

METODYCZNE ASPEKTY ANALIZY ZAGADNIENÍ ENERGETYCZNYCH POMPY CIEPŁA WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z WYMIENNIKAMI PIONOWYMI

Sławomir Kurpaska

Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie: W pracy przedstawiono zmiany efektywności pracy pompy ciepła współpracującej z wymiennikami pionowymi. Na bazie rozważań teoretycznych, wyodrębniono czynniki wpływające na efektywność pompy oraz znaleziono model regresji wielokrotnej opisującej zmiany efektywności w funkcji zmiennych decyzyjnych. Rozważania te, zweryfikowane zostaną podczas badań laboratoryjnych na stanowisku zbudowanym ze sprężarkowej pompy ciepła oraz pionowych wymienników gruntowych o głębokości 100 m.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, efektywność, pionowe wymienniki gruntowe

Wstęp

Ograniczoność paliw kopalnych, troska o ochronę środowiska przyrodniczego narzucają konieczność poszukiwania alternatywnych, w stosunku do tradycyjnych, nośników energii. Jednym z nich jest pompa ciepła (pompa grzewcza), która kosztem dostarczenia energii z zewnątrz przenosi ciepło z ośrodka (woda, powietrze, grunt) do odbiornika ciepła. Istnieje wiele przesłanek potwierdzających atrakcyjność stosowania pomp ciepła, do których można m.in. zaliczyć [Brodowicz, Dyakowski 1990]: uniwersalność urządzenia (możliwość wytwarzania ciepła i obniżania temperatury), poprawę wskaźników energetycznych urządzeń zarówno grzewczych jak i klimatyzacyjnych, brak zanieczyszczeń środowiska (instalowanie np. w uzdrowiskach) oraz wszędzie tam gdzie istnieje konieczność przekazywania ciepła na znaczne odległości. Stąd, olbrzymie zainteresowanie w licznych ośrodkach naukowych problematyką wykorzystania pomp ciepła. I tak m.in. Xu i in. [2006], analizowali efekty energetyczne pompy ciepła w której jako dolne źródło ciepła wykorzystano powietrze atmosferyczne podgrzewane w płaskich kolektorach cieczowych. Energia z górnego źródła wykorzystywana była do podgrzewania wody technologicznej. Huang i Lee [2004] na podstawie wieloletnich badań określili zużycie energii elektrycznej wykorzystywanej do napędu pompy ciepła. Wyliczenia zostały przeprowadzone w odniesieniu do jednostkowego przyrostu temperatury cieczy zgromadzonej w zbiorniku buforowym pompy ciepła. Kaygusuz i Ayhan [1999] opisali i analizowali system współpracy pompy ciepła (jako dolne źródło wykorzystane zostało powietrze atmosferyczne) z gór-

nym, w którym energia magazynowana była a akumulatorze wypełnionym ciałem podlegającym przemianom fazowej. Określili współczynnik efektywności pracy (COP) systemu. Nagano i in. [2006] opracowali nowatorski system do wizualizacji i analizy efektywności pracy pompy ciepła w której jako dolne źródło wykorzystano wymiennik gruntowy. Pompa ciepła wykorzystywana była na cele grzewcze prototypowej szklarni. W końcowej analizie przedstawili syntetyczne wskaźniki pracy pompy ciepła (efektywność pracy, wskaźniki ekonomiczne), zaś efekty energetyczne przeliczyli na ograniczenie emisji substancji emitowanych ze spalania paliw konwencjonalnych. Yumruta i Unsal [2000] opracowali model matematyczny do analizy współpracy pompy ciepła w której dolne źródło ciepła wykorzystano wodę zgromadzoną w akumulatorze cieczowym umieszczonym w glebie. Przedstawiono wyniki symulacji zmienności temperatury wody jako funkcję zmiennej temperatury otaczającej gleby oraz sumarycznych strat ciepła z analizowanego akumulatora. Również w kraju, wszechstronne badania prowadzone w Uniwersytecie Rolniczym w Krakowie pozwoliły sformułować wnioski na temat przydatności dolnych źródeł ciepła (pionowe i poziome wymienniki gruntowe, system hybrydowy), sposobu odbioru ciepła w obiekcie ogrodnictwa oraz efektywność pracy pompy ciepła [Kurpaska 2007; 2008a; 2008b]. Istotnym problemem zauważalnym w uzyskanych wynikach badań jest fakt kilkukrotnie niższej wartości współczynnika efektywności w stosunku do deklarowanej wartości uzyskanych w warunkach badań stanowiskowych. Stąd, w wyniku pozyskania środków finansowych w wyniku realizacji kolejnego projektu badawczego (na lata 2009 do 2012) na istniejącym stanowisku zainstalowano dwa wymienniki (typu U oraz 2xU) na głębokości 100 m każdy. Stąd celem pracy jest przeprowadzenie analizy teoretycznej nad efektywnością pracy pompy ciepła współpracującej w wykonanych sondami gruntowymi.

