

MODELOWANIE POLA TEMPERATURY W GRUNCIE Z WYKORZYSTANIEM ARKUSZA KALKULACYJNEGO

*Maciej Sporysz, Sławomir Kurpaska, Krzysztof Molenda, Maria Szczuka,
Stanisława Roczkowska-Chmaj
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

Streszczenie. Współczesny świat stoi przed wyzwaniem zaspokojenia z jednej strony stale rosnących potrzeb energetycznych, a z drugiej również rosnących potrzeb żywnościowych. Stale poszukuje się nowych, alternatywnych w stosunku do konwencjonalnych źródeł energii. W ostatnim okresie bardzo popularne stały się pompy ciepła pozyskujące energię z wnętrza Ziemi. By móc efektywnie z nich korzystać niezbędne są programy komputerowe symulujące rozkład temperatury w gruncie. Dzięki nim można precyzyjnie określić rozkład temperatury na dowolnej głębokości, a co za tym idzie w sposób optymalny sterować urządzeniami kontrolującymi pracę pomp ciepła, itp. W niniejszej pracy przedstawiono przykład wykorzystania arkusza kalkulacyjnego MS Office z zaimplementowanym w nim języku Visual Basic for Applications (VBA) do modelowania pola temperatury w gruncie. Jako cel autorzy postawili sobie prezentację i sprawdzenie przydatności tego rozwiązania do modelowania rozkładu temperatury w gruncie podczas pracy pompy ciepła. Na bazie równań różniczkowych opisujących przewodzenie ciepła w gruncie, dokonano dyskretyzacji dwuwymiarowej płyty płaskiej (model siatki różnicowej), a następnie implementacji w języku VBA. W kolejnym etapie wyniki symulacji numerycznej zestawiono z rzeczywistymi pomiarami temperatury. W konkluzji stwierdzono przydatność arkusza kalkulacyjnego w modelowaniu pola temperatury w gruncie. Narzędzie to jest szczególnie przydatne do celów dydaktycznych.

Słowa kluczowe: modelowanie temperatury, pompa ciepła, arkusz kalkulacyjny, siatka.

Wstęp

Stopniowe kończenie się zasobów paliw kopalnych będących obecnie głównym źródłem energii na świecie oraz systematyczny wzrost ich cen skłania do znacznego zwiększenia udziału energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł w zaspokajaniu potrzeb energetycznych krajów rozwiniętych. Bieżącemu wykorzystaniu odnawialnych źródeł ciepła (promieniowanie słoneczne, wiatr, cieki wodne, źródła geotermiczne, biomasa) poświęcone są cyklicznie organizowane międzynarodowe konferencje. Np. podczas World Geothermal Congresses przedstawiono raport dotyczący bieżącego wykorzystania energii geotermalnej

na świecie. Opierając się na danych zgromadzonych przez 72 kraje oszacowano pozyskiwanie energii geotermalnej na poziomie $273,37 \text{ TJ-rok}^{-1}$ – wzrost o 43% w porównaniu z rokiem 1995 (Lund i in., 2005). Jak podali autorzy, aż 7,5% energii odzyskiwanej z wnętrza ziemi wykorzystywane było w rolnictwie do ogrzewania szklarni. W chwili obecnej, największy udział w strukturze nakładów w obiektach szklarniowych stanowią koszty ciepła, stanowiące np. w Polsce nawet 50–80% ogólnych kosztów produkcji (Rutkowski i Borcz, 2005). By móc efektywnie pozyskiwać energię z wnętrza Ziemi niezbędna jest znajomość rozkładu temperatury w gruncie.

W trakcie magazynowania lub odzyskiwania ciepła w gruncie następuje jego przekazywanie z wymienników do gruntu lub odwrotnie. W samym gruncie przepływ energii zachodzi nawet wówczas, gdy ustają oddziaływania zewnętrzne. Po zakłóceniu stanu równowagi termicznej układ dąży do jej ponownego odzyskania. Efektem oddziaływań są zmiany rozkładu temperatury w obrębie akumulatora, a także w jego otoczeniu.

