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

TOMASZ KISILEWICZ*

PROSTY MODEL SYMULACYJNY PRZEGRODY Z IZOLACJĄ TRANSPARENTNĄ

THE SIMPLE SIMULATION MODEL OF THE WALL WITH TRANSPARENT INSULATION

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób tworzenia prostego modelu przegrody z izolacją transparentną. Przegroda jest modelowana jak analogowy schemat elektryczny, złożony z oporników i kondensatorów, a równanie przewodnictwa cieplnego jest rozwiązywane z użyciem metody różnic skończonych. Sformułowany w ten sposób model został zastosowany do porównania właściwości kilku rodzajów izolacji transparentnych.

Słowa kluczowe: *izolacja transparentna, metoda różnic skończonych, bierne pozyskiwanie energii słonecznej*

Abstract

The simple model of the wall with transparent insulation has been presented. Wall is modeled as analogue electric circuit, including resistors and capacitors and heat conduction equation is solved in numerical way with finite difference method. Simulation model, that was created in this way, has been used to compare the features of a few transparent materials.

Keywords: *transparent insulation, finite difference method, passive solar use*

* Dr inż. Tomasz Kisilewicz, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Oznaczenia

C_i – pojemność cieplna węzła o numerze i
q_i – gęstość strumienia cieplnego w węźle
R_{air} – opór ew. warstwy powietrznej pomiędzy izolacją a warstwą akumulacyjną
$R_{i,j}$ – opór cieplny pomiędzy punktami i a j
R_{si} – opór przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej
R_{trans} – opór cieplny izolacji transparentnej
$T_{j,p}$ – temperatura w węźle j w chwili p
Δt – przyjęty krok czasowy
λ_{eq} – równoważny współczynnik wymiany ciepła przez warstwę izolacji transparentnej
R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni izolacji transparentnej
η – sprawność

1. Opis modelu różniczkowego

Do symulowania przegród z warstwą izolacji transparentnej stosowane są zróżnicowane modele i algorytmy. Przegrody tego typu mogą być modelowane w sposób dynamiczny w długich okresach czasu, jako fragment całego budynku i z użyciem rozbudowanych narzędzi typu ESP-r czy Energy Plus [2, 3]. Do przybliżonej oceny udziału przegród w bilansie cieplnym stosowane są uproszczone algorytmy stacjonarne [5]. Natomiast do skróconej analizy niestacjonarnego przewodzenia ciepła można użyć też prostego, analogowego schematu elektrycznego przegrody i metody różnic skończonych [1]. Pochodne, występujące w różniczkowym równaniu przewodnictwa cieplnego, są zastępowane różnicami poszczególnych wielkości dla przyjętego kroku czasowego przebiegu zmian. Przegroda jest zastępowana dyskretną siatką izotermicznych punktów bez pojemności (np. na brzegu symulowanej przegrody) lub z pojemnością cieplną (wewnętrzne warstwy przegrody). Wymiana ciepła między punktami odbywa się przez opory równe oporom przewodzenia ciepła warstw materiałowych pomiędzy wybranymi punktami lub oporom przejmowania ciepła w wypadku punktów mieszczących się na powierzchni przegrody. Temperatura w punkcie jest wynikiem bilansu strumieni cieplnych wymienianych z węzłami sąsiednimi strumienia dostarczanego z zewnątrz bezpośrednio do punktu (np. promieniowanie słoneczne w wypadku punktu brzegowego) i strumienia związanego ze zmianą temperatury pojemności cieplnej przypisanej punktowi.

W schemacie jawnym rozwiązania temperatury w punktach są wyliczane na podstawie wartości z poprzedniego kroku czasowego. Z tym sposobem związane jest jednak dodatkowe ograniczenie wielkości kroku czasowego gwarantujące stabilność rozwiązania.

