

Maja STANIEC*
Politechnika Wrocławska

ROZKŁAD TEMPERATURY W GRUNCIE WOKÓŁ BUDYNKÓW CZĘŚCIOWO LUB CAŁKOWICIE W NIM ZAGŁĘBIONYCH

Streszczenie. Artykuł dotyczy rozkładu temperatury w gruncie wokół budynków częściowo lub całkowicie w nim zagłębionych, znanych w literaturze anglojęzycznej pod nazwą „earth-sheltered buildings”. Najbardziej charakterystyczną cechą tych budynków jest ich niskie zapotrzebowanie na energię cieplną, co wynika z faktu otoczenia ich gruntem, którego bardzo duża bezwładność cieplna powoduje, że w okresie lata temperatura gruntu jest niższa niż powietrza otaczającego budynek, a zimą wyższa. Wpływa to bezpośrednio na mniejsze, w porównaniu do budynku naziemnego, straty ciepła przez zewnętrzne partycje budynku.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji pola temperatury gruntu wokół dwóch rodzajów budynków „earth-sheltered” oraz, w celu porównania, pod budynkiem tradycyjnym (naziemnym).

THE GROUND TEMPERATURE DISTRIBUTION UNDER THE EARTH-SHELTERED BUILDINGS

Summary. The article concerns the soil temperature distribution around the earth-sheltered buildings. The biggest advantage of such buildings is their low-energy consumption. It is a result of a very large thermal mass of the soil, which causes the underground surface to be warmer during the winter and cooler than on the surface, in the summer. It directly affects the heat losses through the external partitions of a building, which are smaller compared to an on-ground building.

In the article, the results of the soil temperature distribution around two types of the earth-sheltered buildings and one on-ground building are presented.

1. Wstęp

W obecnych czasach, pod presją wyczerpujących się kopalnych źródeł energii, stale rosnących cen paliwa oraz ruchu ekologicznego, związanego z efektem cieplarnianym, jedną

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Henryk Nowak, prof. Politechniki Wrocławskiej.

z wiodących dyscyplin przełomu wieków stało się budownictwo energooszczędne. Jego filozofia opiera się na trzech fundamentalnych zasadach: oszczędzania, odzysku i poboru energii z otoczenia, wykorzystując masę termiczną budynku. Jak wskazują ostatnie badania, najlepiej w powyższe wymagania wpisują się budynki znane w literaturze anglojęzycznej pod nazwą „earth-sheltered buildings”, co w tłumaczeniu dosłownym oznacza budynki chronione gruntem. Ich największą zaletą jest niskie zapotrzebowanie na energię ciepłą, wynikające z faktu otoczenia budynku gruntem, którego duża bezwładność cieplna powoduje bardzo wolną reakcję na zmiany temperatury na powierzchni gruntu. Reakcja ta jest tym wolniejsza, im głębiej gruntu sięgamy [1]. Właściwość ta powoduje, że latem temperatura otaczającego budynek gruntu jest niższa niż powietrza, a zimą wyższa. Także amplituda wahań temperatury po obu stronach przegrody jest mniejsza, co również wpływa na poprawę warunków termicznych, w jakich pracuje konstrukcja. Poprawa warunków akustycznych sprawia, że budynki zagłębione w gruncie znajdują coraz częściej zastosowanie jako domy jednorodzinne, wolnostojące (rys.1a), w zabudowie szeregowej (rys.1b) lub obiekty użyteczności publicznej (rys.1c).



Rys. 1. a) Dom jednorodzinny, wolnostojący we Frankton (Anglia), b) domy jednorodzinne w zabudowie szeregowej, Seward (USA), c) budynki UNESCO, Paryż (Francja)

