

Maria Teresa MAŁEK¹
Halina KOCZYK²

WPŁYW ROZWIĄZANIA ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ NA ROZKŁADY TEMPERATUR W PRZEGRODZIE

W referacie porównano rozkład temperatur w przegrodach zewnętrznych bez oraz z barierą termiczną zlokalizowanymi w II strefie klimatycznej z projektową temperaturą zewnętrzną wynoszącą -18°C oraz temperaturą wewnętrzną w pomieszczeniu równą 20°C . Do analiz przyjęto ścianę zewnętrzną o konstrukcji betonowej zaizolowaną z obu stron styropianem. W przypadku przegrody z barierą termiczną, utworzono barierę za pomocą polipropylenowych przewodów wypełnionych niskotemperaturowym czynnikiem zawartych centralnie w warstwie betonu. W obliczeniach wariantowano temperaturę otoczenia zewnętrznego oraz temperaturę bariery termicznej, przy czym temperaturę wewnętrzną w pomieszczeniu latem przyjęto równą 24°C , a w pozostałych miesiącach 20°C . Do symulacji przepływu ciepła w przegrodzie posłużono się jedną z metod numerycznych, metodą bilansów elementarnych, która opiera się na podziale rozpatrywanego elementu na podobszary i określeniu temperatur na końcu kroku czasowego. Zastosowaną metodę opisano krok po kroku, prezentując jednocześnie tok obliczeń dotyczących analizowanych wariantów. Równania temperatur w komórkach bilansowych dla odpowiednich warunków brzegowych zestawiono w formie tabelarycznej. Wspomagająco posłużono się modelem utworzonym w programie MS Excel, dla którego wykonano obliczenia iteracyjne z krokiem czasowym równym 5 s. Otrzymane rezultaty zaprezentowano w postaci rozkładu temperatury. Na ich podstawie stwierdzono np. w warunkach obliczeniowych przesunięcie izotermii 0°C w kierunku środowiska zewnętrznego oraz większą temperaturę w pomieszczeniu na powierzchni przegrody dla rozwiązania z barierą termiczną w porównaniu do wariantu klasycznego. Czynniki te wpływają na zmniejszenie ryzyka wystąpienia wykoplenia wewnątrz przegrody oraz odczucia nagłego spadku temperatury w pobliżu ścian zewnętrznych, a także podwyższenia temperatury odczuwalnej w pomieszczeniu.

Słowa kluczowe: bariera termiczna, metoda bilansów elementarnych, metody numeryczne, rozkład temperatury

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Maria Teresa Małek, Politechnika Poznańska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań; tel. 616652534; maria.malek@put.poznan.pl

² Halina Koczyk, Politechnika Poznańska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań; tel. 616652532; halina.koczyk@put.poznan.pl

1. Wprowadzenie

Rozkład temperatur w przegrodzie wyznacza się za pomocą metod matematycznych: analitycznych (dokładnych) bądź numerycznych (przybliżonych) [1]. Metody analityczne opierają się na rozwiązaniu równań różniczkowych przy danych warunkach brzegowych i zastosowaniu niezbędnych uproszczeń. W wyniku tego zwiększa się trudność znalezienia rozwiązania, a czasem nawet następuje wykluczenie metody, stąd zainteresowanie metodami numerycznymi [1, 2]. Podstawowym założeniem w analizie zmiennych przestrzennych i czasu jest założenie o układzie dyskretnym, a nie ciągłym [2]. Kolejnym krokiem jest kwantyzacja obszaru, czyli podział go na określoną liczbę elementów dyskretnych [3]. Klasyfikację metod przeprowadza się na podstawie rozpatrzenia kwestii dyskretyzacji:

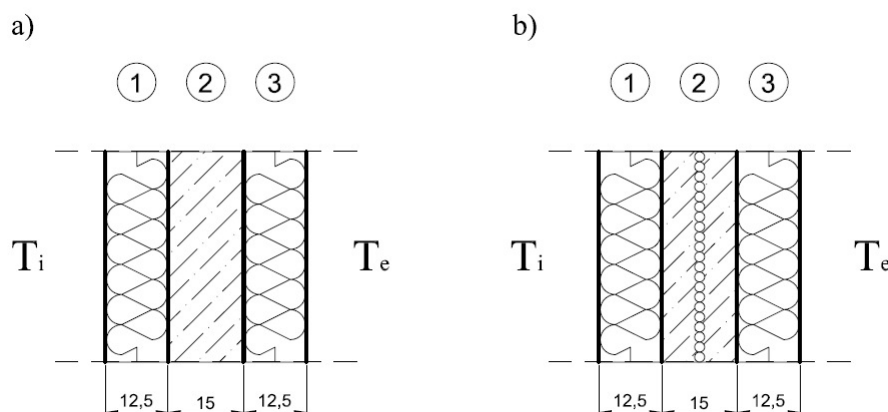
- metoda bilansów elementarnych (MBE), nazywana też metodą bilansów różnicowych (MBR) – dyskretyzacja przed zbudowaniem modelu matematycznego,
- metoda różnic skończonych (MRS) oraz metoda elementów brzegowych (MEB) – dyskretyzacja modelu matematycznego utworzonego zakładając ciągłość przestrzenną i czasową [2].

W poniższym referacie do analizy przepływu ciepła wybrano metodę bilansów elementarnych ze względu na, jak podaje autor [2]: „prostą interpretację fizyczną tej metody”. Rozwiązaniu poddano ścianę zewnętrzną bez oraz z barierą termiczną, która w sposób pośredni wykorzystuje promieniowanie słoneczne. Bariera termiczna w przegrodzie wykonana jest za pomocą polipropylenowych przewodów prowadzących niskotemperaturowy czynnik z gruntowego systemu magazynowania ciepła, który natomiast ładowany jest z kolektorów słonecznych.

2. Metoda i zakres obliczeń

2.1. Charakterystyka przegród

Analizie numerycznej poddano ścianę zewnętrzną bez bariery oraz z barierą termiczną, której konstrukcję zaczerpnięto z danych producenta – firmy ISOMAX [4]. Konstrukcja przegród składa się z dwóch warstw styropianu o gęstości (ρ) 30 kg/m^3 , cieple właściwym (c) równym $1460 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ oraz współczynnika przewodzenia ciepła (λ) wynoszącym $0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, pomiędzy którymi znajduje się warstwa Bio-Poren-Betonu o właściwościach termofizycznych: $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$, $c = 840 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\lambda = 0,38 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Bariere termiczną stanowią tworzywowe rurki o średnicy 20 mm. Kolejność i grubość warstw przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przegrody: a) bez bariery termicznej, b) z barierą termiczną:

1,3–styropian, 2–Bio-Pore-Beton, T_i –temperatura wewnętrzna, T_e –temperatura zewnętrzna. Grubości warstw podane w cm

Fig. 1. The scheme of the wall: a) without thermal barrier, b) with thermal barrier:

1,3–styrofoam, 2–Bio-Pore-Concrete, T_i –internal temperature, T_e –external temperature. The thickness of layer in cm

2.2. Równania bilansowe podobszarów

Przegrodę potraktowano jako 2D układ odniesienia, który podzielono na kwadratowe pola o wymiarach $\Delta x = \Delta y = d = 0,01\text{m}$ i rozpatrywano $\Delta z = 1\text{m}$ (wymiar prostopadły do płaszczyzny rysunku) o nieustalonym przepływie ciepła. Kolejnym elementem jest określenie warunku stabilności modelu, który jest niezbędny do zastosowania metody numerycznej [1, 2, 6]. Dla schematu jawnego dopuszczalna wartość kroku czasowego określona jest zależnością 1 [1, 3].

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{1}{2a \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad (1)$$

gdzie: a – współczynnik wyrównania temperatury, $[\text{m}^2/\text{s}]$,

Δx – krok przestrzenny w kierunku osi x , $[\text{m}]$,

Δy – krok przestrzenny w kierunku osi y , $[\text{m}]$.

Stosując zależności odnoszące się do strumienia ciepła (wzór 2) oraz entalpii w węźle przy kroku czasowym $\Delta\tau$ (wzór 3) wyprowadzono równania na temperaturę $T_{x,y}^+$ w komórce bilansowej dla odpowiednich typów na końcu kroku czasowego (tabela 1) [3].