Ponieważ temperatury początkowe nie są zwykle znane, to proces symulacji jest powtarzany tak długo, aż uzyska się w pełni powtarzalną, niezależną od początkowo przyjętych wartości nieznanych temperatur, odpowiedź przegrody na wymuszenie zewnętrzne. Przeprowadzone obliczenia symulacyjne pokazały, że w odniesieniu do niżej opisanej przegrody taki stan jest praktycznie uzyskiwany już w trzeciej dobie.

Ogólne równanie pozwalające wyznaczyć temperaturę w chwili $p + 1$ w punkcie i jednowymiarowej siatki można zapisać w sposób następujący [1]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

$$T_{i,p+1} = \frac{\Delta t}{C_i} \cdot \left(q_i + \sum_j \frac{T_{j,p} - T_{i,p}}{R_{i,j}} \right) + T_{i,p} \tag{1}$$

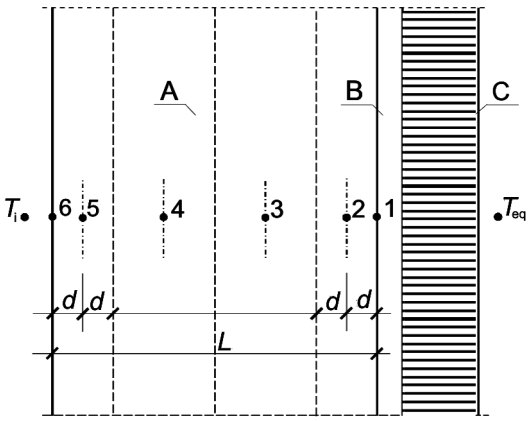
Natomiast warunkiem uzyskania rozwiązania stabilnego w schemacie jawnym jest wybór kroku czasowego mniejszego od najmniejszej wartości wyrażenia (2), wyliczonego dla wszystkich punktów siatki, mających pojemność cieplną

$$\Delta t \le \min \left(C_i \sum_j \frac{1}{R_{i,j}} \right) \tag{2}$$

Fizyczny sens wyrażenia w nawiasie odpowiada stałej czasowej pojemności C_i.

2. Schemat obliczeniowy przegrody

Model symulacyjny utworzono dla przegrody o budowie przedstawionej na rys. 1. Opis badań doświadczalnych tej przegrody znajduje się m.in. w [2]. W schemacie obliczeniowym przyjęto symetryczny podział akumulującej warstwy betonowej na cztery warstwy mające pojemności cieplne, dwie jednakowe, przypowierzchniowe warstwy cieńsze i dwie warstwy wewnętrzne, zwykle o większej grubości. Wedle założeń izolacja transparentna nie ma zdolności akumulacyjnych, a jedynie opór cieplny. W utworzonym modelu obliczeniowym dodatkowo jest możliwe wprowadzenie zamkniętej warstwy powietrznej między izolacją transparentną a warstwą akumulującą.



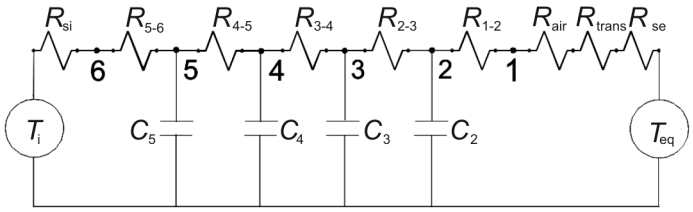
Rys. 1. Sposób podziału analizowanej przegrody na warstwy obliczeniowe, A – betonowa warstwa akumulacyjna, B – zamknięta szczelina powietrzna, C – izolacja transparentna

Fig. 1. Computational layer scheme of the analyzed wall, A – concrete accumulation, B – closed airspace, C – transparent insulation

