchnię absorbera przyjęto jako idealnie czarną, pochłaniającą w całości padające na nią promieniowanie; przy takim założeniu obliczona transmisyjność jest równa współczynnikowi transmisyjno-absorpcyjnemu.

W celu obliczenia transmisyjności promieniowania słonecznego przez warstwę powierzchniową niezbędna jest znajomość cech warstwy zewnętrznej dla dowolnego kąta padania promieniowania. Ograniczenia aparatury pomiarowej pozwoliły jedynie na wyznaczenie transmisyjności kierunkowej dla kątów padania większych od 0° . Aby określić transmisyjność całkowitą dla dowolnego kąta wykorzystano zależność potwierdzoną badaniami (Burek, Horton i Probert, 1989), i przyjęto stosunek transmisyjności kierunkowej do całkowitej jako stały w całym zakresie kątów. W związku z tym konieczne było opisanie transmisyjności kierunkowej

i całkowitej funkcjami, których iloraz byłyby stałe dla każdego kąta padania. Przyjęto funkcję: $\tau_{z1,\theta}^s = A \cdot \exp(-1/\cos\theta)$, której postać wynika z założonego zmniejszenia transmisyjności proporcjonalnie do wydłużenia drogi promienia przechodzącego przez warstwę ($L_\theta = L_0/\cos\theta$).

Tabela 1. Równania krzywych regresji transmisyjności w funkcji kąta padania promieniowania θ .

Table 1. Regression curves of the transmissivity as a function of the incidence angle θ .

Granulacja:	Grubość próbki:	Krzywa regresji:
2-3	1	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,09463 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
3-4	1	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,13706 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
4-6	1	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,22443 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
6-8	1	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,29046 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
2-3	2	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,02477 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
3-4	2	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,03768 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
4-6	2	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,05422 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
6-8	2	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,06915 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
2-3	3	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,02273 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
3-4	3	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,03394 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
4-6	3	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,04312 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$
6-8	3	$\tau_{z1,\theta}^s = 0,04671 \cdot \exp(-1/\cos\theta)$

Ostatecznie, w obliczeniach transmisyjności przyjęto:

- transmisyjność promieniowania kierunkowego w postaci kierunkowej $\tau_{z1,\theta}^s$ – określoną wg krzywych regresji wyznaczonych z bezpośrednich pomiarów w funkcji kąta padania promieniowania,
- transmisyjność promieniowania kierunkowego w postaci rozproszonej $\tau_{z1,\theta}^d$ – określoną jako: $\tau_{z1,\theta}^d = \tau_{z1,0} - \tau_{z1,\theta}^s$; $\tau_{z1,0} = (\tau_{z1,\theta}^s) \cdot \exp(-1/\cos\theta + 1)$, $\tau_{z1,0}^*$ – wyznaczona wg krzywych regresji przy założeniu stałego stosunku transmisyjności kierunkowej do całkowitej.

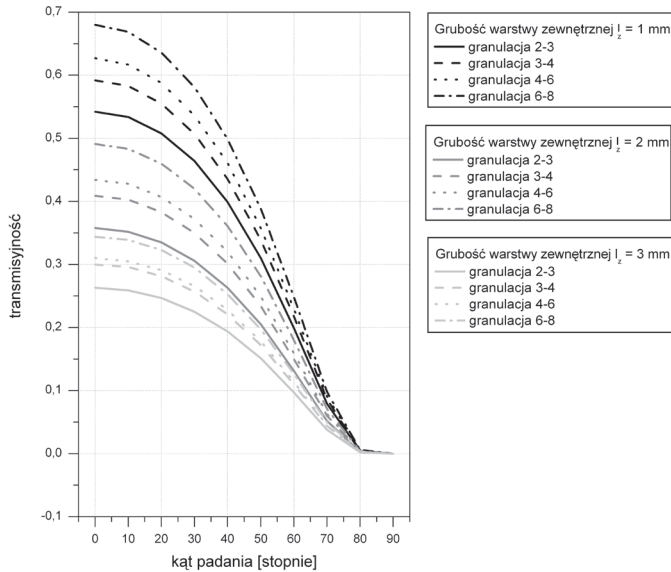
Odbijalność promieniowania z półprzestrzeni do półprzestrzeni ρ_{z3} określono w sposób przybliżony na podstawie pomiarów odbijalności całkowitej promieniowania padającego prostopadle do powierzchni próbki jako: $\rho_{z3} = \frac{1}{2} (\rho_{z3,0} + 1)$, $\rho_{z3,0}^*$ – wyznaczona wg odpowiednich krzywych regresji.