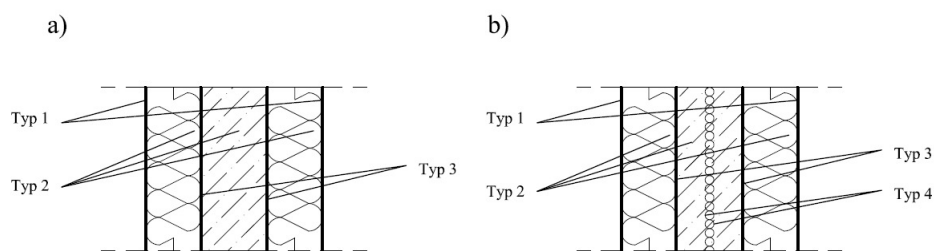
$$\dot{Q} = \sum_{j=1}^4 \left(\frac{1}{R} \cdot A \cdot \Delta T_j \right) \quad (2)$$

gdzie: R – opór cieplny między danymi segmentami, [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$],
 A – powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy danymi segmentami, [m^2]
 $A = d \cdot l$,
 ΔT_j – różnica temperatur między segmentami, [K].

$$\dot{Q} \cdot \Delta \tau = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3)$$

gdzie: m – masa komórki bilansowej, [kg],
 c – ciepło właściwe komórki bilansowej, [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$],
 ΔT – przyrost temperatury w komórce bilansowej, [K].

Położenie punktów węzłowych w komórkach bilansowych przedstawiono na rys. 2, zestawiając 4 charakterystyczne typy elementów dla odpowiednich warunków brzegowych. Typ 1 komórki odnosi się do warunku brzegowego III rodzaju, typ 2 do komórek wewnętrznych, typ 3 do warunku brzegowego IV rodzaju z idealnym stykiem materiałów, natomiast typ 4 do warunku brzegowego I rodzaju. Dla warunku początkowego przyjęto stałą i jednakową temperaturę w przegrodzie dla wszystkich 3 warstw, w przypadku bariery termicznej temperaturę początkową ustalono stałą: 18°C dla warunków obliczeniowych, a do obliczeń wariantowych średnią arytmetyczną średniej miesięcznej temperatury dla miasta Poznania pobranej ze strony Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa [5] i temperatury wewnętrznej. Temperaturę wewnętrzną założono 24°C (dla okresu letniego) oraz 20°C (dla pozostałych miesięcy). Współczynniki przewodzenia ciepła, ciepła właściwego opisano w rozdziale 2.1. Opór przenikania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody przyjęto $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, natomiast na zewnętrznej równy $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Wykonano obliczenia iteracyjne za pomocą programu MS Excel, aż do momentu, gdy temperatura pozostanie niezmienna z dokładnością $0,0001^\circ\text{C}$.



Rys. 2. Przegroda z zaznaczonymi warunkami brzegowymi

Fig. 2. The wall with the indication of boundary conditions

Tabela 1. Równania temperatury na końcu kroku czasowego

Table 1. The temperature's equations at the end of the time step

Typ	Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego
1	$T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \left[\frac{d}{R_{si} + \frac{d}{2\lambda_s}} (T_i - T_{x,y}) + \lambda_s (T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 3T_{x,y}) \right]$ $T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \left[\frac{d}{R_{se} + \frac{d}{2\lambda_s}} (T_e - T_{x,y}) + \lambda_s (T_{x-1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 3T_{x,y}) \right]$
2	$T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} (T_{x-1,y} + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y})$ $T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} (T_{x-1,y} + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y})$
3	$T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{2}{\rho_s \cdot c_s + \rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \left[\lambda_s (T_{x-1,y} - T_{x,y}) + \lambda_b (T_{x+1,y} - T_{x,y}) + \frac{\lambda_s + \lambda_b}{2} (T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 2T_{x,y}) \right]$ $T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{2}{\rho_b \cdot c_b + \rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} \left[\lambda_b (T_{x-1,y} - T_{x,y}) + \lambda_s (T_{x+1,y} - T_{x,y}) + \frac{\lambda_b + \lambda_s}{2} (T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 2T_{x,y}) \right]$
4	$T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} (T_{x-1,y} + T_b + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y})$ $T_{x,y}^+ = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta \tau}{d^2} (T_b + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y})$
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 1</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 2</p> </div> </div>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 3</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 4</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Typ 4</p> </div> </div>	