Temperatura powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu jest stała. Warunki zewnętrzne są opisywane z użyciem tzw. równoważnej temperatury słonecznej T_{eq}, ale obliczonej dla absorpcyjnej powierzchni zewnętrznej betonu pod izolacją transparentną. Na równoważną temperaturę słoneczną składają się więc harmonicznie zmienna temperatura powietrza zewnętrznego oraz harmonicznie zmienne promieniowanie słoneczne (tylko dodatnie wartości), z uwzględnieniem przepuszczalności promieniowania przez izolację, oporu cieplnego izolacji, oporu szczeliny powietrznej i oporu przejmowania ciepła oraz absorpcji pro-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

mieniowania na powierzchni warstwy akumulującej. W obliczeniach nie uwzględniono wymiany powietrza między wnętrzem budynku a szczeliną pod izolacją transparentną.



Rys. 2. Analogowy schemat symulacyjny przegrody z izolacją transparentną
Fig. 2. Analog simulation model of the wall with transparent insulation

W modelu obliczeniowym przyjęto, że

$$R_{e-1} = R_{\mathrm{se}} + R_{\mathrm{trans}} + R_{\mathrm{air}}$$

$$R_{e-2} = R_{-1} + R_{1-2}$$

$$R_{i-5} = R_{5-6} + R_{\mathrm{si}}$$

Sposób wyznaczania temperatury w poszczególnych węzłach siatki jest następujący

$$T_{2,i+1} = \frac{\Delta t}{C_2}\left(\frac{T_{\mathrm{eq}}\left(i\cdot\Delta t\right) - T_{2,i}}{R_{e-2}} + \frac{T_{3,i} - T_{2,i}}{R_{2-3}}\right) + T_{2,i}$$

$$T_{3,i+1} = \frac{\Delta t}{C_3}\left(\frac{T_{2,i} - T_{3,i}}{R_{2-3}} + \frac{T_{4,i} - T_{3,i}}{R_{3-4}}\right) + T_{3,i}$$

$$T_{4,i+1} = \frac{\Delta t}{C_4}\left(\frac{T_{3,i} - T_{4,i}}{R_{3-4}} + \frac{T_{5,i} - T_{4,i}}{R_{4-5}}\right) + T_{4,i}$$

$$T_{5,i+1} = \frac{\Delta t}{C_5}\left(\frac{T_{4,i} - T_{5,i}}{R_{4-5}} + \frac{T_i - T_{5,i}}{R_{i-5}}\right) + T_{5,i}$$

$$T_{6,i} = T_i + R_i\left(\frac{T_{5,i} - T_i}{R_{i-5}}\right)$$

$$T_{1,i} = T_{2,i} + R_{1-2}\left(\frac{T_{\mathrm{eq}}\left(i\cdot\Delta t\right) - T_{2,i}}{R_{e-2}}\right)$$

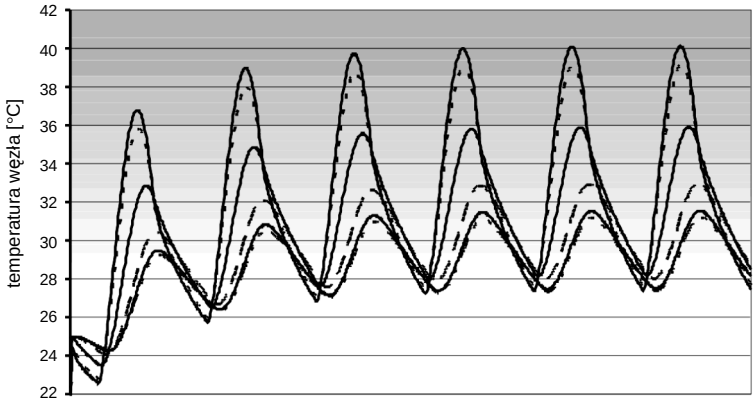
Wstępnie przyjęto podział akumulacyjnej warstwy betonowej na dwie warstwy brzegowe o grubości 3 cm (d = 1,5 cm) i dwie warstwy wewnętrzne po 8,75 cm. Wyniki symulacji są mało wrażliwe na zmiany grubości warstw. Powiększanie grubości warstwy brzegowej w zakresie od 1 cm do 8 cm – przy stałej całkowitej grubości warstwy akumulującej – nie wpływa na zmianę wartości dobowego bilansu cieplnego przegrody. Naj-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

mniejsza stała czasowa wyróżnionych w ten sposób warstw wynosi 1746 s, zaś przyjęty do obliczeń krok jest niemal trzy razy mniejszy i wynosi 600 s.

