

dr hab. inż. Irena Ickiewicz, prof. PB¹⁾
ORCID: 0000-0002-6990-4548

Optymalna, pod względem głębokości posadowienia oraz efektywności energetycznej, izolacja cieplna fundamentów bezpośrednich budynków ogrzewanych

Optimal, in terms of foundation depth and energy efficiency, thermal insulation for the direct foundations of heated buildings

DOI: 10.15199/33.2022.04.18

Streszczenie. Celem analiz było opracowanie optymalnej izolacji termicznej fundamentów pozwalającej na zmniejszenie normowej głębokości posadowienia nawet do 0,5 m, jeżeli głębokość ta jest podyktowana tylko ochroną fundamentów przed zniszczeniem spowodowanym przemarzaniem gruntu. Odpowiednio ocieplone fundamenty, poza poprawą bilansu cieplnego budynku, mogą być posadowione na mniejszej głębokości niż wymagania normowe. Analizę wpływu izolacji cieplnej na rozkład temperatury w otoczeniu łąwy fundamentowej wykonano za pomocą obliczeń symulacyjnych (korzystając z programu numerycznego HEAT2). Na podstawie analizy wyników opracowano wzory obliczeniowe wartości temperatury w punkcie najbardziej narażonym na przemarzanie. Otrzymane wartości obliczeniowe temperatury w punktach pomiarowych uzależnione są od wskaźnika stopniodni temperatury ujemnej F_d , współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] gruntu oraz eksploatacji budynku.

Słowa kluczowe: izolacja cieplna fundamentów; głębokość posadowień.

Abstract. The aim of the analyzes was to develop optimal thermal insulation of foundations that would allow to reduce the standard foundation depth even to 0.5 m, if this depth is dictated only by the protection of the foundations against damage caused by freezing ground. Properly insulated foundations improve the thermal balance of the building. They can be located at a shallower depth than that imposed by the standard requirements. The influence of the thermal insulation on the temperature distribution in the vicinity of the continuous footing was analyzed by means of simulation calculations (using the HEAT2 numerical program). Based on the analysis of the results, the formulas for calculating temperature values at the point most exposed to freezing were developed. The obtained calculation values of temperature at measurement points depend on the degree-days factor of sub-zero temperature F_d , the thermal conductivity coefficient λ [W/(m·K)] of the soil and the type of building operation.

Keywords: thermal insulation of foundations; foundation depth.

Znajomość pól temperatury w gruntach, szczególnie położenia izotermy „0” (utożsamianej z głębokością przemarzania), jest bardzo ważna dla praktyki inżynierskiej. Głębokość przemarzania gruntów ma istotny wpływ na głębokość posadowienia bezpośredniego budynków przy projektowaniu izolacji termicznych chroniących grunt pod fundamentem przed przemarzaniem, które może skutkować powstaniem wysadziny, a w konsekwencji zniszczeniem konstrukcji fundamentu. Aby zaprojektować odpowiednią ochronę cieplną fundamentów przed zniszczeniem, należy wcześniej określić maksymalną głębokość przemarzania gruntów, która zależy od wskaźnika stopniodni temperatury ujemnej F_d w analizowanej lokalizacji (strefie klimatycznej) oraz charakterystyki cieplnej podłoża gruntowego (współczynnika przewodzenia ciepła λ) [1, 2, 3]. Opracowanie efektywnego modelu obliczeniowego pozwalającego na zweryfikowanie zaleceń normowych dotyczących głębo-

kości posadowienia bezpośredniego fundamentów (jeżeli głębokość ta jest podyktowana tylko głębokością przemarzania gruntu) jest bardzo trudne, gdyż dotyczy wyznaczania rozkładu temperatury w gruntach zamarzających [1, 2, 3, 4]. Opracowanie takiego modelu wymaga więc dogłębnej analizy metod teoretycznych, empirycznych oraz numerycznych.

