

Barbara LARWA, Krzysztof KUPIEC, Monika GWADERA, Krzysztof NEUPAUER

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

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

Gruntowe poziome wymienniki ciepła

Wprowadzenie

Ciepło zawarte w gruncie można wykorzystać stosując cyrkulację cieczy roboczej między wymiennikiem dolnym umieszczonym w gruncie, a wymiennikiem górnym będącym częścią składową pompy ciepła. W warunkach zimowych w dolnym wymienniku ciecz pobiera ciepło od gruntu i przekazuje go wrzucemu czynnikowi termodynamicznemu w pompie ciepła.

Równoległe z przenoszeniem ciepła do cieczy roboczej, grunt pobiera lub przekazuje ciepło z/do otoczenia. Kierunek przenoszenia ciepła pomiędzy gruntem a otoczeniem zależy od relacji pomiędzy temperaturą otoczenia, a temperaturą powierzchni gruntu. W warunkach naturalnych (brak wymiennika zainstalowanego w gruncie), ilość ciepła przyjmowana przez grunt od otoczenia w okresie letnim jest równa ilości ciepła traconej w okresie zimowym. Powoduje to, że średnioroczna temperatura gruntu w danym obszarze nie zmienia się na przestrzeni lat. Gdy w gruncie jest zainstalowany wymiennik, to uśredniona po objętości temperatura wierzchniej warstwy gruntu ulega zmianom w kolejnych latach, ponieważ ilość ciepła pobierana z gruntu do pompy ciepła w okresie zimowym nie jest, na ogół, kompensowana przez ilość ciepła dostarczaną do gruntu.

Poziome gruntowe wymienniki ciepła są obiektem licznych badań. Prowadzono zarówno prace czysto eksperymentalne [Wu i in., 2010; Gonzalez i in., 2012], jak również prace oparte na modelowaniu [Tarnawski i Leong, 1993; Piechowski, 1999; Lee, 2006; Esen i in., 2007; Gan, 2013]. Do symulacji cyfrowych często wykorzystywane są aplikacje obliczeniowej mechaniki płynów CFD [Congedo i in., 2012].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych dotyczących przenoszenia ciepła w gruncie z zainstalowanym gruntowym wymiennikiem ciepła. Szczególną uwagę skupiono na zmianach temperatur gruntu zachodzących długoterminowo w ciągu kilku (lub więcej) lat. Obliczenia przeprowadzono na podstawie rozwiązania równań modelu matematycznego procesu. Przedstawiona analiza dotyczy wymienników gruntowych poziomych.

Zależności obliczeniowe

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (1)$$

gdzie: T – temperatura gruntu, t – czas, a – dyfuzyjność cieplna gruntu, x – odległość od powierzchni gruntu, q_v – wydajność źródła ciepła, W/m^3 .

Warunek brzegowy na powierzchni gruntu ma postać:

$$x = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h_0(T_0 - T_a) \quad (2)$$

gdzie h_0 jest współczynnikiem wnikania ciepła pomiędzy gruntem a otoczeniem, k – współczynnikiem przewodzenia ciepła gruntu, zaś T_0 – temperaturą powierzchni gruntu. Temperatura otoczenia (powietrza atmosferycznego) T_a jest cyklicznie zmienna, zgodnie z zależnością:

$$T_a = T_{am} + B \cos[\omega(t - t_{max})] \quad (3)$$

gdzie częstotliwość wynosi $\omega = 2\pi/t_c$, zaś t_c jest czasem cyklu wynoszącym 365 dni. Wielkość t_{max} oznacza czas od początku roku do osiągnięcia maksymalnej temperatury otoczenia, T_{am} – średnioroczną temperaturę otoczenia, zaś B – połowę różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną temperaturą otoczenia. W niniejszej pracy do obliczeń przyjęto: $T_{am} = 10^\circ\text{C}$, $B = 11 \text{ K}$, $t_{max} = 200$ dni.