Zasadniczym zagadnieniem w badaniu stosunków cieplnych ośrodka jest umiejętność poznawania i analizowania przyczyn kształtujących wypadkowy efekt cieplny gruntu czyli jego temperaturę. W literaturze rozważa się dwa typy modeli opisujących transport ciepła w gruncie. Pierwszy z nich opiera się na statystycznych związkach pomiędzy temperaturą gruntu a jej właściwościami i elementami meteorologicznymi (Hasfurther i Burman, 1974; Toy i in., 1978; Persaud i Chang, 1983). Drugi typ modeli oparty jest o równanie przepływu ciepła (Wierenga i de Wit, 1970; Walczak i in., 1974). Obliczanie i przewidywanie temperatury w dowolnym punkcie i momencie zazwyczaj sprowadza się do rozwiązania równania przepływu ciepła z określonymi warunkami brzegowymi. Można rozróżnić dwie klasy metod rozwiązywania równania transportu ciepła w gruncie: metody analityczne oraz metody przybliżone, oparte np. o metodę różnic skończonych (Hanks i in., 1971; Staniszewski, 1980; Gdula 1984).

Pomimo dużego rozwoju metod fizyki matematycznej, analityczne rozwiązania nieustalonego przepływu ciepła istnieją tylko dla nielicznych przypadków dotyczących stosunkowo prostych kształtów ciał i nieskomplikowanych warunków brzegowych. Klasyczną metodą analityczną jest metoda rozdzielania zmiennych, polegająca na poszukiwaniu rozwiązania w postaci iloczynu dwóch funkcji, z których jedna jest tylko funkcją czasu, zaś druga zależy wyłącznie od współrzędnych przestrzennych (Wiśniewski S. i Wiśniewski T.S., 2000). Powszechne są metody operatorowe, wykorzystujące przekształcenia Laplace’a, Fouriera, Hankela, Mellina itp. (Ditkin i Prudnikow, 1964, Piskorek, 1997). Jednak znacznie częściej stosuje się metody przybliżone, np.: metodę różnic skończonych, metodę elementu skończonego, czy metodę bilansu energetycznego (Gdula, 1984).

Pole temperatury w gruncie można modelować z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych. Niestety są one stosunkowo drogie. Alternatywą dla komercyjnych aplikacji może być arkusz kalkulacyjny MS Excel z zaimplementowanym językiem VBA, umożliwiającym automatyzację i iteracyjność obliczeń.

Cel, zakres pracy

Celem pracy była prezentacja arkusza kalkulacyjnego jako prostego narzędzia, pozwalającego modelować rozkład temperatury w gruncie podczas pracy pompy ciepła. Zakres pracy obejmował implementację metody różnic skończonych dla równań różniczkowych

typu parabolicznego w języku Visual Basic for Applications. Wyniki numerycznej symulacji zostały zweryfikowane w obiekcie doświadczalnym zlokalizowanym na terenie Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. W skład stanowiska badawczego wchodził: tunel foliowy o powierzchni 54 m², powierzchni osłony 113 m² oraz objętości powietrza 127 m³, pompy ciepła współpracującej z pionowymi lub poziomymi wymiennikami gruntowymi oraz systemu dostarczania ciepła z tradycyjnego systemu ogrzewania oraz z pompy grzewczej.

Metodyka pracy

Znajomość podstawowych procesów fizycznych, ze szczególnym uwzględnieniem transportu ciepła, jest niezbędna do zrozumienia zmian zachodzących w mikroklimacie szklarni oraz w gruncie. Podstawowym problemem jest określenie wpływu strumienia dostarczanej energii na ilościową zmianę temperatury i jej przestrzenny rozkład w analizowanym obiekcie. Stan cieplny dowolnego układu materialnego jest scharakteryzowany przez temperaturę. Jeżeli w układzie występuje różnica temperatury w poszczególnych punktach, to nastąpi ruch ciepła. Układ dąży do wyrównania temperatury, np. na drodze przewodzenia.

Za punkt wyjścia w modelowaniu pola temperatury w gruncie podczas pracy pompy ciepła przyjęto prawo Furiera (1), opisujące zjawisko przewodzenia ciepła

$$\dot{q} = \lambda(\nabla T) \quad (1)$$

gdzie

$\dot{q}$ – gęstość strumienia przewodzonego ciepła (W·m⁻²),

λ – współczynnik przewodzenia ciepła (W·m⁻¹·K⁻¹),

∇ – operator Hamiltona (nabla),

∇T – gradient temperatury (K·m⁻¹).

Przepływ ciepła w izotropowym ciele stałym z wewnętrznymi źródłami ciepła o wydajności $\dot{q}_V$ można rozpatrywać jako zagadnienie jednowymiarowe (Tzaferis i in. 1992), dwuwymiarowe (Bi i in. 2002) lub trójwymiarowe (Gauthier i in. 1997).