3. Dobowy rozkład temperatur i bilans cieplny

W obliczeniach przyjęto następujące założenia: amplituda dobowych zmian temperatury powietrza zewnętrznego wynosi 6 K, przy średniej dobowej równej –2°C, a natężenie promieniowania słonecznego zmienia się w zakresie od 0 do 550 W/m^2.



Rys. 3. Stabilizacja dobowych zmian temperatury w kolejnych cyklach obliczeniowych
Fig. 3. Temperature stabilization in successive computational cycles

Właściwości warstw tworzących przegrodę:

- warstwa akumulacyjna jest wykonana z betonu o grubości 23,5 cm, gęstości 2400 kg/m^3, o cieple właściwym 1000 J/(kg·K) i współczynniku przewodzenia ciepła równym 2,0 W/(m·K),
- opór cieplny izolacji transparentnej przyjęto równy 0,97 m^{2}K/W, przepuszczalność promieniowania słonecznego 0,41, współczynnik absorpcji 0,95 [2],
- pod izolacją transparentną nie ma szczeliny powietrznej.

Na rysunku 3 przedstawiono proces stabilizacji dobowych zmian temperatury w poszczególnych węzłach obliczeniowych modelowanej przegrody. Obliczenia rozpoczęto przy założonej jednakowej temperaturze we wszystkich węzłach +25°C. Po pięciu dobach zmiany temperatury są już praktycznie powtarzalne. Maksymalna różnica szczytowych wartości temperatury w poszczególnych węzłach, między dobami piątą a szóstą, nie przekracza 0,5%. Wyniki obliczeń wykorzystywane do dalszych analiz dotyczą tylko szóstej doby okresu symulacji.

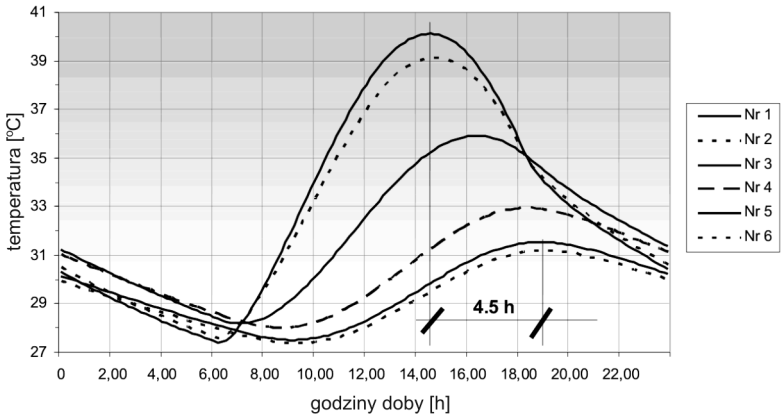
Amplituda wahań temperatury na powierzchni nasłonecznionej wynosi w przyjętych warunkach obliczeniowych 12,71 K, a na powierzchni wewnętrznej 3,82 K, współczynnik tłumienia wahań temperatury w warstwie akumulacyjnej jest więc równy 3,327.

Na rysunku 4 pokazano dobowe zmiany temperatury w poszczególnych węzłach obliczeniowych przykładowej przegrody. Wykresy temperatur mają charakterystyczny kształt

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

odpowiadający fali harmonicznej tłumionej i przesuwanej w czasie przez materiał przegrody.