Material i metoda

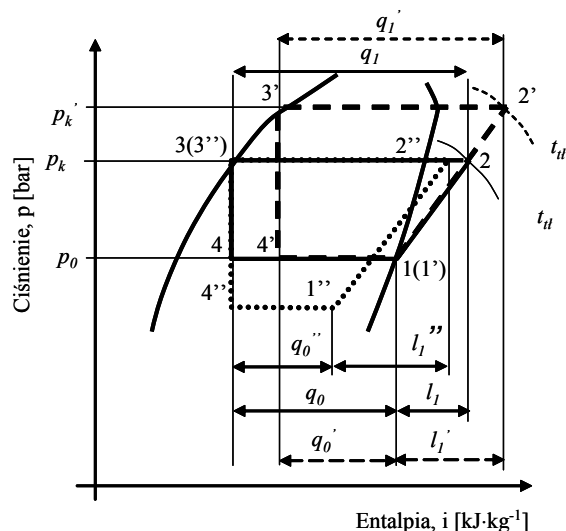
Wychodząc z istoty pracy pompy ciepła, współczynnik efektywności (Coefficient of Performance) można zdefiniować jako:

$$COP = \frac{Q_{u\dot{z}}}{N_{el}} \quad (1)$$

gdzie:

- $Q_{u\dot{z}}$ – strumień mocy użytecznej przenoszony przez pompę [W],
- N_{el} – moc elektryczna urządzeń wchodzących w skład pompy [W].

Możliwość zmiany wartości tego współczynnika wynika wprost z obiegu czynnika termodynamicznego znajdującego się w sprężarkowej pompie ciepła. Jako, jeden z najlepiej oddający istotę jego termodynamicznych przemian, do opisu stosuje się najczęściej obieg Lindego [Brodowicz, Dykowski 1990]. Na rys. 1 przedstawiono wpływ podwyższonego ciśnienia skraplania (oznaczenia ‘) oraz zwiększonego ciśnienia parowania (oznaczenia’’).



Rys. 1. Przemiany termodynamiczne realizowane w teoretycznym obiegu Lindego przy zmianie ciśnienia sprężania i parowania czynnika obiegowego

Fig. 1. Thermodynamic transformations carried out in the theoretical Linde cycle during the change of pressure of compression and evaporation of the heat transfer fluid

Przedstawiony wykres w sposób jednoznaczny opisuje poszczególne stany, przemiany fizyczne i termodynamiczne czynnika obiegowego w pompie ciepła.