Wielkości dotyczące izolacji transparentnej: $\tau_{c,\theta}$, τ_c , $\tau_{c,\theta}^d$, τ_c^* , $\tau_{W,\theta}$, τ_W , $\tau_{W,\theta}^d$, τ_W^* , określane są dla różnych grubości płyty i szerokości komórek oraz różnych kątów padania promieniowania na podstawie pomiarów transmisyjności kierunkowej pojedynczej warstwy folii akrylowej, przy pomocy własnego programu komputerowego.

Wyniki obliczeń poddano korekcie, uwzględniającej udział natężenia promieniowania o danej długości fali w widmie promieniowania słonecznego przechodzącego przez atmosferę o określonej masie optycznej.

Transmisyjność promieniowania rozproszonego obliczono całkowitą numerycznie transmisyjności w obrębie ćwiartki półprzestrzeni (ze względu na symetrię układu), co 1° .

Transmisyjność promieniowania kierunkowego przez przykładowe rodzaje warstw powierzchniowych przedstawia rysunek 16.



Rys. 16. Transmisyjność całkowita warstwy powierzchniowej w funkcji kąta padania promieniowania (płyta komórkowa o wymiarach $w = 10$ mm, $l = 120$ mm).

Fig. 16. Total transmissivity of outer layer as a function of the radiation incidence (honeycomb insulation parameters: width of channels $w = 10$ mm, width of insulation $l = 120$ mm).

Wyznaczenie transmisyjności warstwy powierzchniowej pozwoliło na obliczenie zysków promieniowania na powierzchni absorbera dla 240 wariantów przegrody różniących się parametrami warstwy ochronnej i izolacji komórkowej. W obliczeniach przyjęto następujące założenia:

- izolacja transparentna umieszczona jest na powierzchniach pionowych, skierowanych na południe, południowy wschód i południowy zachód,
- promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię warstwy określono jako bezpośrednie i rozproszone pochodzące z niebosłonu oraz rozproszone odbite od powierzchni terenu, zgodnie z modelem matematycznym przyjętym w rozdziale 5,
- rozpatrzono dzienne zyski promieniowania podczas dwu dni w roku: 27 VI i 26 XII, odpowiednio o największej i najmniejszej sumie promieniowania na płaszczyznę poziomą, w stanie nieba bezchmurnego i pełnego zachmurzenia,
- zyski promieniowania wyznaczono w odstępach godzinowych Δt od wschodu do zachodu Słońca, na podstawie obliczonej transmisyjności warstwy i natężenia promieniowania padającego na jej powierzchnię wg wzoru:

$$Q_{kB} = \sum_i \tau_{\theta_i} \cdot I_{kB_i} \cdot \Delta t_i \quad Q_{kD} = \sum_i \tau_i \cdot I_{kD_i} \cdot \Delta t_i \quad (52)$$

$$Q_{kG} = Q_{kB} + Q_{kD} \quad [\text{kJ/m}^2] \quad (53)$$

gdzie: Q_{kB} – dzienne zyski promieniowania bezpośredniego, Q_{kD} – dzienne zyski promieniowania rozproszonego, Q_{kG} – dzienne zyski promieniowania całkowitego.

Następnym etapem było wyznaczenie wariantu optymalnego analizowanej warstwy. Zmienne decyzyjne zagadnienia stanowią parametry warstwy powierzchniowej:

- średnia granulacja kulek warstwy zewnętrznej g , $0,25 \text{ mm} \leq g \leq 0,7 \text{ mm}$
- grubość warstwy zewnętrznej l_z , $1 \text{ mm} \leq l_z \leq 3 \text{ mm}$
- średnica komórek płytowej izolacji transparentnej w , $2 \text{ mm} \leq w \leq 10 \text{ mm}$
- grubość płytowej izolacji transparentnej l_w , $60 \text{ mm} \leq l_w \leq 120 \text{ mm}$.