W pracy analizowano przypadek dwuwymiarowy:

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}_V(x,y,t)}{\lambda} \right] \quad (2)$$

Uzyskanie rozwiązania szczególnego równań (2) wymaga określenia warunków jednoznaczności (Wiśniewski i Wiśniewski 2000), tzn.:

- warunków geometrycznych, określających kształt i wymiary ciała,
- warunków fizycznych, określających właściwości fizyczne ciała,
- rozkładu wydajności wewnętrznych źródeł ciepła w czasie i przestrzeni,
- warunków początkowych, określających rozkład temperatury w chwili początkowej (w szczególnym przypadku może to być warunek stałej temperatury w każdym punkcie ciała lub warunek periodycznej zmiany temperatury),

- warunków brzegowych, określających warunki wymiany ciepła na powierzchniach zewnętrznych ciała; warunki początkowe i brzegowe nazywane są łącznie warunkami granicznymi.

Warunek początkowy (Cauchy'ego) determinuje stan cieplny ciała (wewnątrz i na brzegu) w chwili początkowej $t=0$, natomiast warunki brzegowe określają stan cieplny brzegu ciała w dowolnej chwili $t \neq 0$.

Warunki brzegowe dla przewodzenia ciepła mogą być określane na różne sposoby. Ze względu na zastosowania praktyczne szczególne znaczenie mają warunki:

- I rodzaju – Dirichleta – podanie temperatury na brzegu w dowolnej chwili t , (Staniszewski 1980),
- II rodzaju – Neumanna – podanie gęstości strumienia ciepła w dowolnej chwili t , (Lascano i van Bavel 1983, Chung i Horton 1987),
- III rodzaju – Fouriera – wykorzystywany przy modelowaniu przejmowania ciepła między płynem i/lub źródłem radiacji a brzegiem ciała (Wiśniewski i Wiśniewski 2000),
- IV rodzaju – występuje na styku ciał o różnych współczynnikach przewodzenia ciepła.

W wyniku rozwiązania równania (2) wraz z zadanymi warunkami jednoznaczności uzyskuje się rozwiązanie szczególne w postaci:

$$T = T(x, t), \quad T = T(x, y, t) \quad \text{lub} \quad T = T(x, y, z, t), \quad (3)$$

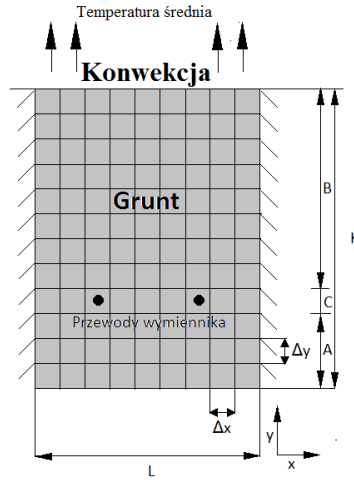
w zależności od przyjętej wymiarowości zagadnienia.

Ponieważ rozwiązania analityczne równania (1) są bardzo trudne do uzyskania oraz nawet niewielka zmiana warunków jednoznaczności powoduje diametralną zmianę postaci rozwiązania, w większości współczesnych metod uzyskuje się przybliżone rozwiązania równania przewodnictwa.

Jedną z takich metod jest metoda różnic skończonych (Gdula, 1986, Staniszewski, 1980). W uproszczeniu polega ona na zastąpieniu różniczek w równaniach wymiany ciepła, różnicami skończonymi, a następnie rozwiązaniu zagadnienia. Mając na względzie uproszczenie procedury obliczeniowej przyjęto, że wydzielona do analizy płaszczyzna jest płytą płaską, w której występuje ustalone przewodzenie ciepła w kierunkach x i y (rys. 1). Płyta została podzielona w kierunku y (o długości K) na trzy strefy: poniżej usadowienia przewodów wymienników ciepła (A), poniżej (B) oraz strefa bezpośredniego umiejscowienia wymienników (C). Wysokość strefy C jest uzależniona od odległości punktów węzłowych (Δy). Długość płyty w kierunku x oznaczono przez L .