Warunek brzegowy dotyczący gruntu na dużej głębokości (gdzie temperatura jest stała) i ma postać:

$$x \rightarrow \infty \quad T = T_m \quad (4)$$

W warunkach naturalnych $q_v = 0$ i rozwiązanie równania (1) z warunkami (2) – (4) prowadzi do następującej zależności dla cyklicznego stanu ustalonego [Carslaw i Jaeger, 1959]:

$$T = T_m + B \frac{Bi}{\sqrt{(Bi+1)^2 + 1}} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \cos\left[\omega(t - t_{max}) - \frac{x}{L} - \tan^{-1} \frac{1}{Bi+1}\right] \quad (5)$$

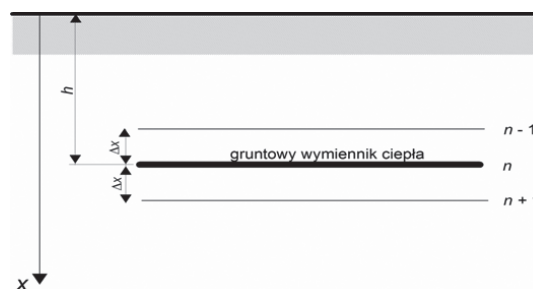
gdzie wielkość L jest określona jako $L = \sqrt{2a/\omega}$, zaś Bi jest liczbą Biota: $Bi = h_0 L/k$.

Ze wzoru (5) można wyznaczyć gradient temperatury gruntu na powierzchni $(\partial T/\partial x)_{x=0}$, a następnie obliczyć gęstość strumienia ciepłego na powierzchni gruntu:

$$F = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} \quad (6)$$

Ilość ciepła transportowana do/od gruntu. Całkowanie gęstości strumienia po czasie prowadzi do określenia ilości ciepła transportowanej do/od gruntu na jednostkę powierzchni [Staniszewski B., 1979].

Na rys. 1 przedstawiono położenie i orientację gruntowego poziomego wymiennika ciepła.



Rys. 1. Położenie i orientacja gruntowego wymiennika ciepła

Gdy w gruncie jest zainstalowany wymiennik, to $q_v \neq 0$ i równanie przewodzenia ciepła (1) z warunkami (2–4) należy rozwiązać numerycznie. Wydajność źródła ciepła q_v jest to strumień ciepła Q generowany w jednostkowej objętości V . Wielkość ta jest związana z transportem ciepła pomiędzy cieczą roboczą przepływającą przez gruntowy wymiennik ciepła a gruntem. Ponieważ źródło jest umieszczone w odległości h od powierzchni gruntu, zatem:

$$q_v = \begin{cases} -\frac{Q}{V} & \text{dla } x = h \\ 0 & \text{dla } x \neq h \end{cases} \quad (7)$$

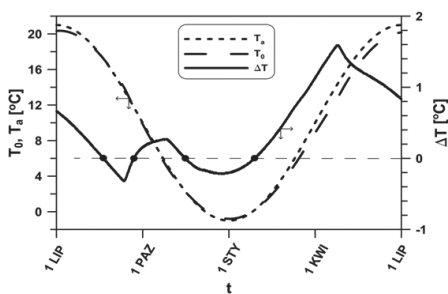
Równania modelu rozwiązano metoda różnic skończonych przy użyciu schematu Cranka-Nicolson. Więcej informacji o modelu przedstawiono w pracy Kupiec i in. [2013].