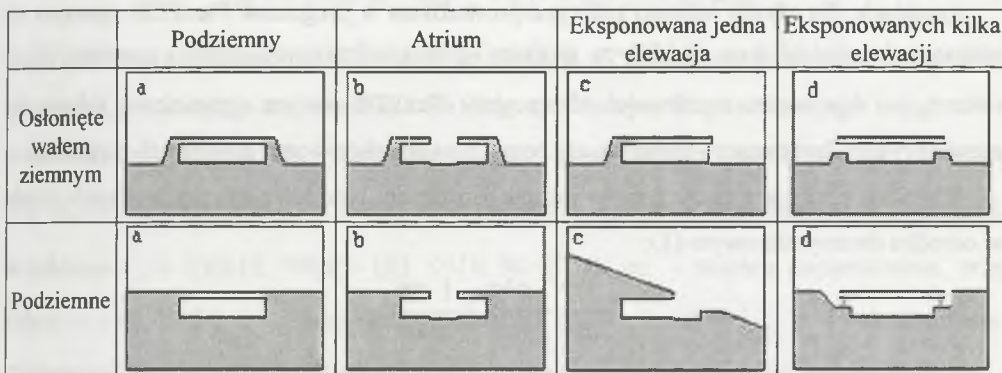
Fig. 1. a) An earth-sheltered house in Frankton (England), b) earth sheltered houses in Seward (USA), c) UNESCO buildings in Paris (France)

W ostatnich latach w Polsce widoczna jest tendencja do budowania obiektów użyteczności publicznej z kilkoma kondygnacjami podziemnymi, które są najczęściej przeznaczone na garaże lub infrastrukturę techniczną. Coraz częściej kondygnacje te zaczynają pełnić funkcję użytkową, jak na przykład w przypadku Galerii Dominikańskiej we Wrocławiu, w której jedna kondygnacja podziemna jest przeznaczona na sklepy. Jednakże w przypadku budownictwa mieszkaniowego ten typ budynków nie jest w Polsce rozpowszechniony, a budynki przysypane gruntem kojarzone są z kretowiskiem lub ziemianką. Jednak w perspektywie wdrożenia w życie w 2008 roku dyrektywy 2002/01/EC, dotyczącej jakości energetycznej budynków, w myśl której każdy budynek zostanie oceniony

pod względem zapotrzebowania na energię, a następnie zakwalifikowany do jednej z siedmiu grup jakościowych, budownictwo energooszczędne (do jakiego zdecydowanie zaliczają się budynki typu „earth-sheltered”) znajdzie się w centrum zainteresowania inwestorów. Możliwe, że już wkrótce, oprócz zwracania uwagi na kształt bryły budynku, istotna stanie się jego masa termiczna.

1.1. Rodzaje budynków częściowo lub całkowicie zagłębionych w gruncie

W literaturze zagranicznej dokonano następującej klasyfikacji budynków „earth-sheltered” [1] (rys. 2); ustanowiono podział na dwa typy (podziemne i osłonięte wałem ziemnym) oraz cztery rodzaje (budynek całkowicie zagłębiony w gruncie, o konstrukcji atrium, z eksponowaną jedną elewacją i eksponowanymi więcej niż jedną elewacją).



Rys. 2. Schematy budynków częściowo lub całkowicie zagłębionych w gruncie

Fig. 2. The positioning of the earth-sheltered buildings

2. Schematy budynków oraz założenia przyjęte do symulacji

Do symulacji przyjęto trzy schematy budynków:

- dwa zagłębione w gruncie (całkowicie zagłębiony o schemacie zamkniętym i podziemny o schemacie atrium),
- jeden budynek tradycyjny (naziemny).

W celu ujednoczenia analizy przyjęto dla wszystkich schematów budynków: grubość ścian i stropu (żelbet) – 0,30 m, grubość podłogi na gruncie – 0,15 m, grubość izolacji – 0,10 m, temperaturę wewnątrz budynku równą $T_{weW} = 293,15K$ (20°C), stałą

w okresie całego roku, oraz tę samą grubość przysypania gruntem – 1,00 m. Do symulacji przyjęto grunt jednorodny. Właściwości materiałów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Właściwości materiałów przyjętego do obliczeń

Materiał	Współczynnik przewodzenia ciepła	Gęstość objętościowa	Ciepło właściwe	Objętościowa pojemność cieplna	Współczynnik dyfuzyjności
	λ	ρ	c_p	$c_v \cdot 10^6$	$\alpha \cdot 10^6$
	[W/mK]	[kg/m ³]	[Ws/kgK]	[Ws/m ³ K]	[m ² /s]
Piasek średni	1,15	1 563	1 200	1,875	0,613
Żelbet	1,40	2 100	840	1,764	0,794
Styropian	0,045	15	1 666	0,024	1,875

3. Metoda obliczeń

Symulacje dla okresu pełnego roku przeprowadzono w programie FlexPDE, opartym na metodzie elementów skończonych. Ze względu na możliwość wprowadzania dowolnej ilości równań (co daje bogate możliwości adaptacyjne) FlexPDE nie jest ograniczony jedynie do rozwiązywania konkretnego zjawiska, ale zezwala na rozwiązywanie dowolnych zagadnień.