Model teoretyczny przemarzania gruntu

Do analizy matematycznej zjawiska przemarzania gruntu wykorzystano równanie różniczkowe Fouriera opisujące przepływ ciepła w ciele jednorodnym pomiędzy dwoma punktami o różnej temperaturze. W wyniku tego otrzymano równania matematyczne, które są możliwe do rozwiązania przez zastosowanie pewnych założeń upraszczających, np. założenie zmienności parametrów zgodnie z obraną funkcją [5, 6]. Do tego celu można również wykorzystać odpowiednie programy numeryczne. Aby wyniki otrzymane z modelu były miarodajne, powinny być zdefiniowane parametry modelu. Ponadto model musi być zweryfikowany na podstawie danych empirycznych (pomiarów bezpośrednie).

¹⁾ Politechnika Białostocka; Wydział Budownictwa i Nauki o Środowisku; i.ickiewicz@pb.edu.pl

Do analizy wykorzystano metodę rozdzielania zmiennych oraz jednowymiarowy klasyczny model analityczny procesu przemarzania gruntu, w przypadku którego przyjęto następujące założenia [1, 4]:

- temperatura w gruncie przed mrozami T_0 jest wyrównana i równa temperaturze gruntu na dużej głębokości;
- temperatura powierzchni gruntu jest stała przez cały okres mrozów i równa T_c .

Równania przewodnictwa cieplnego Fouriera obszaru niezamarzniętego i zamarzniętego mają postać:

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{dla } (t > 0, 0 \leq x < X) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} \quad \text{dla } (t > 0, X \leq x < \infty), \quad (2)$$

gdzie:

- T_1 – temperatura [$^{\circ}\text{C}$];
- x – współrzędna przestrzenna [m];
- t – czas [s];
- $a_i = \lambda / (c_p \cdot \rho)$ – współczynnik wyrównania temperatury [m^2/s];
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$];
- X – głębokość (rzędna granicy zmiany faz) [m].

Warunki brzegowe:

- na powierzchni gruntu skokowy spadek temperatury: $t > 0, x = 0, T_1(0, t) = T_c < 0$ [$^{\circ}\text{C}$] (3)

- na dużej głębokości (stała temperatura): $t > 0, x \rightarrow \infty, T_2(x, t) = T_0$ (4)

- na styku dwu obszarów (głębokość zamarzania): $t > 0, x = X, \lambda_1(\partial T_1/\partial x) = \lambda_2(\partial T_2/\partial x) = L\rho\omega(\partial x/\partial t)$ (5)

przy założeniu, że woda zamarza w temperaturze T_k : $t > 0, x = X, T_1(x, t) = T_2(x, t) = T_k$, (6)

oraz **warunek początkowy**: $T_1(x, t) = T_2(x, t) = T_0 = \text{const.}$ (7)

gdzie:

- $\lambda_1(\partial T_1/\partial x)$ – gęstość strumienia naprowadzającego;
- $\lambda_2(\partial T_2/\partial x)$ – gęstość strumienia odprowadzającego;
- L – ciepło utajone przemiany fazowej woda-lód;
- ρ – gęstość objętościowa gruntu [kg/m^3];
- ω – zawartość (masowa) wody wolnej w gruncie;
- T_k – temperatura krzepnięcia wody wolnej.

Przy znanej wartości stałej C głębokość przemarzania X można wyznaczyć z wzoru

$$X = 2C\sqrt{a_1 t} \quad (8)$$

gdzie:

C – tzw. stała zamarzania (stała C jest rozwiązaniem równania charakterystycznego).

Rozkład temperatury w gruncie zakłóconym źródłami ciepła (ogrzewaniem budynkiem). W opisanym modelu przemarzania gruntu, istotne czynniki to: temperatura zamarzania wody w gruncie; współczynnik przewodzenia ciepła λ gruntu; zawartość masowej wody w gruncie; źródła ciepła, np. przemiana fazowa (w równaniu Fouriera – stała Stefana); temperatura gruntu przed okresem mrozów oraz temperatura powierzchni gruntu (warunek początkowy i brzegowy).

