

Krzysztof KUPIEC, Barbara LARWA, Tadeusz KOMOROWICZ, Krzysztof NEUPAUER

e-mail: kkupiec@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Profile temperatur w gruncie o niejednorodnych właściwościach fizycznych

Wstęp

Typowy grunt składa się z trzech faz: stałej, ciekłej i gazowej. Fazy płynne, które stanowią woda i powietrze wypełniają przestrzenie międzyziarnowe. Grunt jest zatem układem wielofazowym [Al-Khoury, 2012]. Do modelowania transportu ciepła w gruncie dogodnie jest posługiwać się zastępczym współczynnikiem dyfuzyjności cieplnej uwzględniającym zarówno przewodzenie w ciele stałym jak również transport ciepła w płynie wypełniającym pory. Ze względu na zmienność wilgotności gruntu z położeniem przy modelowaniu transportu ciepła w gruncie powinna być uwzględniana zmienność dyfuzyjności cieplnej.

W pracy wyznaczono profile temperatur w gruncie w warunkach naturalnych oraz w przypadku zainstalowanego poziomego gruntowego wymiennika ciepła. Przyjęto, że dyfuzyjność cieplna gruntu jest zmienna z położeniem. Przeanalizowano w jaki sposób zmiany właściwości fizycznych gruntu wpływają na rozkład temperatur w gruncie, od którego zależy działanie gruntowego wymiennika ciepła sprzężonego z pompą ciepła [Rubik, 2011].

Przewodzenie ciepła w materiałach porowatych

Właściwości cieplne gruntów zmieniają się znacznie przy pozornie niewielkich zmianach czynników mających wpływ na proces przenoszenia ciepła. Proces transportu ciepła w gruncie uwarunkowany jest przewodzeniem ciepła w ziarnach minerałów występujących w gruncie, przewodzeniem przez powietrze lub wodę wypełniające pory, ewentualną konwekcją swobodną wewnątrz porów oraz termicznym oporem na styku ziaren. W gruntach wilgotnych znajdujących się w temperaturach niższych od 0°C proces przewodzenia ciepła komplikuje się jeszcze bardziej na skutek przejścia fazowego części wody w lód.

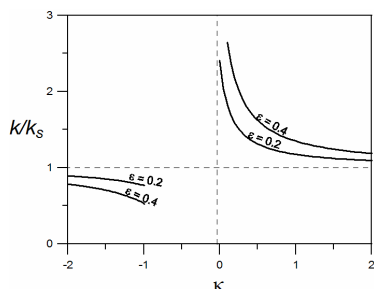
Russell wyprowadził zależność na efektywną przewodność cieplną porowatego materiału jako funkcję właściwości ciała stałego oraz płynu. Zależność jest następująca [Woodside, 1958]:

$$k = k_s \frac{\varepsilon^{2/3} + \kappa}{\varepsilon^{2/3}(1 - \varepsilon^{1/3}) + \kappa} \quad (1)$$

gdzie ε jest porowatością, zaś κ jest określone wzorem:

$$\kappa = k_s / (k_f - k_s) \quad (2)$$

gdzie k , k_s i k_f oznaczają odpowiednio przewodnictwo cieplne materiału porowatego, ciała stałego i płynu.



Rys.1. Interpretacja zależności (1)

Jeżeli płynem wypełniającym pory jest woda, to najczęściej jest $k_f > k_s$, a zatem $\kappa > 0$ co daje ostatecznie $k > k_s$. Jeżeli natomiast $k_f < k_s$, co zawsze obowiązuje gdy płynem jest gaz, to $\kappa < 0$ i $k < k_s$. W pierwszym przypadku im jest większa porowatość (zawartość cieczy), tym jest większy współczynnik przewodzenia k . W przy-

padku gazu wypełniającego pory im większa porowatość, tym współczynnik przewodzenia układu jest mniejszy. Model Russella spełnia następujące warunki: dla $\varepsilon = 1$ jest $k = k_f$ zaś dla $\varepsilon = 0$ jest $k = k_s$. Graficzną interpretację zależności (1) przedstawiono na rys.1.

Zależności obliczeniowe

Grunt potraktowano jako ciało półnieskończone. Założono, że jedynym mechanizmem transportu ciepła w gruncie jest przewodzenie. Równanie przewodzenia ciepła ma postać [Cengel, 2010]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{q_v}{\rho c} \quad (3)$$

gdzie: T – temperatura, t – czas, x – współrzędna położenia (odległość od powierzchni gruntu), $a (=k/(c\rho))$ – dyfuzyjność cieplna, c – ciepło właściwe, ρ – gęstość, q_v – wydajność źródła ciepła. Przy pominięciu oporu przenoszenia ciepła pomiędzy powierzchnią gruntu a otoczeniem warunek brzegowy na powierzchni ma postać:

$$x = 0 \quad T = T_a \quad (4)$$

Temperatura otoczenia T_a jest zmienna, zgodnie z zależnością:

$$T_a = T_b + B \cdot \cos[\omega(t - t_{\max})] \quad (5)$$

gdzie: T_b – temperatura średnia, B – amplituda, t_{\max} – czas, po którym osiągana jest maksymalna temperatura w ciągu roku. Częstotliwość wynosi $\omega = 2\pi/t_c$ przy czym $t_c = 365$ dni. W obliczeniach używano następujących wartości: $T_b = 8,5^\circ\text{C}$, $B = 10,4$ K, $t_{\max} = 198$ dni.