Warunki ograniczające zmienne decyzyjne wynikają z zakresu przeprowadzonych badań oraz z konieczności ograniczenia strat ciepła.

Funkcje celu opisujące zyski promieniowania zimą i latem oznaczono odpowiednio jako $f_1 = f_1(g, l_z, w, l_w)$ oraz $f_2 = f_2(g, l_z, w, l_w)$ [kJ/m²]. Zależność funkcji celu od zmiennych decyzyjnych w przypadku dnia bezchmurnego określono metodą najmniejszych kwadratów:

- dla płaszczyzny południowo-wschodniej i południowo-zachodniej:

$$f_1 = 6143,27 + 302,897 \cdot w - 17,9725 \cdot w^2 - 15,3757 \cdot l_w + 0,809083 \cdot w \cdot l_w + 0,0115104 \cdot (l_w)^2 + 5182,8 \cdot g + 61,4475 \cdot w \cdot g - 3,29159 \cdot l_w \cdot g - 1906,87 \cdot g^2 + -2418,06 \cdot l_z - 37,9406 \cdot w \cdot l_z + 2,00888 \cdot l_w \cdot l_z - 561,609 \cdot g \cdot l_z + 315,281 \cdot (l_z)^2 \quad (54)$$

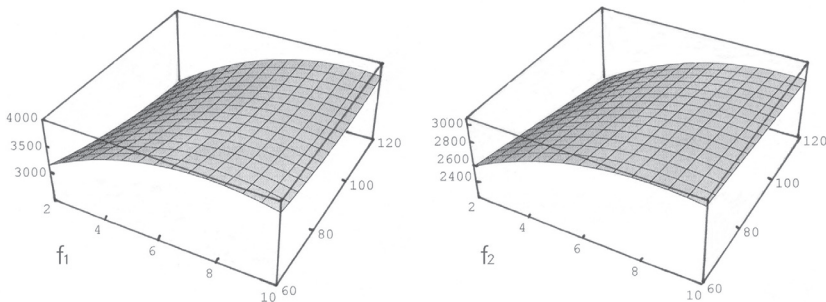
$$f_2 = 3460,89 + 165,82 \cdot w - 9,86272 \cdot w^2 - 8,41342 \cdot l_w + 0,443479 \cdot w \cdot l_w + 0,00625 \cdot (l_w)^2 + 2989,56 \cdot g + 31,317 \cdot w \cdot g - 1,63768 \cdot l_w \cdot g - 1092,54 \cdot g^2 + -1381,43 \cdot l_z - 20,0766 \cdot w \cdot l_z + 1,063 \cdot l_w \cdot l_z - 335,043 \cdot g \cdot l_z + 183,187 \cdot (l_z)^2 \quad (55)$$

- dla płaszczyzny południowej:

$$f_1 = 4469,68 + 222,589 \cdot w - 13,176 \cdot w^2 - 11,2778 \cdot l_w + 0,594229 \cdot w \cdot l_w + 0,0083125 \cdot (l_w)^2 + 3737,48 \cdot g + 45,8297 \cdot w \cdot g - 2,47391 \cdot l_w \cdot g - 1379,57 \cdot g^2 + -1749,62 \cdot l_z - 28,2141 \cdot w \cdot l_z + 1,49313 \cdot l_w \cdot l_z - 398,457 \cdot g \cdot l_z + 226,369 \cdot (l_z)^2 \quad (56)$$

$$f_2 = 5727,87 + 272,12 \cdot w - 16,1842 \cdot w^2 - 13,752 \cdot l_w + 0,725729 \cdot w \cdot l_w + 0,0102708 \cdot (l_w)^2 + 4990,12 \cdot g + 50,2971 \cdot w \cdot g - 2,66696 \cdot l_w \cdot g - 1822,94 \cdot g^2 + -2296,44 \cdot l_z - 32,5875 \cdot w \cdot l_z + 1,716 \cdot l_w \cdot l_z - 562,196 \cdot g \cdot l_z + 306 \cdot (l_z)^2 \quad (57)$$

Przykładowe wykresy funkcji f_1 i f_2 dla płaszczyzny południowej przedstawia rysunek 17. Aby można było funkcje przedstawić graficznie, dwie spośród czterech zmiennych przyjęto jako stałe.