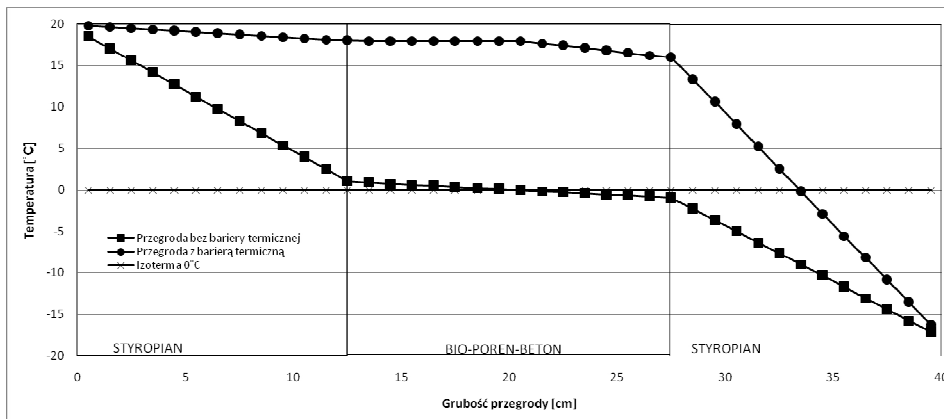
Objaśnienia do tabeli 1:

- c_b – ciepło właściwe betonu, [J/(kg·K)];
 c_s – ciepło właściwe styropianu, [J/(kg·K)];
 d – krok przestrzenny, [m];
 T_e – temperatura zewnętrzna, [K];
 T_i – temperatura wewnętrzna, [K];
 T_b – temperatura bariery termicznej, [K];
 $T_{x,y}$ – temperatura w węźle o współrzędnych x,y , [K];
 R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody, [m²·K/W];
 R_{si} – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody, [m²·K/W];
 $\Delta\tau$ – krok czasowy, [s];
 λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła styropianu, [W/(m·K)];
 λ_b – współczynnik przewodzenia ciepła betonu, [W/(m·K)];
 $T_{x,y}^+$ – temperatura w węźle na końcu kroku czasowego, [K].

3. Uzyskane rezultaty

3.1. Pola temperatur dla warunków obliczeniowych

Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie (rys. 3). Dla rozwiązania z barierą termiczną izoterma 0°C wystąpiła w warstwie izolacji, natomiast w przypadku tradycyjnej przegrody w warstwie konstrukcyjnej ściany.



Rys. 3. Rozkład temperatur w przegrodzie

Fig. 3. The graph of the thermal gradient in the wall

3.2. Wyniki obliczeń dla średnich miesięcznych temperatur zewnętrznych

W tabeli 2 zestawiono różnice temperatur powietrza wewnętrznego oraz temperatury na powierzchni przegrody pomieszczenia w zależności od analizowanego miesiąca. Dodatkowo przedstawiono średnie miesięczne temperatury

Tabela 2. Zestawienie temperatur przyjętych do obliczeń spadku temperatury na powierzchni przegrody i uzyskanych rezultatów

Table 2. The summary of temperature taken for the calculations of the temperature fall on the surface and obtained results

Miesiąc	Średnia temperatura zewnętrzna $T_{m,e}$ [°C]	Temperatura wewnętrzna T_{int} [°C]	Różnica temperatur po stronie wewnętrznej przegrody	
			Bez bariery termicznej ΔT [°C]	Z barierą termiczną ΔT [°C]
1	0,2	20,0	0,92	0,74
2	-1,8	20,0	0,97	0,81
3	2,7	20,0	0,85	0,64
4	8,3	20,0	0,69	0,44
5	13,0	20,0	0,55	0,26
6	16,8	24,0	0,63	0,27
7	18,3	24,0	0,59	0,21
8	18,4	24,0	0,58	0,21
9	13,5	20,0	0,54	0,24
10	7,0	20,0	0,72	0,48
11	2,2	20,0	0,86	0,66
12	-0,1	20,0	0,93	0,75

zewnętrzne oraz przyjęte temperatury wewnętrzne niezbędne do wykonania obliczeń. We wszystkich miesiącach spadek temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody był mniejszy dla konstrukcji z barierą termiczną w porównaniu do konstrukcji bez niej.