Na rozkład temperatury w gruncie, poza wymienionymi czynnikami, ma wpływ temperatura powietrza w funkcji czasu oraz budynki zwłaszcza ogrzewane (stykające się z gruntem ściany, podłogi, fundamenty). Jednym z modeli oblicze-

niowych, charakteryzującym się dobrą zgodnością, jest model Henrikssona, z którego wynika, że szerokość pasa przyściennego, w którym stwierdzono wpływ temperatury zewnętrznej powietrza na straty ciepła przez przegrody stykające się gruntem, wynosi ok. 75 cm. Z tego powodu, jeszcze na początku XXI wieku PN-91/B02020 zalecała, aby podłogi na gruncie posiadały izolację cieplną na szerokość 1 m wzdłuż ścian zewnętrznych [7, 8].

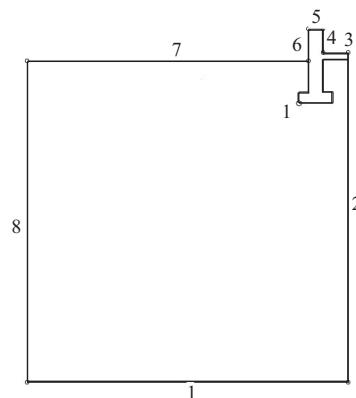
Model obliczeniowy. W celu określenia wpływu budynku na rozkład temperatury w gruncie w otoczeniu fundamentów opracowano model obliczeniowy. Dane wyjściowe do obliczeń:

- budynek ogrzewany, niepodpiwniczony, posadowiony na ławach żelbetonowych 40 x 70; beton zbrojony o współczynniku $\lambda = 1,7$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], grunt o współczynniku $\lambda = 0,85$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$];
- temperatura powietrza wewnątrz budynku $+20^{\circ}\text{C}$;
- warunki brzegowe budynku ogrzewanego (numeracja analizowanych powierzchni brzegowych, jak na rysunku 1).

Wzory obliczeniowe.

Analizę wpływu izolacji cieplnej na rozkład temperatury w otoczeniu ławy fundamentowej wykonano, korzystając z programu numerycznego HEAT2 do dwukierunkowych strat ciepła. Do obliczeń przyjęto ekstremalne warunki klimatyczne, jakie były notowane w przypadku zim z 50-letnim okresem powrotu ($F_d \geq 900$ stopniodni temperatury ujemnej). Na podstawie analizy otrzymanych wartości obliczeniowych temperatury w okolicy fundamentów na głębokości 50 cm opracowano wzory obliczeniowe do określenia maksymalnej wartości temperatury, jakie mogą wystąpić w okolicy fundamentów (styku fundamentu z podłożem – w punkcie najbardziej narażonym na przemarzanie – pkt 1 rysunek 2).

Wartości obliczeniowe temperatury. Wartości temperatury na styku fundamentu z gruntem (jak podano wcześniej) zależą od strefy klimatycznej (F_d), rodzaju gruntu (λ) oraz rodzaju ocieplenia fundamentu (izolacji cieplnej). Podaję 3 przykładowe wzory (9), (10) i (11) do obliczania temperatury, opracowane przez Autorkę [1]. Wzór (9) określa wartości najniższej temperatury T w pkt 1 nieocieplonych fundamentów, opracowane na podsta-

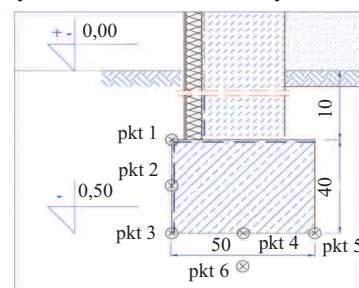


Powierzchnie: 1 – $T = \text{const.} = 9,5^{\circ}\text{C}$; 3 – $T = \text{const.} = 20^{\circ}\text{C}$, $R_{si} = 0,17$ [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]; 4 – $T = \text{const.} = 20^{\circ}\text{C}$, $R_{si} = 0,13$ [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]; 6, 7 – $T(t)$ funct (dane klimatyczne); 1, 2, 8 – powierzchnie adiabatyczne, $q = 0$