Ponadto, przy formułowaniu zależności różnicowych przyjęto następujące założenia upraszczające:

- pominięto wymianę masy w gruncie oraz wymianę ciepła wzdłuż osi rury (tym samym rozpatrywane jest dwuwymiarowe pole temperatury gruntu),
- grunt wymienia ciepło z otoczeniem na drodze konwekcji i radiacji; wymiana ciepła w jego wnętrzu odbywa się jedynie drogą przewodzenia,
- współczynnik przewodzenia ciepła gruntu, materiału rury oraz współczynniki wnikania ciepła podczas analizowanego procesu są stałe,
- w rozpatrywanym obszarze brak jest wewnętrznych źródeł ciepła,
- wpływ opadów atmosferycznych, wilgotności na właściwości gruntu jest pomijalny.



Rysunek 1. Dwuwymiarowy model siatki różnicowej w gruncie – przekrój poprzeczny
Figure 1. Two-dimensional model of differential net – cross section

Na brzegach płaszczyzny zadano warunki:

– dla $0 < y < A + B + C$, $x = 0$ lub $x = L$

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

– dla $0 < x < L$, $y = 0$

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

– dla $0 < x < L$, $y = A + B + C$

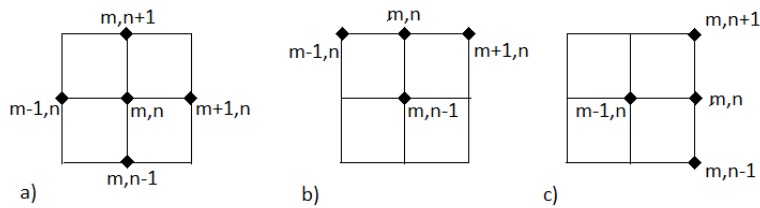
$$-k \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y} = \alpha_{ot} (T(x,y,t) - T_{ot}) \quad (6)$$

gdzie:

α_{ot} – współczynnik wyrównywania temperatury otoczenia ($m \cdot s^{-2}$),

T_{ot} – temperatura otoczenia (K)

Dyskretyzacja płaszczyzny symbolicznie została przedstawiona na rysunku 2.



Rysunek 2. Siatka różnicowa dla węzłów: a) wewnętrznych, b) na powierzchni gruntu, c) na brzegu płaszczyzny

Figure 2. Differential net for nodes: a) inside, b) on the ground surface, c) on the surface edge

Zastępując pochodne w równaniu (2) odpowiednimi ilorazami różnicowymi, otrzymujemy dla węzłów wewnętrznych formułę:

$$\frac{T_{m+1,n}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m-1,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p}{(\Delta y)^2} = \frac{1}{\alpha_{gr}} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (7)$$

Analogicznie postępujemy dla węzłów brzegowych.

W węzłach, w których umiejscowione są wymienniki ciepła strumień ciepła przekazywany od gruntu do wymiennika można zapisać w postaci:

$$q = m_{wym} \cdot c_{wym} \cdot (T_{zas} - T_{pow}) \quad (8)$$

gdzie:

m_{wym} , c_{wym} – odpowiednio strumień i ciepło właściwe czynnika obiegowego ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

T_{zas} , T_{pow} – odpowiednio temperatura zasilania i powrotu czynnika obiegowego w wymienniku (K).

Ponieważ powierzchnia przekroju przewodu wymiennika przez który odbywa się przewodzenie ciepła nie jest stała oraz temperatura gruntu jest wyższa od temperatury czynnika, równanie przewodzenia ciepła przyjmuje postać:

$$q = \lambda_{wym} \cdot 2\pi \cdot l \cdot r_z \cdot \frac{dt}{dr} \quad (9)$$

Po przyjęciu do analizy w miejsce promienia średnicę przewodu, zakładając, że temperatura ścianki przewodu jest równa temperaturze czynnika obiegowego oraz łącząc równania (11) i (12) ostatecznie otrzymujemy:

$$T_{m,n} = \frac{\frac{\lambda}{s} \pi \cdot l \cdot d_m \cdot t_{zas} - m_{wym} \cdot c_{wym} \cdot (t_{zas} - t_{pow})}{\frac{\lambda}{s} \pi \cdot l \cdot d_m} \quad (10)$$

Parametr d_m jest wyliczany z zależności:

$$d_m = \frac{d_z - d_w}{\ln \frac{d_z}{d_w}} \quad (11)$$

gdzie:

λ_{wym} – współczynnik przewodzenia ciepła przewodu wymiennika ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