Drugi warunek brzegowy dotyczy gruntu na dużej głębokości gdzie temperatura jest stała:

$$x \rightarrow \infty (h_{\text{inf}}) \quad T = T_b \quad (6)$$

Wyniki obliczeń profili temperatur przedstawiono na rys. 2÷5. We wszystkich przypadkach dyfuzyjność cieplną gruntu opisano funkcją skokową. Na rys. 2 i 4 funkcja $a(x)$ ma postać:

$$a(x) = \begin{cases} 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} & \text{dla } x < 2 \text{ m} \\ 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} & \text{dla } x \geq 2 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

Natomiast na rys.3 i 5 zmienność dyfuzyjności cieplnej z głębokością jest następująca:

$$a(x) = \begin{cases} 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} & \text{dla } x < 1 \text{ m} \\ 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} & \text{dla } x \geq 1 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

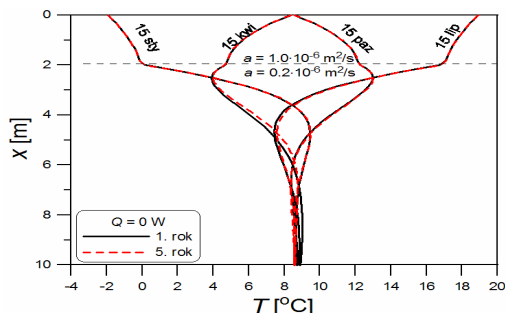
Obliczenia przeprowadzono metodą różnic skończonych.

Profile temperatur w gruncie w warunkach naturalnych

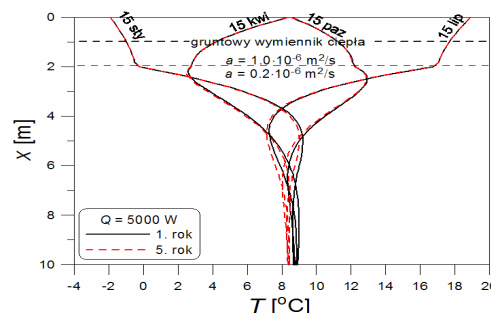
Rys.2 i 3 dotyczą gruntu w warunkach naturalnych tzn. bez zainstalowanego wymiennika ciepła. W tych warunkach $q_v = 0$.

Na pierwszym z tych rysunków dyfuzyjność cieplna w wierzchniej warstwie gruntu (0÷2 m) jest duża co powoduje, że gradienty temperatur są niewielkie, czyli linie profili temperatur są strome. Na głębokościach poniżej 2 m linie profili są mniej pochylone. Natomiast na głębokościach poniżej 6 m temperatura gruntu stabilizuje się czyniąc zadość warunkowi brzegowemu (6).

Na rys. 3 dyfuzyjność cieplna w wierzchniej warstwie gruntu (0-1 m) jest niewielka co powoduje, że gradienty temperatur są duże, a linie profili temperatur mają niewielkie nachylenie. Poniżej tej warstwy obserwuje się większe pochylenie profili, charakterystyczne dla gruntu o dużej dyfuzyjności cieplnej. W głębszych warstwach gruntu jego temperatura stabilizuje się zdążając do wartości $T_b = 8,5^\circ\text{C}$.



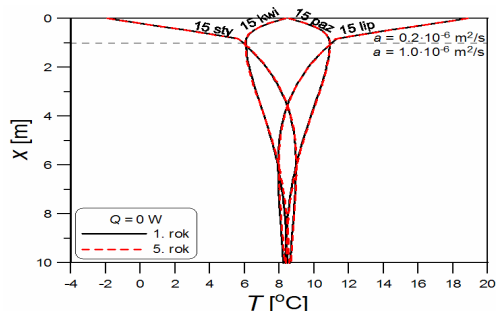
Rys.2. Profile temperatur gruntu w warunkach naturalnych. Większa dyfuzyjność cieplna gruntu w warstwie wierzchniej



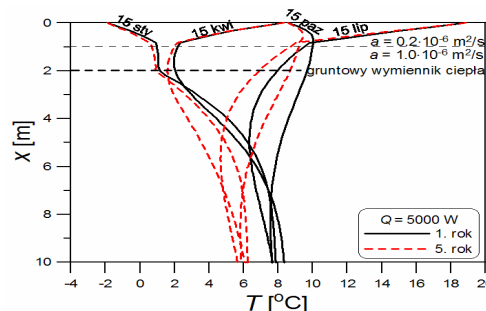
Rys.4. Profile temperatur gruntu z zainstalowanym wymiennikiem. Większa dyfuzyjność cieplna gruntu w warstwie wierzchniej

Stabilizacja ma jednak łagodniejszy przebieg w porównaniu z rys. 2, bowiem im jest większa dyfuzyjność cieplna gruntu, tym większa jest głębokość, przy której temperatura stabilizuje się.