Rys. 17. Przykładowe wykresy funkcji f_1 i f_2 dla parametrów przyjętych jako stałe: $g = 0,7 \text{ mm}$, $l_z = 2,63 \text{ mm}$.

Fig. 17. Examples of function f_1 and f_2 graphs for parameters assumed as constant: $g = 0,7 \text{ mm}$, $l_z = 2,63 \text{ mm}$.

Jako kryteria optymalizacji przyjęto: 1) maksimum zysków promieniowania zimą, 2) minimum zysków promieniowania latem.

W obliczeniach wprowadzono bezwymiarowe, znormalizowane funkcje celu:

$$F_1 = \frac{-f_1}{\overline{f_1}} \quad F_2 = \frac{f_2}{\overline{f_2}} \quad (58)$$

gdzie: $\overline{f_i}$ – największa wartość funkcji celu co do wartości bezwzględnej, należąca do zbioru kompromisów.

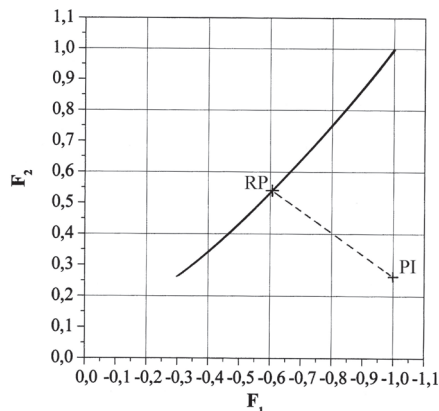
Zbiór kompromisów wyznaczono metodą min-max przy użyciu współczynników wagowych w_i , wprowadzając zastępczą funkcję celu F i określając jej minimum, a następnie obliczając wartości funkcji F_1 i F_2 odpowiadające danemu wektorowi zmiennych decyzyjnych:

$$F = \sum_{i=1}^2 w_i F_i, \quad \sum_{i=1}^2 w_i = 1, \quad w_i \geq 0. \quad (59)$$

Jako rozwiązanie preferowane przyjęto punkt zbioru kompromisów najbliższy punktowi idealnemu. Jego współrzędne wyznaczono jako minimum funkcji F_3 , odpowiednio dla płaszczyzny południowo-wschodniej i południowej:

$$F_3 = (F_1 + 1)^2 + \left(F_2 - \frac{0,19604}{0,71390} \right)^2 \quad (60)$$

$$F_3 = (F_1 + 1)^2 + \left(F_2 - \frac{0,13561}{0,51715} \right)^2 \quad (61)$$



Rys. 18. Zbiór kompromisów, punkt idealny PI i rozwiązanie preferowane RP dla płaszczyzny południowej.

Fig. 18. The class of compromises, ideal point PI and the preferred solution RP for the south plane.

Parametry optymalne warstwy powierzchniowej stanowią wartości zmiennych decyzyjnych odpowiadające rozwiązaniu preferowanemu:

- dla płaszczyzny południowo-wschodniej i południowo-zachodniej:
 - granulacja kulek szklanych $g = 0,630 \div 0,800$ mm,
 - grubość warstwy zewnętrznej $l_z = 2,8$ mm,
 - średnica komórek płyty transparentnej $w = 9,9$ mm,
 - grubość płyty transparentnej $l_w = 60,9$ mm,
- dla płaszczyzny południowej:
 - granulacja kulek szklanych $g = 0,630 \div 0,800$ mm,
 - grubość warstwy zewnętrznej $l_z = 2,6$ mm,
 - średnica komórek płyty transparentnej $w = 9,9$ mm,
 - grubość płyty transparentnej $l_w = 109,5$ mm.

9. Wnioski

Założone przed podjęciem pracy cele zostały osiągnięte. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych transmisyjności promieniowania optycznego przez komponenty warstwy powierzchniowej oraz określono transmisyjność całego układu w oparciu o własny model obliczeniowy. Powiązано transmisyjność warstwy z natężeniem padającego promieniowania słonecznego na płaszczyznę pionową w wybranym dniu letnim i zimowym, określając zyski promieniowania dla różnych wariantów badanej warstwy. Następnie dokonano wyboru rozwiązania optymalnego, jako kryteria przyjmując możliwość zapewnienia maksymalnych zysków promieniowania zimą i minimalnych latem.