Z analizy tego wykresu można odczytać stan termodynamiczny czynnika obiegowego w charakterystycznych punktach obiegu oraz podstawowe wielkości energetyczne: entalpia właściwa czynnika na wejściu do parownika (i_4) i ssaniu sprężarki (i_1), wejściu (i_2) i wyjściu ze skraplacza (i_3), jednostkową wydajność chłodniczą (q) oraz jednostkową teoretyczną pracę sprężania (l). Stąd, współczynnik COP można również zdefiniować jako:

$$COP = \frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_1} = \frac{q_k}{l_t} \quad (2)$$

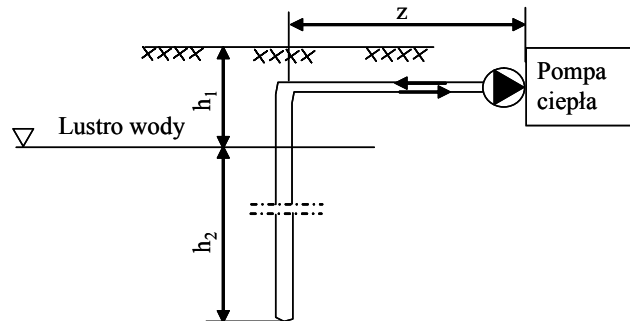
Z analizy przedstawionych zależności wynika jednoznacznie, że wpływ na wartość współczynnika COP wywiera zwiększone ciśnienie skraplania, stąd w efekcie końcowym występuje: wzrost jednostkowej teoretycznej pracy sprężania (czyli większa moc do napędu sprężarki), spadek wartości jednostkowej wydajności chłodniczej i jednostkowej wydajności skraplacza ostateczności wartość współczynnika COP maleje. Z kolei, wzrost ciśnienia parowania wywołuje spadek jednostkowej teoretycznej pracy sprężania (mniejsza moc do napędu sprężarki), wzrost wartości jednostkowej wydajności chłodniczej, jednostkowej wydajności skraplacza a w efekcie końcowym współczynnik COP wzrasta.

Stąd użyteczny wniosek dla systemu wykorzystującego pompę ciepła można zdefiniować jako: Pompa ciepła, czyli urządzenie chłodnicze realizujące lewobieźny obieg termodynamiczny, osiąga najwyższą sprawność wówczas, gdy przenosi energię ze źródła ciepła o stosunkowo wysokiej temperaturze do źródła ciepła o stosunkowo niskiej temperaturze.

Takie zalecenie można zrealizować dobierając odpowiednio dolne źródło ciepła (o stosunkowo wysokiej temperaturze oraz dobrej koherencji z wymaganiem cieplnym ogrzewanego obiektu) oraz stosując system grzewczy w ogrzewanym obiekcie o zwiększonej powierzchni.

Z kolei, zmniejszenie zużycia energii elektrycznej (niezbędnej do napędu sprężarki pompy ciepła oraz pompy obiegowej) można zapewnić poprzez skrócenie czasu pracy pompy ciepła, a zatem zwiększenie jednostkowej wydajności cieplnej sond gruntowych.

Stąd, przedmiotem analizy jest analiza jednostkowej wydajności cieplnej (liniowej gęstości strumienia ciepła) pionowej sondy gruntowej o głębokości 100 m. Rozważane zagadnienie, wraz z przyjętymi do analizy oznaczeniami, zilustrowano graficznie na rys. 2.



Rys. 2. Schemat hydrauliczny analizowanej pionowej sondy gruntowej

Fig. 2. Hydraulic diagram of the vertical ground probe under analysis

Jednostkową wydajność cieplną sondy można określić z zależności w postaci:

$$q_l = \frac{q_o}{L} = \frac{\Delta T}{R_p + R_g} \quad (3)$$

gdzie:

- q_o – strumień cieplny pobierany z gruntu [W],
- L – całkowita długość sond [m],
- R_p – jednostkowy opór wnikania i przewodzenia ciepła w przewodzie sondy [$m \cdot K \cdot W^{-1}$],
- R_g – jednostkowy obliczeniowy opór cieplny gruntu [$m \cdot K \cdot W^{-1}$],
- ΔT – różnica temperatury między temperaturą gruntu (w znacznej odległości od złoża) i średnią temperaturą czynnika z kolektora [K].