4. Wnioski

Dla warunków obliczeniowych stwierdzono, że ściana zewnętrzna z barierą termiczną o temperaturze 18°C powoduje przesunięcie izotermy 0°C w kierunku środowiska zewnętrznego. Temperatura na powierzchni przegrody w pomieszczeniu jest mniejsza o 0,2°C od temperatury wewnętrznej, natomiast dla przypadku bez bariery termicznej różnica wspomnianych temperatur wynosi 1,5°C.

W przypadku obliczeń wariantowych zależnych od analizowanego miesiąca również zaobserwowano zmniejszenie różnic temperatur po stronie wewnętrznej przegrody dla konstrukcji z barierą termiczną. Największe odchyłki pomiędzy typami przegród zanotowano w miesiącach letnich, wiąże się to z temperaturą bariery termicznej, co w konsekwencji powoduje równomierny rozkład temperatury wewnątrz przegrody.

Zatem dla rozwiązania z barierą termiczną efekt wychłodzonej ściany jest mniejszy niż bez niej, co zmniejsza również ryzyko wystąpienia wykroplenia wilgoci w przegrodzie.

Przedstawiony w niniejszym referacie model obliczeniowy został przygotowany pod kątem dalszych prac i modelowania numerycznego pól temperatur

w przegrodach budynku w warunkach roku porównawczego. Planuje się dokładniejsze modelowanie bariery termicznej (układ rurek grzejnych) oraz stworzenie modelu obudowy pomieszczenia do analizy wpływu pojemności cieplnej przegród na rozwiązanie instalacji ogrzewania i wentylacji.

Literatura

- [1] Nagórski Z.: Modelowanie przepływu ciepła metodą KM3R: MBE + Excel = KM3R, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [2] Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- [3] Koczyk H.: Ogrzewnictwo: podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji budynków, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [4] <http://www.isomax.com.pl> {dostęp 14.05.2016 r.}.
- [5] <http://mib.gov.pl> {dostęp 14.05.2016 r.}.
- [6] Leciej-Pirczewska D.: Przykłady rozwiązań konstrukcji budynków w aspekcie OZE. Przegroda zewnętrzna z barierą termiczną, Budownictwo energooszczędne w Polsce – stan i perspektywy, Bydgoszcz 2015, pp. 205-216.

THE IMPACT OF THE SOLUTION FOR THE SOLAR WALL ON THE COURSE OF THE TEMPERATURE IN THE WALL

Summary

The paper shows the distribution of thermal gradient in the external walls with the thermal barrier and without the thermal barrier. The walls construction are made with the concrete and the polystyrene on the both sides. The thermal barrier are the polypropylene tubes filled by the low temperature medium. The calculations are prepared for two variants. One of them used the external temperature equals -18°C (the II climatic zone), the internal temperature in a room equals 20°C and the temperature of the thermal barrier equals to 18°C . The second used the internal temperature in a room equals 24°C (in summer), 20°C (in others months) and the mean monthly temperature. For the purpose to simulate the heat transfer in the wall are used one of the numerical methods, by elemental balances, which is based on a division of the element into sub-areas and determining the temperature at the end of the time step. To support the calculations it was prepared the spreadsheet in MS Excel, for which calculations were performed iteratively with a time step equal to 5 s for both walls. The results obtained are presented in the form of a thermal gradient. The isotherm 0°C was displaced towards to the external environment and the higher temperature at the surface of the wall in the room for the solutions with the thermal barrier compared to the classical variant. These factors affect the reduction of the risk of condensation inside constructions and feeling that the temperature falls near the external walls.

Keywords: thermal barrier, elemental balances, numerical technique, thermal gradient

DOI:10.7862/rb.2016.207

Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.