Praca jest częścią szerszych badań „przegrody inteligentnej” prowadzonych na Politechnice Łódzkiej. Prezentowane analizy nie wyczerpują tematu wymiany ciepła i prognozowania efektywności energetycznej przegród kolektorowo-akumulacyjnych z izolacją transparentną, lecz pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków końcowych:

1. Na transmisyjność warstwy powierzchniowej wpływają parametry jej komponentów – grubość i średnica kulek zewnętrznej warstwy ochronnej oraz grubość i szerokość komórek izolacji płytowej, a także długość fali i kąt padania promieniowania z zakresu największego natężenia promieniowania optycznego emitowanego przez Słońce.
2. Model matematyczny transmisji promieniowania powinien uwzględniać:
 - transmisję przez warstwę zewnętrzną w postaci promieniowania kierunkowego i rozproszonego,
 - transmisję przez komórkową płytę transparentną w postaci promieniowania rozproszonego wprzód i wstecz,
 - odbicie promieniowania rozproszonego wstecz od spodniej powierzchni warstwy zewnętrznej.
3. Na wzrost transmisyjności warstwy powierzchniowej wpływa:
 - zwiększenie średnicy kulek szklanych oraz zmniejszenie grubości warstwy zewnętrznej,
 - zwiększenie szerokości komórek oraz zmniejszenie grubości transparentnej płyty komórkowej,
 - zmniejszenie kąta padania promieniowania.
4. Oceniając znaczenie wpływu analizowanych czynników na transmisyjność całej warstwy można je uszeregować następująco:

- kąt padania promieniowania – współczynnik korelacji: – 0,832,
 - grubość zewnętrznej warstwy ochronnej – współczynnik korelacji: – 0,393,
 - średnica kulek szklanych – współczynnik korelacji: 0,131,
 - szerokość komórek płyty komórkowej – współczynnik korelacji: 0,099,
 - grubość płyty komórkowej – współczynnik korelacji: – 0,041.
5. Dążenie do zapewnienia maksymalnych zysków promieniowania zimą i minimalnych latem są zadaniami przeciwstawnymi. Zalecane parametry warstwy skierowanej na południe, południowy wschód i południowy zachód są następujące:
- dla płaszczyzny południowo-wschodniej i południowo-zachodniej:
 - granulacja kulek szklanych: 0,630 ÷ 0,800 mm,
 - grubość warstwy zewnętrznej: 2,8 mm,
 - szerokość komórek płyty transparentnej: 9,9 mm,
 - grubość płyty transparentnej: 60,9 mm,
 - dla płaszczyzny południowej:
 - granulacja kulek szklanych: 0,630 ÷ 0,800 mm,
 - grubość warstwy zewnętrznej: 2,6 mm,
 - szerokość komórek płyty transparentnej: 9,9 mm,
 - grubość płyty transparentnej: 109,5 mm.
6. Lokalizacja warstwy powierzchniowej na elewacji południowej jest bardziej korzystna niż na elewacjach skierowanych na południowy wschód i południowy zachód, ze względu na proporcje zysków promieniowania latem i zimą.