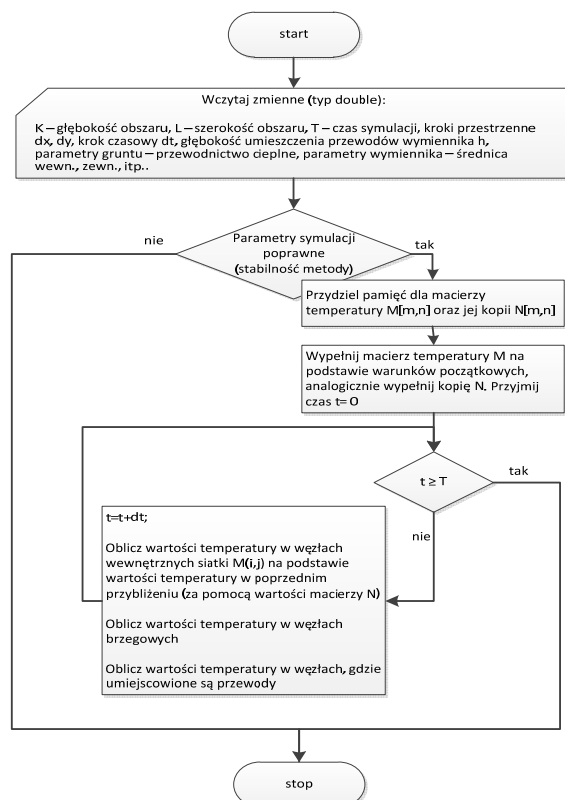
s – grubość ścianki przewodu (m),

d_z , d_w , l – odpowiednio zewnętrzna, wewnętrzna średnica oraz długość (l) wymiennika (m).

Symulacja numeryczna

Schemat symulacji numerycznej został pokazany na rys. 3.

Jako środowisko wybrano zaimplementowany w aplikacjach pakietu MS Office język programowania Visual Basic for Applications (VBA). Wprowadzenie parametrów wejściowych odbywa się poprzez formatkę przedstawioną na rys. 4. Określamy tutaj wymiary płyty płaskiej (x , y (m)), współrzędne umieszczenia przewodów zasilania i powrotu czynnika roboczego wymiennika ciepła (m), liczbę węzłów oraz liczbę kroków symulacji.



Rysunek 3. Schemat symulacji komputerowej
Figure 3. Schematic representation of computer simulation

UserForm1

Oblicz

x	y	n
10	5	101 1000

Przewody grzewcze

4	2	Współrzedn ezasilania powrotu
6	2	

Szerokość Głębokość

Rysunek 4. Parametry wejściowe symulacji – okno dialogowe
Figure 4. Input parameters of simulation – dialogue window

Kolejne kroki obliczeń realizowane są z wykorzystaniem funkcji przedstawionych na rys. 5.

```
Public Function TemperaturaOBLPocz(A, B, C, D, dt, dx, dy, lambda, ro, cp, Tot, alfa)
TemperaturaOBLPocz = C + dt / (ro * cp) * (lambda * (A - C) / (dx) ^ 2 + 2 * lambda *
End Function

Public Function TemperaturaOBL(A, B, C, D, E, dt, dx, dy, lambda, ro, cp)
TemperaturaOBL = C + lambda * dt / (ro * cp) * ((A - E) / (dy) ^ 2 + (B - D) / (dx) ^ 2)
End Function

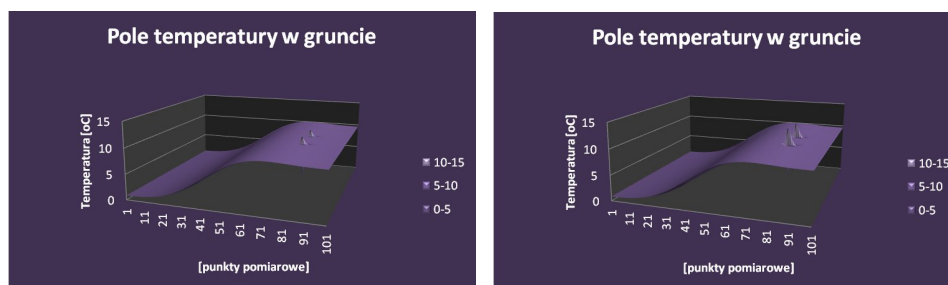
Public Function TemperaturaOBLNaroznik(A, B, C, dt, dx, dy, lambda, ro, cp, Tot, alfa)
TemperaturaOBLNaroznik = C + 2 * dt / (ro * cp) * (lambda * (A - B) / (dx) ^ 2 + lambda *
End Function

Public Function Przewod(t_zas, t_pow, m, c_dz, lambda, l)
dz = 40
dw = 34
s = dz - dw
dm = (dz - dw) / Log(dz / dw)
Przewod = t_zas - m * c_dz * (t_zas - t_pow) * s / (lambda * 3.1415 * l * dm)
End Function
```