Wymiana ciepła w gruncie została opisana równaniem nieustalonego przewodzenia ciepła w ośrodku dwuwymiarowym (1):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

w którym $T=T(x, y, t)$ jest temperaturą gruntu w czasie t , (x, y) są współrzędnymi przestrzennymi, a α określa współczynnik dyfuzyjności cieplnej gruntu.

Warunki brzegowe

Granice wewnętrzne budynku. Temperaturę na wewnętrznych krawędziach budynku zdefiniowano jako stałą w okresie całego roku, wynoszącą $T = 293,15K$ ($20^\circ C$).

Warunek górny. Do określenia temperatury na krawędzi będącej powierzchnią gruntu przyjęto aproksymowaną do przebiegu sinusoidy temperaturę, obliczaną na podstawie równania bilansu cieplnego na powierzchni gruntu (2) (por. [2], [4], [5]),

$$-\lambda \left. \frac{\partial T_{sur}}{\partial y} \right|_{y=0} = SR + R_{sky} - R_{sur} + CE - LE, \quad (2)$$

w którym na temperaturę na powierzchni gruntu mają wpływ:

- SR – natężenie promieniowania słonecznego, absorbowanego przez powierzchnię gruntu (promieniowanie krótkofalowe), wyrażone wzorem:

$$SR = bS = (1 - a)S \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (3)$$

- R_{sky} – natężenie promieniowania niebosłonu (promieniowanie długofalowe):

$$R_{sky} = (240,0 + 5,55t_a)(1 - cc) + (311,0 - 5,27t_a)cc \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (4)$$

- R_{sur} – natężenie promieniowania powierzchni gruntu (promieniowanie długofalowe):

$$R_{sur} = \varepsilon\sigma T_{sur}^4 \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (5)$$

- CE – natężenie wymienianej energii poprzez konwekcję na granicy grunt - powietrze:

$$CE = h_{sur}(T_a - T_{sur}) \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (6)$$

- LE – natężenie energii powstałej na skutek parowania gruntu:

$$LE = 0,0168 fh_{sur} \left[(\dot{a}T_{sur} + \dot{b}) - r_a(\dot{a}T_a + \dot{b}) \right] \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (7)$$

w których: a – albedo powierzchni gruntu (przyjęto: $a = 0,2$ [-] i $a = 0,8$ [-] dla odpowiednio gruntu nie porośniętego roślinnością i dla okresu, w którym na gruncie zalega śnieg); S – natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą, w zakresie $S \in \langle 0; 940 \rangle$ [W/m²]; t_a, T_a – temperatura powietrza wyrażona odpowiednio w [°C] i [K], w zakresie $t_a \in \langle 289,15; 309,15 \rangle$ [K] ($\langle 16; 36 \rangle$ [°C]); cc – stopień zachmurzenia, przy czym $cc \in \langle 0; 1 \rangle$ [-]; ε – emisyjność powierzchni gruntu, $\varepsilon = 0,90$ [-]; σ – stała Stephana-Boltzmana, $\sigma = 5,76 \cdot 10^{-8}$ [W/m² K⁴]; T_{sur} – temperatura powierzchni gruntu, [K]; h_{sur} – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, wyrażony przez prędkość wiatru v wzorem: $h_{sur} = 0,5 + 1,2\sqrt{v}$ [W/m²], przy czym $v \in \langle 0; 16 \rangle$ [m/s]; f – frakcja określająca stopień parowania w zależności od rodzaju pokrycia powierzchni gruntu oraz jego wilgotności; r_a – wilgotność względna powietrza, przy czym $r_a \in \langle 0; 1 \rangle$ [-]; \dot{a}, \dot{b} – współczynniki wynoszące: $\dot{a} = 103$ [Pa/K], $\dot{b} = 609$ [Pa].

Powyższe zakresy danych meteorologicznych dotyczą rejonu Legnicy z roku meteorologicznego 2005. Dane uzyskano dzięki uprzejmości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu.