Syntetyczna informacja pozwalająca na ocenę efektywności energetycznej tej przegrody to dobowa suma strumieni cieplnych na jej wewnętrznej powierzchni. Dla przyjętych powyżej, bardzo korzystnych warunków słonecznej doby, wartość sumy jest dodatnia i wynosi 0,854 kWh/m^2. Tak więc zyski cieplne w trakcie całej doby przewyższają straty, przegroda pozyskuje z otoczenia energię dla wnętrza budynku.



Rys. 4. Temperatura modelowanej przegrody w trakcie słonecznej doby: 1 – bezpośrednio pod izolacją transparentną, 2 do 5 – węzły pośrednie, 6 – wewnętrzna powierzchnia ściany

Fig. 4. Temperature during a sunny day: 1 – directly under the transparent insulation, 2–5 – in intermediate nodes, 6 – on internal wall surface

Sprawność pozyskiwania promieniowania słonecznego w modelowanej przegrodzie o podanych wyżej właściwościach, rozumiana jako stosunek uzyskanych oszczędności energetycznych do promieniowania padającego na zewnętrzną powierzchnię przegrody, wynosi 31%. Oszczędności są obliczane jako różnica wartości strumienia strat cieplnych przez przenikanie (bez uwzględnienia promieniowania słonecznego) i strumienia przejmowanego na wewnętrznej powierzchni przegrody z uwzględnieniem fali wywołanej absorpcją promieniowania słonecznego.

Stosowanie pokazanego powyżej modelu obliczeniowego do odtwarzania eksperymentalnych przebiegów zmian temperatury nie bardzo ma sens ze względu na różnice w warunkach brzegowych wynikające z braku cyklicznej zmienności warunków rzeczywistych. W ramach prób dopasowania wyników możliwe jest, oczywiście, wprowadzenie odpowiednio dużego zbioru warunków brzegowych uzyskanych z pomiarów, pozwalającego na pominięcie początkowego rozkładu temperatur w przegrodzie. Istotniejsze jednak wydaje się zastosowanie modelu do analizowania i oceny wpływu poszczególnych parametrów transparentnej izolacji i warstwy akumulującej na efektywność energetyczną takiej przegrody.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Porównanie właściwości różnych rodzajów izolacji transparentnej

Decydujący wpływ na sprawność energetyczną przegrody z izolacją transparentną mają: przepuszczalność promieniowania słonecznego i izolacyjność termiczna warstwy TI. Rolą projektanta budynku jest dobór właściwych materiałów i ich grubości. Do tego celu mogą być użyte np. łączone kryteria techniczno-ekonomiczne.

Tabela 1

Charakterystyka radiacyjno-optyczna izolacji transparentnej wg [4]

Opis lub nazwa handlowa	Grubość [cm]	Przepuszczalność promieniowania	Współczynnik λ_{eq}* [W/(m·K)]
1. Dwukomorowa szyba zespolona z komorami wypełnionymi kryptonem	4,4	0,40	0,038
2. Płyta poliwęglanowa o strukturze kapilarnej w osłonie szklanej	10,0	0,67	0,106
3. Płyta z tworzywa sztucznego o strukturze włóknistej	10,0	0,70	0,106
4. Granulowany aerożel krzemionkowy w osłonie szklanej	2,4	0,50	0,026
5. Włókna szklane w osłonie z szyb szklanych	8,0	0,68	0,108
6. Kapilux-TWD	4,9	0,63	0,036
7. Kapilux-H	4,9	0,63	0,045
8. Sto Therm Solar	10,4	0,45–0,50	0,096

* λ_{eq} to zastępczy współczynnik wymiany ciepła przez warstwę izolacji transparentnej, uwzględniający jednoczesną wymianę przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie [4].

Wpływ właściwości izolacji transparentnej na bilans cieplny przegrody analizowano przy założeniu, że warstwa akumulacyjna jest w każdym wypadku wykonana z betonu o grubości 23,5 cm. Charakterystykę radiacyjno-optyczną i cieplną przykładowych płyt izolacyjnych przyjęto wg [4], tab. 1, warunki klimatyczne takie, jak przyjęte wcześniej.