Rysunek 5 Funkcje używane w kolejnych iteracjach

Figure 5. Functions used in the next iterations

Wyniki badań



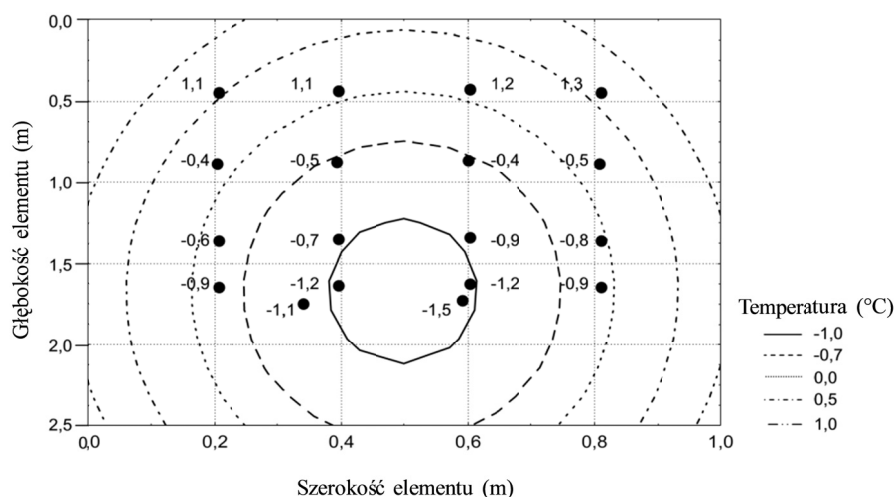
Rysunek 6. Wizualizacja wyników symulacji

Figure 6. Visualisation of simulation results

Na rys. 6 ukazano graficzną wizualizacji rozkładu temperatury w gruncie. Ponieważ badania prowadzone były w okresie zimowym, można zauważyć, że temperatura gruntu na powierzchni oscylowała wokół 0°C i wraz ze wzrostem głębokości ulega stopniowemu podwyższeniu, osiągając na głębokości około 7-8 m stabilizację na poziomie 10°C. Podczas pracy pompy ciepła temperatura w otoczeniu wymiennika ciepła ulega obniżeniu.

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe zmierzone i obliczone wartości temperatury w gruncie dla różnej głębokości i szerokości elementu instalacji, w której umieszczono poziomy wymiennik ciepła. Izolinie (teoretyczne rozwiązanie) są narysowane

z wykorzystaniem programu Statistica. Dane te uzyskane zostały dla końca cyklu pracy pompy ciepła.



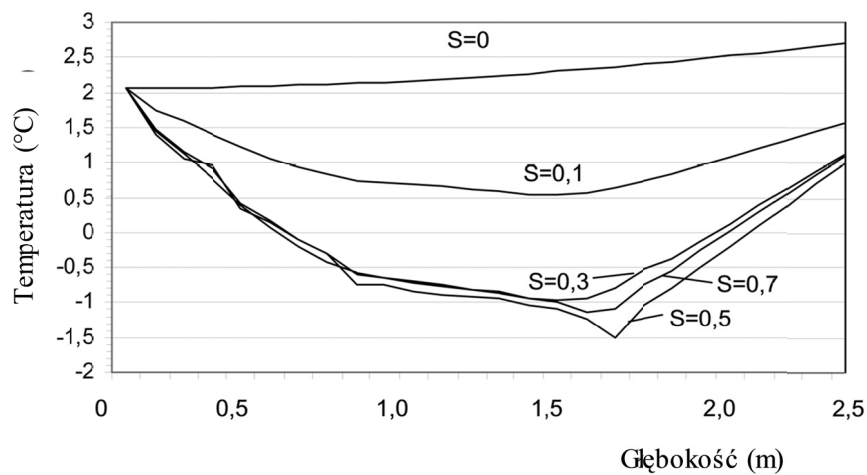
Rysunek 7. Zmierzona i obliczona wartość temperatury w gruncie
Figure 7. Measured and calculated temperature value in the ground