Literatura

- [1] Braun P.O., Goetzberger A., Schmid J., Stahl W., *Transparent insulation of building facades – steps from research to commercial applications*, Solar Energy, vol. 49, 1992, s. 413.
- [2] Beckmann P., Spizzichino A., *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, Artech House Inc., 1987.
- [3] Burek S.A.M., Norton B., Probert S.D., *Transmission and forward scattering of insolation through plastic (transparent and semi-transparent) materials*, Solar Energy, vol. 42, 1989, s. 457.
- [4] Dalenbäck J.O., *Solar energy in building renovation*, Energy and Buildings vol. 24, 1996, s. 39.
- [5] Gawin D., Romanowska A., Klemm P., *Wpływ MFZ na pole temperatury w przegrodzie poddanej działaniu promieniowania słonecznego*, V Konferencja Naukowo – Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Łódź 1995, s. 96.
- [6] Hollands K.G.T., Iynkaran K., Ford C., Platzer W.J., *Manufacture, solar transmission, and heat transfer characteristics of large-celled honeycomb transparent insulation*, Solar Energy, vol. 49, 1992, s. 381.
- [7] Hollands K.G.T., Marshall K.N., Wedel R.K., *An approximate equation for predicting the solar transmittance of transparent honeycombs*, Solar Energy, vol. 21, 1978, s. 231.
- [8] Hollands K.G.T., Raithby G.D., Russell F.B., Wilkinson R.G., *Coupled radiative and conductive heat transfer across honeycomb panels and through single cells*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 27, 1984, s. 2119.
- [9] Kośny J., *Teoretyczna i doświadczalna analiza efektywności przegród kolektorowo-akumulacyjnych*, praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1990.
- [10] Laskowski L., *Systemy biernego ogrzewania słonecznego. Zagadnienia funkcjonowania i efektywności energetycznej*, IPPT PAN, Warszawa 1993.
- [11] Lichołai L., *Analiza funkcjonowania pasywnych systemów ogrzewania słonecznego i prognozowanie ich efektywności energetycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000.

- [12] Owczarek S., *Identyfikacja modelu promieniowania słonecznego dla 10-ciu stacji aktywnościometrycznych na terenie Polski. Wyniki obliczeń wartości godzinowych i dziennych promieniowania na wybrane płaszczyzny*, Prace IPPT PAN, Warszawa 2002.
- [13] Owczarek S., *Wieloparametrowy model wektorowy gęstości strumienia słonecznego promieniowania na dowolną płaszczyznę*, V Konferencja Naukowo – Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Łódź 1995, s. 277.
- [14] Platzer W.J., *Directional-hemispherical solar transmittance data for plastic honeycomb-type structures*, Solar Energy, vol. 49, 1992, s. 359.
- [15] Platzer W.J., *Solar transmission of transparent insulation materials*, Solar Energy Materials, vol. 16, 1987, s. 275.
- [16] Sala A., *Radiacyjna wymiana ciepła*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1982.
- [17] Stahl W., Voss K., Goetzberger A., *The self-sufficient solar house in Freiburg*, Solar Energy, vol. 52, 1994, s. 111.
- [18] Starakiewicz A., *Funkcjonowanie przegród kolektorowo-akumulacyjnych w polskich warunkach klimatycznych*, praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1992.
- [19] Symons J.G., *Calculation of the transmittance-absorptance product for flat-plate collectors with convection suppression devices*, Solar Energy, vol. 33, 1984, s. 637.
- [20] Torrance K.E., Sparrow E.M., *Biangular reflectance of an electric nonconductor as a function of wavelength and surface roughness*, Journal of Heat Transfer, vol. 87, 1965, s.283.
- [21] Twidell J.W., Johnstone C.M., Zuhdy B., Scott A., *Strathclyde University's passive solar, low-energy, residences with transparent insulation*, Solar Energy, vol. 52, 1994, s. 85.
- [22] Voss K., *Solar energy in building renovation – results and experience of international demonstration buildings*, Energy and Buildings, vol. 32, 2000, s. 291.

Building compartment surface layer with specific properties of radiation absorption and transmission

Magdalena Grudzińska

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil and Sanitary Engineering,
Institute of Building, e-mail: m.grudzinska@pollub.pl*

Abstract: The thesis deals with building compartment surface layer, consisting of two components: honeycomb transparent insulation and transparent plaster made of glass beads. The layer enables passive solar gains in a building. The aim of the thesis is as follows: (1) Preparation of mathematical model of solar transmission through the surface layer; (2) Setting of basic optical properties of the layer components, necessary for calculating solar gains at the absorber; (3) Choice of optimal properties of the surface components, allowing maximum solar gains in winter and protecting from overheating in summer. The thesis comprises of: introduction, basic equations and definitions necessary in the work, mathematical model of solar transmission through the surface layer, experimental research on basic optical properties of the layer components, choice of optimal properties of the surface components and conclusions.

Key words: building physics, ecological buildings, passive solar systems, transparent insulation.