Rys. 1. Numeracja powierzchni brzegowych

Fig. 1. Numbering of peripheral surfaces

Analizę wpływu izolacji cieplnej na rozkład temperatury w otoczeniu ławy fundamentowej wykonano, korzystając z programu numerycznego HEAT2 do dwukierunkowych strat ciepła. Do obliczeń przyjęto ekstremalne warunki klimatyczne, jakie były notowane w przypadku zim z 50-letnim okresem powrotu ($F_d \geq 900$ stopniodni temperatury ujemnej). Na podstawie analizy otrzymanych wartości obliczeniowych temperatury w okolicy fundamentów na głębokości 50 cm opracowano wzory obliczeniowe do określenia maksymalnej wartości temperatury, jakie mogą wystąpić w okolicy fundamentów (styku fundamentu z podłożem – w punkcie najbardziej narażonym na przemarzanie – pkt 1 rysunek 2).



Rys. 2. Ława fundamentowa – punkt pomiarowy pkt 1

Fig. 2. Continuous footing – measuring point 1

Wartości obliczeniowe temperatury. Wartości temperatury na styku fundamentu z gruntem (jak podano wcześniej) zależą od strefy klimatycznej (F_d), rodzaju gruntu (λ) oraz rodzaju ocieplenia fundamentu (izolacji cieplnej). Podaję 3 przykładowe wzory (9), (10) i (11) do obliczania temperatury, opracowane przez Autorkę [1]. Wzór (9) określa wartości najniższej temperatury T w pkt 1 nieocieplonych fundamentów, opracowane na podsta-

wie wartości symulacyjnych otrzymanych z obliczeń numerycznych (HEAT2), w zależności od F_d i gruntu o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 0,85$ [W/(m·K)]; wzór (10) uwzględnia również zmianę współczynnika λ [W/(m·K)], gdzie zmiana wartości n o jedną jednostkę powoduje zmianę współczynnika λ o 0,05 (np. gdy $n = 0 \rightarrow \lambda = 0,85$, $n = 1 \rightarrow \lambda = 0,90$), natomiast wzór (11) uwzględnia dodatkowo wpływ zastosowanej izolacji cieplnej ściany i ławy fundamentowej, tj. styropianu ekstrudowanego grubości 8 cm (w przypadku innej grubości izolacji cieplnej wzory mają inną postać).

$$T = -0,01 \cdot F_d + 5,95 \quad (9)$$

$$T = -0,01 \cdot F_d + 5,95 + (-0,087 \cdot n) \quad (10)$$

$$T = -0,01 \cdot F_d + 9,90 + (-0,09 \cdot n) \quad (11)$$

gdzie :

F_d – współczynnik stopniodni temperatury ujemnej liczonych metodą norweską [11];

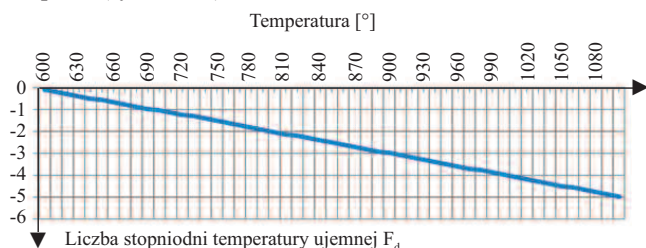
n – wartość zależna od wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ_{gruntu} , gdy $\lambda_{\text{gruntu}} = 0,85$, $n = 0$, zmiana wartości n o jedną jednostkę powoduje zmianę współczynnika λ o 0,05 (np. gdy $n = 0 \rightarrow \lambda = 0,85$, $n = 1 \rightarrow \lambda = 0,90$).