Warunek dolny. Jak wskazują badania i symulacje przeprowadzone przez innych badaczy (por. 1, 4), temperatura na głębokości ok. 10-15 metrów jest stała i równa średniej rocznej temperaturze na powierzchni gruntu. Stąd warunkiem dolnym jest temperatura na

głębokości 15 metrów, równa średniej rocznej wartości temperatury na powierzchni gruntu (dokładnie na głębokości 5 cm), która wynosi $T_{y=15m} = 283,51K$ ($10,36^{\circ}C$).

Pionowe krawędzie ograniczające grunt. Granice zdefiniowano jako adiabatyczne, czyli do ciała nie jest dostarczana ani odbierana energia (doskonały izolator).

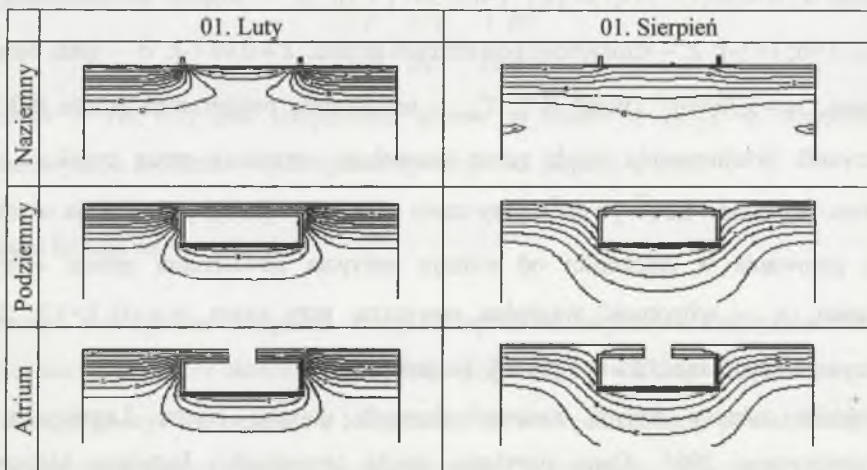
$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\text{brzeg_lewy}} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\text{brzeg_prawy}} = 0 \quad (8)$$

Granice na styku materiałów. W przypadku dwóch ciał o różnych przewodnościach cieplnych, stykających się ze sobą na ich granicy, musi być zachowana ciągłość przepływu ciepła. Warunek ciągłości prostopadłego do granicy przepływu ciepła ma postać (9) [3]:

$$-\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_1 = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_2 = 0 \quad (9)$$

4. Wyniki symulacji i wnioski

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji w dwóch charakterystycznych miesiącach: dla zimy – w lutym i dla lata – w sierpniu. W celu ogólnego naświetlenia przeprowadzonych symulacji, na rysunku 3 przedstawiono izotermie temperatury gruntu wokół wybranych do symulacji budynków.