Istniejące różnice między obliczonym rozwiązaniem i wartościami zmierzonymi mogą wynikać z przyjętych uproszczeń metody, błędów interpolacji siatki różnicowej, niejednorodności i porowatości gruntu, zróżnicowanej wilgotności gruntu a co za tym idzie zróżnicowanej wartości współczynnika dyfuzji ciepła (arbitralnie przyjętym na poziomie $1,36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

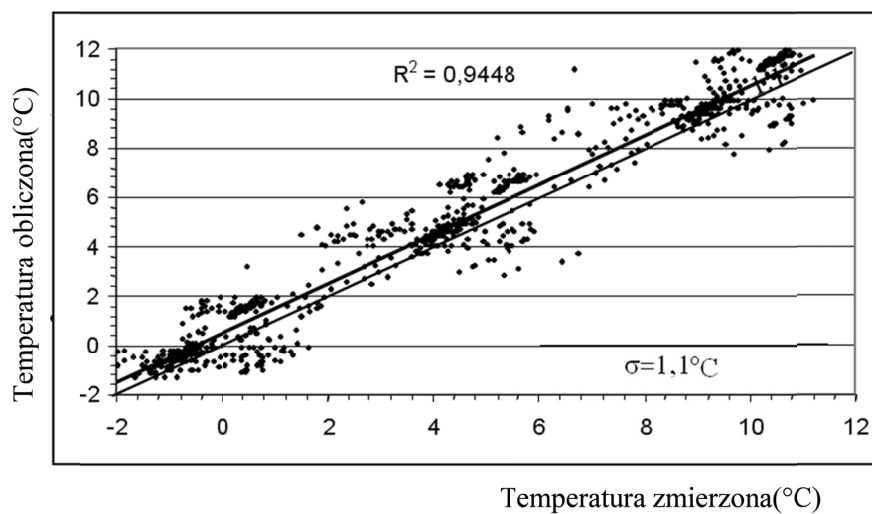
Rozkład temperatury w gruncie na zróżnicowanej głębokości dla różnej odległości od powierzchni adiabatycznej $x=0$ (rys. 1) przedstawiono na rys. 8. Jak widać, na głębokości umieszczenia przewodu gruntowego wymiennika ciepła (ok. 1,7 m) odnotowano najniższe spośród zmierzonych temperatur w gruncie.

Globalne porównanie między wartościami zmierzonymi i obliczonymi wartościami temperatury w gruncie dla kilkudziesięciu cykli pracy pompy ciepła (uzyskanych dla końca cyklu pracy pompy ciepła) przedstawiono na rys. 9. Można zauważyć, że obliczona temperatura cechuje się wyższymi wartościami w stosunku do wartości zmierzonych.

Rozbieżne wyniki między obliczoną i zmierzoną temperaturą w gruncie są konsekwencją błędów powstałych w wyniku stosowania metody numerycznej, a także założenia stałej wartości temperatury czynnika obiegowego podczas cyklu. Powstałe różnice wynikają również z przyjęcia początkowego rozkładu temperatury w glebie jako wynik przewodzenia od warstwy powierzchniowej, braku precyzyjnego oszacowania właściwości cieplnych gruntu, a także oddziaływaniem poprzednich wartości temperatury (uzyskanych z poprzedniego cyklu pracy pompy ciepła) oraz niedokładności mierników temperatury gruntu.



Rysunek 8. Temperatura w głąb profilu gruntu w zależności od przyjętej odległości
Figure 8. Temperature in depth of the ground profile depending on the accepted distance



Rysunek 9. Porównanie między zmierzoną i obliczona temperaturą w gruncie na końcu cyklu pracy pompy ciepła
Figure 9. Comparison between measured and calculated temperature in the ground at the end of the work cycle of the heat pump

Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania arkusza kalkulacyjnego MS Excel z wbudowanym językiem Visual Basic for Applications w modelowaniu pola temperatury w gruncie, gdzie umieszczone zostały wymienniki pompy ciepła będące elementem instalacji grzewczej tunelu foliowego. Wykorzystanie tego typu narzędzia (przy implementacji np. metod różnicowych do numerycznego rozwiązania zagadnień transportu ciepła w gruncie) pozwala na określenie temperatury w ośrodku i wizualizację jego pola w dowolnym punkcie przestrzennym i chwili czasowej. Szczególną uwagę należy przy tym zwrócić na zastosowane uproszczenia, które mogą niekiedy prowadzić do rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji a rzeczywistymi pomiarami. W stosunku do komercyjnych aplikacji rozwiązanie to może stanowić znakomitą alternatywę ze względu na koszt zakupu licencji oraz walory dydaktyczne i poznawcze.