Istotne różnice w przebiegach profili dla pierwszego i piątego roku działania wymienników gruntowych pojawiają się tylko dla przypadku przedstawionego na rys.5.



Rys.3. Profile temperatur gruntu w warunkach naturalnych. Mniejsza dyfuzyjność cieplna gruntu w warstwie wierzchniej



Rys.5. Profile temperatur gruntu z zainstalowanym wymiennikiem. Mniejsza dyfuzyjność cieplna gruntu w warstwie wierzchniej

Profile temperatur w gruncie z zainstalowanym wymiennikiem

Wydajność źródła ciepła q_v w równaniu (3) jest to moc cieplna generowana w jednostkowej objętości ciała V . Wielkość ta jest związana z transportem ciepła pomiędzy cieczą roboczą przepływającą przez gruntowy wymiennik ciepła Q , a gruntem [Kupiec i in., 2015]. Ponieważ źródło (rury wymiennika) są umieszczone w odległości h od powierzchni gruntu, a zatem dla $x = h$:

$$q_v = -Q/V \quad (9)$$

natomiast dla $x \neq h$ jest $q_v = 0$.

Rys. 4 i 5 dotyczą gruntu z zainstalowanym wymiennikiem ciepła. Przyjęto, że wymiennik jest podłączony do pompy ciepła o mocy 5000 W, a jego rury są umieszczone na obszarze 500 m². Wymiennik jest załączony gdy średniodobowa temperatura otoczenia jest niższa od 7.5°C, a temperatura gruntu na poziomie zainstalowania rur wymiennika jest większa od 1°C.

Na rys. 4 przedstawiono profile temperatur gruntu, w którym wymiennik jest zainstalowany na głębokości 1 m przy czym w zakresie głębokości 0÷2 m grunt ma większą dyfuzyjność cieplną. Kształty profili temperatur są podobne jak na rys. 2. Wynika stąd, że ze względu na dobrą dyfuzyjność cieplną i płytkie umiejscowienie wymiennika ciepło jest pobierane głównie z powierzchni gruntu. Warstwa gruntu poniżej 2 m, o niskiej dyfuzyjności cieplnej ma niewielki udział w procesie przenoszenia ciepła.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń dla przypadku gdy wymiennik gruntowy jest umieszczony na głębokości 2 m przy czym poniżej głębokości 1 m grunt ma wyższą dyfuzyjność cieplną. Wierzchnia warstwa gruntu (0÷1 m) o niewielkiej dyfuzyjności cieplnej stanowi utrudnienie dla ruchu ciepła pomiędzy powierzchnią gruntu a wyźębionym gruntem na poziomie rur wymiennika umieszczonych na dość dużej głębokości.

Ciepło jest zatem transportowane z głębszych warstw gruntu co silnie deformuje profile temperatur w tych warstwach. Na głębokości 10 m temperatura gruntu nie jest stabilna jak w poprzednio rozpatrywanych przypadkach.

W obliczeniach numerycznych należało odpowiednio dobrać wielkość głębokości gruntu, dla której jego temperatura jest ustabilizowana (h_{inf}). Konieczne było dobranie wartości $h_{inf} = 50$ m (w pozostałych przypadkach wystarczające było $h_{inf} = 20$ m).

Wnioski

Gdy warstwa gruntu o większej dyfuzyjności cieplnej znajduje się powyżej warstwy o mniejszej dyfuzyjności, górna warstwa nie ma istotnego znaczenia dla rozkładu temperatur w warstwach niższych, ponieważ temperatura w warstwie górnej jest wtedy zbliżona do temperatury powierzchni gruntu.

Gdy warstwa gruntu o większej dyfuzyjności cieplnej znajduje się poniżej warstwy o mniejszej dyfuzyjności, górna warstwa gruntu stanowi bufor oddzielający warstwę dolną od wpływu powierzchni gruntu.

Gdy w gruncie znajduje się wymiennik ciepła, a wierzchnia warstwa gruntu ma niewielką dyfuzyjność cieplną, to profile temperatur w niższych warstwach ulegają znacznym i długotrwałym zmianom czasowym. Po kilku latach działania wymiennika w tych warunkach wychłodzenie gruntu może być znaczne, ponieważ nie jest odpowiednio kompensowane transportem ciepła z otoczenia.

LITERATURA

Al-Khoury R., 2012. *Computational Modeling of Shallow Geothermal Systems*. CRC Press

Cengel Y., Ghajar A., 2010. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, McGrawHill

Kupiec K., Larwa B., Gwadera M., 2015. Heat transfer in horizontal ground heat exchangers. *Appl. Therm. Eng.*, **75C**, 270-276. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.003

Rubik M., 2011. *Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej*, Multico, Warszawa

Woodside W., 1958. Calculation of the thermal conductivity of porous media. *Can. J. Phys.*, **36**, 815-823. DOI: 10.1139/p58-087