Otrzymane z wzorów wyniki zostały zweryfikowane badaniami bezpośrednimi oraz danymi IMiGW. Do badań bezpośrednich współczynnika λ skonstruowano w Laboratorium Fizyki Budowli Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej sondę liniową o stałym wydatku ciepła, wykorzystującą metodę niestacjonarną pomiaru współczynnika λ [7].

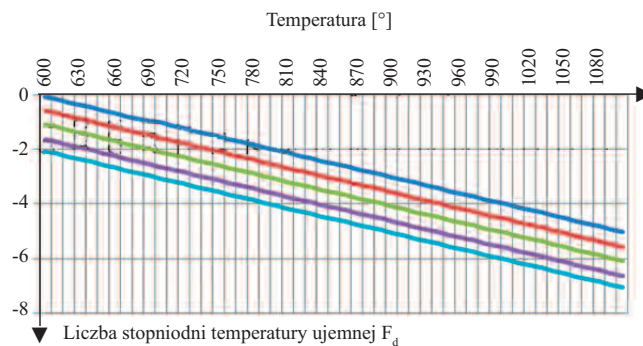
Analiza wyników

Korzystając z wzorów (9 ÷ 11), wykonano obliczenia wartości symulacyjnych temperatury T w punkcie nr 1 (najbardziej narażonym na przemarzanie) nieocieplonej ławy fundamentowej posadzonej na głębokości 50 cm, w budynku ogrzewanym (rysunek 2). Wyniki zamieszczono na rysunku 3, a na rysunku 4 przedstawiono dodatkowo zależność wartości temperatury T od różnych wartości λ (różnego rodzaju podłoża gruntowego).

Z analizy rysunku 3 zawierającego zależność wartości temperatury w pkt 1 fundamentu (rysunek 2) od stopniodni temperatury ujemnej F_d wynika, że w analizowanym punkcie pomiarowym ujemna temperatura występuje już przy $F_d > 630$ stopniodni. Należy również zauważyć, że w polskich warunkach klimatycznych w okresie ≥ 50 lat (czas eksploatacji budynku) praktycznie w każdej strefie klimatycznej przynajmniej raz na kilkanaście lat występują zimy przekraczające wartość $F_d > 630$ stopniodni temperatury ujemnej [10]. Kolejne obliczenia uwzględniają, poza wskaźnikiem F_d , różne wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ (rysunek 4).



Rys. 3. Symulacyjne wartości temperatury w pkt 1
Fig. 3. Simulating temperature values in point 1

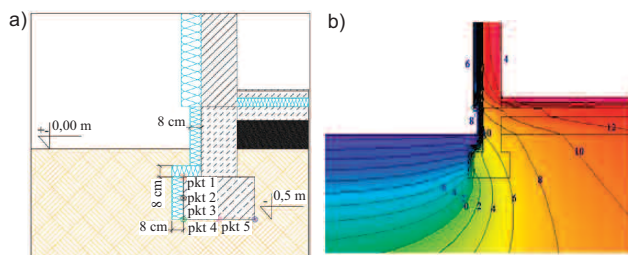


Oznaczenia: — $\lambda = 0,85$; — $\lambda = 1,15$; — $\lambda = 1,45$; — $\lambda = 1,75$; — $\lambda = 2,00$;

Rys. 4. Symulacyjne wartości temperatury w pkt 1
Fig. 4. Simulating temperature values in point 1