Wyniki obliczeń

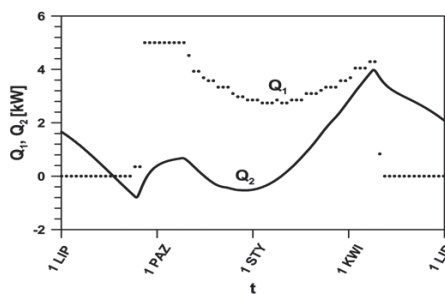
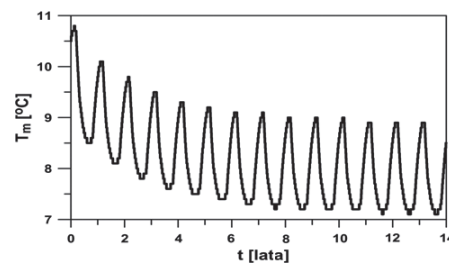
W obliczeniach przyjęto, że wymiennik gruntowy jest włączony wtedy, gdy spełnione są następujące warunki:

$$T_a < 14^\circ\text{C} \quad T_L > 0^\circ\text{C}$$

Przyjęto zatem, że wymiennik jest wykorzystywany tylko do celów grzewczych w okresie zimowym. Gdy średniodobowa temperatura otoczenia przekracza 14°C wymiennik jest wyłączany. Ponadto wymiennik nie pracuje, gdy temperatura płynu roboczego na wlocie z wymiennika T_L spadnie poniżej 0°C . Zatem w sezonie grzewczym wymiennik



Rys. 2. Czasowe przebiegi temperatury powietrza i temperatury powierzchni gruntu

Rys. 3. Czasowe przebiegi strumieni ciepłych Q_1 i Q_2 

Rys. 4. Wieloletni przebieg średniej temperatury wierzchniej warstwy gruntu

pracuje okresowo. Wartości liczbowe parametrów procesu stosowane w obliczeniach przedstawiono w tab. 1.

Na rys. 2 przedstawiono czasowe zależności temperatury otoczenia T_a , temperatury powierzchni gruntu T_0 oraz różnicy między tymi temperaturami. Na uwagę zasługuje wielokrotna zmiana znaku różnicy $T_a - T_0$ w ciągu roku. W warunkach naturalnych znak tej różnicy zmienia się w ciągu roku dwukrotnie. Natomiast przy włączonym wymienniku gruntowym relacje pomiędzy T_a i T_0 są bardziej złożone. Pobieranie ciepła z gruntu powoduje bowiem obniżenie temperatury powierzchni gruntu, co prowadzi do zmian strumienia ciepłego między powietrzem a powierzchnią gruntu. Wychłodzony grunt przejmuje więcej ciepła z otoczenia niż grunt w warunkach naturalnych.

Tab. 1. Parametry procesu stosowane w obliczeniach

Wielkość	Symbol	Wartość liczbową
Moc pompy ciepła	Q	5000 W
Współczynnik przewodzenia ciepła gruntu	k	1,24 W/(m·K)
Ciepło właściwe gruntu	c	1670 J/(kg·K)
Gęstość gruntu	ρ	1800 kg/m ³
Natężenie przepływu cieczy roboczej	\dot{m}_L	1,5 kg/s
Ciepło właściwe cieczy roboczej	c_L	3700 J/(kg·K)
Pole powierzchni gruntu	A	250 m ²
Głębokość zainstalowania wymiennika	h	1 m
Współczynnik wnikania ciepła	h_0	10 W/(m ² ·K)

Na rys. 3 przedstawiono czasową zmienność strumieni ciepłych związanych z pobieraniem i przekazywaniem ciepła do gruntu. Strumień Q_1 dotyczy ciepła odbieranego od gruntu przez ciecz roboczą i był określany ze wzoru:

$$Q_1 = \chi Q \quad (8)$$

gdzie χ jest współczynnikiem określającym udział czasu w jakim wymiennik gruntowy jest załączony w pewnym okresie ($\chi = 0$ dla wymiennika wyłączonego w tym okresie, $\chi = 1$ dla wymiennika pracującego ciągle). Strumień ciepła Q_2 dotyczy przenoszenia ciepła pomiędzy powietrzem a powierzchnią gruntu. Wyznaczono go z zależności:

$$Q_2 = h_0(T_a - T_0)A \quad (9)$$

Z różnicy pomiędzy strumieniami Q_1 i Q_2 wynika średnia temperatura gruntu (akumulacja ciepła). Podobne przebiegi różnicy temperatur na rys. 2 i i strumienia ciepła Q_2 na rys. 3 wynikają z relacji pomiędzy tymi wielkościami (wzór (9)).