Bibliografia

- Bi, Y.; Chen, L.; Wu, Ch. (2002). *Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification*. Applied Thermal Engineering, 22(2), 183-189.
- Chung, S.O.; Horton, R. (1987). *Soil Heat and Water Flow with a Partial Surface Mulch*. Water Resour. Res. 23:2175–2186.
- Ditkin, W.; Prudnikow, A. (1964). *Przekształcenia całkowite i rachunek operatorowy*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Gauthier, C.; Lacroix, M.; Bernier, H. (1997). *Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses*. Solar Energy, 60(6), 333-346.
- Gdula, J. (1984). *Przewodzenie ciepła*. Warszawa, PWN.
- Hanks, R.; Austin, D.; Ondrechen, W. (1971). *Soil temperature estimation by a numerical method*. Soil Sci. Soc. Am. J., 35 (5), 665-667.
- Hasfurther, V.; Burman, R. (1974). *Soil temperature modeling using air temperature as a driving mechanis*. Transaction of the ASAE, 17 (1), 78-81.
- Lascano, R.J.; van Bave, I. C.H.M. (1983). *Experimental verification of a model to predict soil moisture and temperature profiles*. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 441–448.
- Lund, J.; Freeston, D.; Boyd, T., (2005). *Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review*. Geothermics, 34(6), 691-727.
- Persaud, N.; Chang, A. (1983). *Estimating soil temperature by linear filtering of measured air temperature*. Soil Sci. Am. J., 47, 841–847.
- Piskorek, A. (1997). *Równania całkowite. Elementy teorii i zastosowania*. Warszawa, WNT.
- Rutkowski, K.; Borcz, J. (2005). *Podstawy teoretyczne oceny przydatności produkcyjnej obiektów szklarniowych*. Inżynieria Rolnicza. Nr 10 (70). s. 321-327.
- Staniszewski, B. (1980). *Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne*. Warszawa, PWN
- Toy, T.; Kuhaida, A. Jr.; Munson B. (1978). *The prediction of mean monthly soil temperature from mean monthly air temperature*. Soil Sci. Soc., 126, 96–104.
- Tzaferis, A.; Liparakis, D.; Santamouris, M.; Argiriou, A. (1992). *Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers*. Energy and Buildings, 18(1), 35-43.
- Walczak, R.; Reszetin, O.; Czachor, H. (1974). *Transport of water and heat in soil*. Polish Journal of Soil Sci., VII, 1, 134.
- Wierenga, P.; de Wit, C. (1970). *Simulation of heat transfer in soils*. Soil Sci. Soc Am.Proc., 34, 845–848.
- Wiśniewski, S.; Wiśniewski, T. S. (2000). *Wymiana ciepła*. Warszawa, WNT.

MODELLING OF TEMPERATURE FIELD IN THE GROUND WITH THE USE OF SPREADSHEET

Abstract. Modern world faces the challenge of satisfying constantly growing energy demand on one hand and increasing food demands on the other. New ways, alternative to conventional energy sources have been searched for. Heat pumps obtaining energy from the interior of the Earth have become very popular recently. In order to use them effectively, software that simulates temperature distribution in the ground are indispensable. Thanks to them, temperature state on any depth may be precisely determined and consequently controlling devices of heat pumps operation may be controlled optimally, etc. The paper herein presents an example of using the spreadsheet of MS Office with implemented language Visual Basic Application (VBA) for modelling temperature field in the ground. The authors' objective is to present and verify the usability of this solution for modelling the temperature distribution in the ground during the operation of a heat pump. On the basis of differential equation describing heat conduct in the ground, discretization of two-dimensional flat panel (differential net model) was carried out and then implementation in VBA language. Results of numerical simulation were set with real temperature measurements in the next stage. As a conclusion, it was found that spreadsheet is useful in modelling temperature field in the ground. This device is especially useful for teaching purposes.

Key words: modelling temperature field, heat pump, spreadsheet, differential net, simulation, Visual Basic for Applications

Adres do korespondencji:

Maciej Sporysz; e-mail: Maciej.Sporysz@ur.krakow.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków



Dofinansowanie ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Opolu