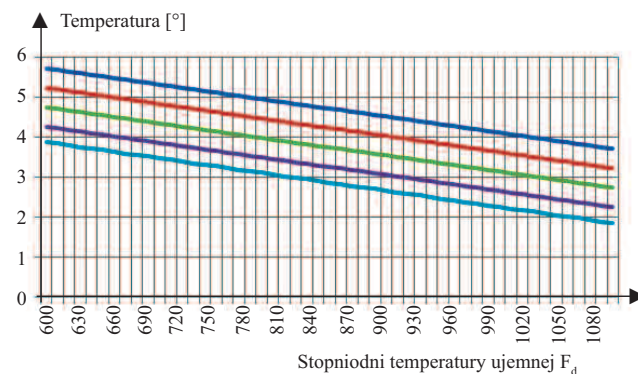
Przedstawione na rysunkach 3 i 4 wartości temperatury w przypadku fundamentów posadowionych na głębokości 50 cm są we wszystkich przypadkach ujemne ($T < 0^\circ\text{C}$), dlatego też może wystąpić ryzyko przemarzania gruntu pod fundamentem. Aby ochronić fundament przed wysadziną, należy zastosować optymalną izolację cieplną. Na rysunku 5 zamieszczono przykład takiej izolacji (styropian ekstrudowany grubości 8 cm) oraz wartości izoterm obliczonych dla ekstremalnych warunków pogodowych. Na rysunku 6 zamieszczono wartości symulacyjne temperatury T dla tak ocieplonego fundamentu posadzonego na różnych gruntach.

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzono, że ocieplenie ściany i ławy fundamentowej styropianem ekstrudowa-



Rys. 5. Przykład ocieplenia fundamentu (a) i rozkład temperatury w przypadku ekstremalnych warunków pogodowych – zima 2005/2006 (b)

Fig. 5. Example insulation of the foundation (a) and temperature distribution for extreme weather conditions – winter 2005/2006 (b)



Oznaczenia: — $\lambda = 0,85$; — $\lambda = 1,15$; — $\lambda = 1,45$; — $\lambda = 1,75$; — $\lambda = 2,00$; fundament ocieplony styropianem grubości 8 cm

Rys. 6. Symulacyjne wartości temperatury w pkt 3
Fig. 6. Simulating temperature values in point 3

nym grubości 8 cm chroni fundament przed uszkodzeniem (wysadzina) nawet w ekstremalnych warunkach ($F_d = 1080$, $\lambda_{\text{gruntu}} = 2,0$ [W/(m·K)]) pod warunkiem, że budynek nie będzie miał dłuższych przerw w ogrzewaniu wynoszących powyżej siedmiu dni.

Podsumowanie

W polskich warunkach klimatycznych budynki niepodpiwniczone można posadawiać na głębokości 0,5 m, jeżeli wartość ta podyktowana jest tylko głębokością przemarzania gruntu, pod warunkiem że fundamenty budynków będą miały optymalną izolację termiczną określoną na podstawie warunków klimatycznych i rodzaju podłoża. Wartości najniższej temperatury na styku nieocieplonego fundamentu z podłożem gruntowym zależą przede wszystkim od wskaźnika stopniodni temperatury ujemnej F_d (liczony metodą norweską [11]) oraz współczynnika przewodzenia ciepła λ podłoża (gruntu).

Przeprowadzone analizy aktualnego stanu wiedzy oraz badania własne, poparte obliczeniami i zweryfikowane pomiarami bezpośrednimi, pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- warunkiem posadowienia fundamentów na mniejszej głębokości niż wymagania normowe (jeżeli głębokość ta podyktowana jest tylko głębokością przemarzania gruntów) jest ich odpowiednie ocieplenie, które zależy głównie od lokalizacji budynku (strefy klimatycznej) oraz rodzaju podłoża;

- w przypadku lokalizacji budynku, w której wskaźnik stopniodni temperatury ujemnej przekracza wartość $F_d > 700$, a głębokość posadowienia jest mniejsza niż wymagania normowe, fundamenty powinny mieć izolację cieplną grubości minimum 8 cm styropianu ekstrudowanego o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda = 0,045$ [W/(m·K)] lub innego materiału o podobnych właściwościach termicznych. Warunek ten dotyczy tylko budynków ogrzewanych. W przypadku budynków z przerwami w ogrzewaniu wynoszącymi więcej niż tydzień, należałoby zwiększyć izolację cieplną do minimum 12 cm;

- optymalnie zaprojektowana izolacja termiczna to nie tylko ochrona fundamentów przed zniszczeniem spowodowanym przemarzaniem gruntu wysadzinowego pod fundamentem, ale również poprawa bilansu cieplnego całego budynku;