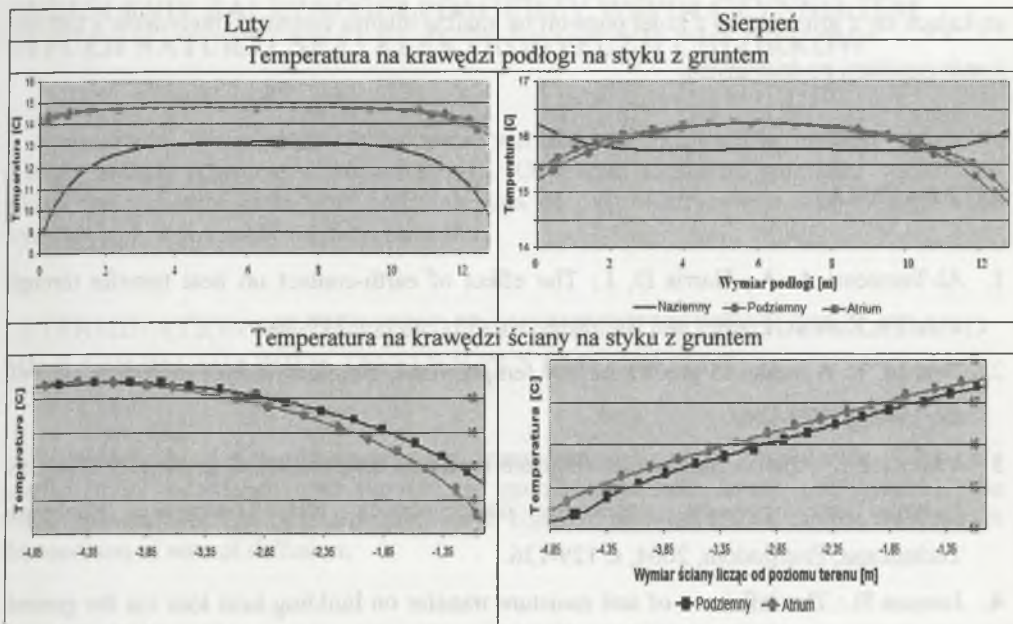


Rys. 3. Kontury temperatury gruntu wokół budynków

Fig. 3. The soil temperature contours around the buildings

W tabeli 2 zestawiono zakresy wahań temperatury (wynikające z wykresów przedstawionych na rysunku 4) na krawędzi podłogi i ściany stykającej się z gruntem dla lutego i sierpnia. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że w okresie zimy

temperatura na zewnętrznej krawędzi podłogi na gruncie jest, w przypadku budynku naziemnego, niższa o ok. 6°C w porównaniu do obydwu budynków podziemnych. W okresie zimy, we wszystkich analizowanych schematach budynków, temperatura krawędzi podłogi na gruncie jest wyższa od temperatury powietrza zewnętrznego, podczas gdy w okresie lata temperatura ta jest niższa (o ok. $8,5^{\circ}\text{C}$ i 10°C odpowiednio dla budynku naziemnego i budynków podziemnych), co powoduje, że zimą grunt ogrzewa, a latem chłodzi podłogę.



Rys. 4. Rozkład temperatury na zewnętrznej krawędzi podłogi i ściany budynków
Fig. 4. The temperature distribution on the external surfaces of buildings' slab and wall

Tabela 2

Porównanie otrzymanych wyników

	Temperatura krawędzi podłogi [$^{\circ}\text{C}$]		Temperatura krawędzi ściany [$^{\circ}\text{C}$]	
	Luty	Sierpień	Luty	Sierpień
Temperatura powietrza	0 ~ 2	23 ~ 25	0 ~ 2	23 ~ 25
Naziemny	8,6 ~ 13,2	15,7 ~ 16,3	0 ~ 2	23 ~ 25
Podziemny	13,8 ~ 14,8	15,0 ~ 16,3	7,2 ~ 13	14,2 ~ 17,4
Atrium	13,5 ~ 14,8	14,8 ~ 16,3	4,5 ~ 13	14,4 ~ 17,8

Sytuacja wygląda zdecydowanie inaczej w przypadku ściany zewnętrznej. Zakładając, że temperatura ściany zewnętrznej budynku naziemnego jest równa temperaturze powietrza zewnętrznego, zimą temperatura na zewnętrznej krawędzi ściany budynków podziemnych jest o ok. $5\text{-}13^{\circ}\text{C}$ wyższa w stosunku do temperatury ściany budynku naziemnego, co wpływa na

zdecydowanie mniejsze straty ciepła przez ściany zewnętrzne. Natomiast latem jest ok. 14-18°C niższa od temperatury na powierzchni ściany budynku naziemnego, co chroni budynek przed nadmiernym ogrzewaniem się.

Podsumowując, we wszystkich analizowanych przypadkach temperatura pod budynkiem jest podobna i bardziej stabilna niż wokół niego (ściany). Jest to spowodowane dość silnym oddziaływaniem warunków atmosferycznych panujących na powierzchni gruntu. Dalsza analiza rozkładu temperatury w gruncie pozwoli określić straty ciepła przez partycje budynku stykające się z gruntem, co z kolei pozwoli na analizę bilansu cieplnego budynków z kilkoma kondygnacjami podziemnymi.

LITERATURA

1. Al-Temeemi A. A., Harris D. J.: The effect of earth-contact on heat transfer through a wall in Kuwait. *Energy and Buildings*, No. 35, 2003, p. 399-404.
2. Best M. J.: A model to predict surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 88, 1998, p. 279-306.
3. Ickiewicz I.: Analiza możliwości obliczeń rozkładu temperatury w gruncie w otoczeniu budynku przy pomocy programów numerycznych. VII Konferencja Naukowo-Techniczna, Energodom, 2004, s. 129-136.
4. Janssen H.: The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium 2002.
5. Staniec M, Nowak H.: Wpływ zmiennego zawilgocenia gruntu na jego naturalne pole temperatury. *Fizyka budowli w teorii i praktyce – Sekcja Budowli KILiW PAN, Łódź* 2007, s. 255-260.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Wawrzynek