Wieloletni przebieg średniej temperatury gruntu przedstawiono na rys. 4. Średnia temperatura gruntu ma znaczenie umowne, bowiem jej wartość zależy od głębokości gruntu jaka jest brana pod uwagę przy obliczaniu tej średniej (h_{inf}). Im większa jest ta głębokość, tym średnia temperatura jest bardziej stabilna w czasie i jej czasowe zmiany są coraz mniej zauważalne. Z drugiej strony, maksymalna rozważana głębokość powinna być większa od wartości, przy których występują jeszcze istotne zmiany temperatury gruntu z głębokością. Przyjęto $h_{inf} = 20$ m. Średnia temperatura gruntu wynosi:

$$T_m = \int_0^{h_{inf}} T dx \quad (10)$$

Na rysunku widać, że średnie temperatury gruntu osiągają po pewnym czasie (ok. 10 lat) cykliczny stan ustalony. Po kilku latach obniżania się temperatury gruntu następuje stabilizacja. W warunkach cyklicznego stanu ustalonego ilość ciepła, jaką w ciągu roku pobiera pompa ciepła, jest całkowicie kompensowana ciepłem przenoszonym od powietrza atmosferycznego.

Wnioski

Zastosowany model matematyczny prawidłowo opisuje proces przenoszenia ciepła w wymiennikach gruntowych. Można go zatem wykorzystać do analizy wpływu różnych parametrów procesu na efektywność urządzenia.

Prawidłowa eksploatacja wymienników gruntowych pozwala na lepsze wykorzystanie energii słonecznej, a tym samym oszczędności w użyciu energii konwencjonalnej.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w typowych warunkach pracy poziomego wymiennika gruntowego cykliczny stan ustalony w gruncie jest osiągnięty po około 10 latach eksploatacji.

LITERATURA

- Carlsaw H.S., Jaeger J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford, 65-74
- Congedo P.M., Colangelo G., Starace G., 2012. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Appl. Thermal Eng.* **33-34**, 24-32. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005
- Esen H., Inalli M., Esen M., 2007. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system. *Building Environ.* **42**, 1126-1134. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.11.027
- Gan G., 2013. Dynamic thermal modelling of horizontal ground-source heat pumps. *Int. J. Low-Carbon Technol.* **8**, 95-105. DOI: 10.1093/ijlct/ctt012
- Gonzalez R.G., Verhoef A., Vidale P.L., Main B., Gan G., Wu Y., 2012. Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump for a domestic site in the UK. *Renewable Energy* **44**, 141-153. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.080
- Kupiec K., Komorowicz T., Larwa B., 2013. Model matematyczny gruntowego wymiennika ciepła. *Inż. Ap. Chem.* **52**, nr 4, 353-354
- Lee E., 2006. *Development, verification, and implementation of a horizontal buried pipe ground heat transfer model in Energyplus*. PhD Thesis, Oklahoma State University. (06.2014): <http://digital.library.okstate.edu/etd/umi-okstate-2622.pdf>
- Piechowski M., 1999. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Theoretical development. *Int. J. Energy Res.* **23**, 571-588. DOI: 10.1002/(SICI)1099-114X(19990610)23:7<3C571::AID-ER462>3E3.3.CO;2-Y
- Staniszewski B., 1979. *Wymiana ciepła – podstawy teoretyczne*. PWN Warszawa, s.101
- Tarnawski V.R., Leong W.H., 1993. Computer analysis, design and simulation of horizontal ground heat exchangers. *Int. J. Energy Res.*, **17**, 467-477. DOI: 10.1002/er.4440170603
- Wu Y., Gan G., Verhoef A., Vidale P.L., Gonzalez R.G., 2010. Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. *Appl. Thermal Eng.*, **30**, 2574-2583. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.07.008