- aby skutecznie poprawić bilans budynku, grubość izolacji termicznej ściany fundamentowej i ławy lub płyty fundamentowej (podłogi na gruncie) powinna wynosić minimum 15 cm styropianu ekstrudowanego lub XPS, a nawet 20 cm w przypadku możliwości technicznych;

- ocieplenie ściany fundamentowej powoduje likwidację lub minimalizację mostków cieplnych na styku ściany zewnętrznej ze ścianą fundamentową; w miejscach mostków cieplnych, poza dodatkowymi stratami ciepła, może pojawić się również wilgoć kondensacyjna;

- podłoga na gruncie, ze względu na komfort cieplny użytkowników, powinna być ocieplona na całej powierzchni, a nie tylko 1 m wzdłuż ścian zewnętrznych [7]. Ocieplona podłoga zmniejsza różnicę rozkładu temperatury między powierzchnią podłogi a sufitem (przy braku ocieplenia podłogi na całej powierzchni różnica temperatury może wynosić nawet $> 4^\circ\text{C}$);

- posadowienie fundamentów na mniejszej głębokości w przypadku budynków 1 – 2-kondygnacyjnych zmniejsza koszty wykonania fundamentów o 10 – 25%, a eksploatacji (ogrzewania) budynku o 3 – 4%.

Literatura

- [1] Ickiewicz Irena 2010. „Posadowienie fundamentów bezpośrednich w funkcji przemarzania gruntów”. *Rozprawy Naukowe* nr 202. Oficyna Wydawnicza PB.
 - [2] Żurański Jerzy Antoni. 2017. „O przemarzaniu gruntów w Polsce”. *Monografie*, ITB.
 - [3] Ickiewicz Irena. 1988. *Przewodzenie ciepła w gruntach budowlanych*. ITB.
 - [4] Ickiewicz Irena, Aleksander Panek. 1992. „Numerisches Modelle zum Berechnung der grun-deinfertiefe”. *Baupfistik*, s. 21 – 23.
 - [5] Zaryczyk K., W. Nowak. 2003 *Various mathematical models of heat transfer process in ground energy storage bin*. Warsaw. 9th International Conference on Thermal Energy Storage.
 - [6] Kozłowski Tomasz. 1985 „Dyskusja na temat obliczania głębokości przemarzania podłoża gruntowego”. *ZN PŚk., Budownictwo* 20. Kielce.
 - [7] Ickiewicz Irena, Wiesław Sarosiek, Jerzy Ickiewicz. 2000. *Fizyka Budowli wybrane zagadnienia*. Dział Wydawnictw Poligrafii PB.
 - [8] Wiśniewski Stefan, Tomasz Wiśniewski. 2000. *Wymiana ciepła*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Tech.
 - [9] Ickiewicz Irena, Jerzy Andrzej Pogorzelski. 1987. „Wpływ wybranych czynników na głębokość przemarzania gruntów”. *Inżynieria i Budownictwo* 1/12: 338 – 342.
 - [10] Lorenc Halina. 2000. „Studia nad 220-letnią (1772 – 1998) serią pomiarów temp. powietrza w Warszawie”. *Materiały Badawcze IMiGW s. Meteorologia* –31, Warszawa.
 - [11] Gontaszewska Agnieszka. *Zastosowanie wzorów opartych na wskaźniku mrozowym do obliczania głębokości przemarzania gruntu w Polsce*. Instytut Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego.
- https://www.google.com/url?escr=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://www.researchgate.net/publication/315477132_Zastosowanie_wzorow_opartych_na_wskaźniku_mrozowym_do_obliczania_glebokosci_przemarzania_gruntu_w_Polsce&ved=2ahUKEwijuHR3tH1AhVlo4sKHTKY-AAoQFnoECACAg&usg=AOvVaw3hFGM9GVXNPQidm4-4TwGD

Przyjęto do druku: 05.01.2022 r.

**Autorzy za publikację artykułów naukowych
w miesięczniku „Materiały Budowlane” otrzymują**

100 pkt