Porównawcze obliczenia dla różnych materiałów izolacji transparentnej prowadzono z użyciem opisanego modelu symulacyjnego. Wyniki uzyskane dla charakterystycznej doby słonecznej zestawiono w tab. 2.

W tabeli 2 wyróżniono pogrubioną czcionką maksymalne wartości w poszczególnych kolumnach. Przyjmując jako główne kryterium maksymalną wartość oporu cieplnego izolacji transparentnej, można wskazać najkorzystniejszy materiał w warunkach braku lub słabego nasłonecznienia: Kapilux-TWD. Na podstawie maksymalnych wartości sprawności pozyskiwania promieniowania i dobowych zysków cieplnych można z kolei wytypować dwa najlepsze materiały w warunkach silnego promieniowania słonecznego, a będą to: płyta o strukturze włóknistej i Kapilux-TWD. Izolacja transparentna Kapilux-TWD spełnia obydwa kryteria w najlepszym stopniu, pozwala bowiem na maksymalne ograniczenie strat cieplnych przez przenikanie, przy bardzo wysokiej jednocześnie sprawności pozyskiwania energii słonecznej. Nieco tylko wyższa sprawność energetyczna płyt o strukturze włóknistej w trakcie słonecznej doby nie równoważy wyraźnie mniejszych w wypadku płyt Kapilux-TWD strat cieplnych w okresie bez promieniowania. W efekcie izolacja Kapilux-TWD

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 2

Wyniki obliczeń dla doby słonecznej, materiały izolacji transparentnej jak w tab. 2, maksymalne natężenie promieniowania słonecznego J_{max} = 550 W/m^2

Opis	Opór cieplny TIM [m^2·K/W]	Bilans dobowy [kWh]	Maks. temp. pod TIM [^{o}C]	Maks. temp. powierzchni wewnętrznej [^{o}C]	η [%]	Równoważny współczynnik przenikania ciepła [W/(m^2·K)]
1	1,158	0,922	38,46	28,94	31,4	–1,600
1*	1,175	0,992	39,19	29,33	33,1	–1,722
2	0,943	1,662	50,65	34,24	50,7	–2,885
3	0,943	1,757	**52,14**	**34,90**	**53,0**	–3,050
4	0,923	1,108	42,05	30,42	37,7	–1,923
5	0,741	1,496	49,04	33,36	48,9	–2,597
6	**1,361**	**1,780**	51,27	34,72	50,7	**–3,090**
7	1,089	1,637	49,76	33,93	48,9	–2,842
8	1,083	1,047–1,214	40,61–43,14	29,86–30,99	34,9–38,8	–1,819––2,101

* W wypadku zestawu szyb niezbędnym elementem rozwiązania praktycznego jest szczelina powietrzna.

uzyskuje najwyższą wartość równoważnego współczynnika przenikania ciepła, odpowiadającego bilansowi strat i zysków cieplnych przegrody. Maksymalne temperatury, uzyskiwane w przyjętych warunkach obliczeniowych, nie stanowią zagrożenia dla trwałości materiałów.

Literatura

[1] Athienitis A.K., Santamouris M., *Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings*, James & James Ltd., 2002.

[2] Kisilewicz T., *Zespolona izolacja transparentna*, XI Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Czasopismo Naukowe, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów, Łódź 2007.

[3] Kurleto M., *Techniczne i ekonomiczne aspekty stosowania izolacji transparentnej w budownictwie*, praca dyplomowa pod kierunkiem T. Kisilewicza, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.

[4] Laskowski L., *Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

[5] Ochs M., Haller A., Simmler H.H., *A simple method to calculate the heat gains of solar wall heating with transparent insulation*, Proceedings of the 3rd Int. ISES Europe Solar Congress "Eurosun 2000", Copenhagen, Denmark 2000.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