Znalezienie wartości temperatura gruntu (na dowolnej głębokości - h oraz czasu - τ) wynika wprost z rozwiązania różniczkowego równania opisującego proces przewodzenia ciepła wraz z złożoną periodyczną zmianą temperatury wierzchniej warstwy gruntu.

Zależność ta przyjmuje postać:

$$T_{h\tau} = \bar{T} + \Delta T_{hp} + \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right) \cdot \cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}} \cdot h\right) \quad (4)$$

gdzie:

- $\bar{T}$ – średnia temperatura gruntu [$^{\circ}\text{C}$],
- ΔT_{hp} – amplituda zmian temperatury powierzchni gruntu [K],
- $\omega (\omega=2 \cdot \pi/\tau)$ – okres zmian [s^{-1}],
- a – dyfuzyjność cieplna gruntu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
- h – głębokość [m],
- τ – czas [s].

Wartość q_l obliczono oddzielnie dla trzech przypadków, a mianowicie (rys. 2): dla odcinka poziomego (o długości z), odcinka pionowego w zależności od występowania wód gruntowych o długości h_1 lub h_2 wykorzystując zweryfikowaną metodykę oraz standardowe zależności [Kurpaska 2006, Zalewski 2001]. W końcowych wyliczeniach wartość q_l obliczono jako średnią ważoną z poszczególnych konfiguracji geometrycznej sond gruntowych.

Wyniki i dyskusja

Obliczenia przeprowadzono dla rzeczywistych warunków panujących w miejscu wykonania sond. Na podstawie danych zawartych w projekcie geologicznym odwiertów założono, że poziom wód gruntowych w skali roku mieści się w granicach od 6 do 8 m, zaś grunt składa się z warstw piasków pylastych i gliniastych. Dla tych utworów odczytano wymagane wartości właściwości termofizycznych i fizycznych gruntu. W warstwie wodonośnej przyjęto, że średnią wartość współczynnika filtracji równą $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W szczegółowej analizie uwzględniono podany zakres zmian wartości tego współczynnika.

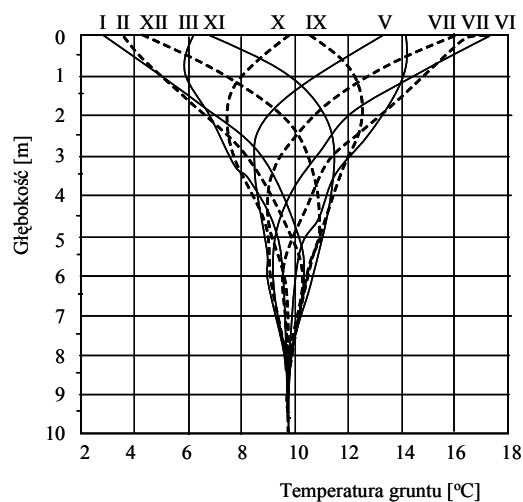
Na rys. 3 przedstawiono wyliczoną wartość temperatury gruntu dla całego okresu użytkowania rozważanej pompy ciepła. Można zauważyć, że niezależnie rozważanego miesiąca, na głębokości ok. 9 m występuje stała temperatura gruntu osiągając wartość ok. 10°C . Średnia wartość temperatury w rozpatrywanej warstwie mieści się w granicach od 8 do blisko $11,5^{\circ}\text{C}$.

Na rys. 4. przedstawiono oszacowaną jednostkową wydajność cieplną analizowanej sondy glebowej. Jak widać, dla przyjętych danych, jej średnia wartość wynosi blisko $41 \text{ W} \cdot \text{m}_b^{-1}$. Zauważalne różnice wynikają ze zróżnicowanej temperatury gruntu, jednak zauważono niewielki (ok. 1,5%) współczynnik zmienności wydajności cieplnej.

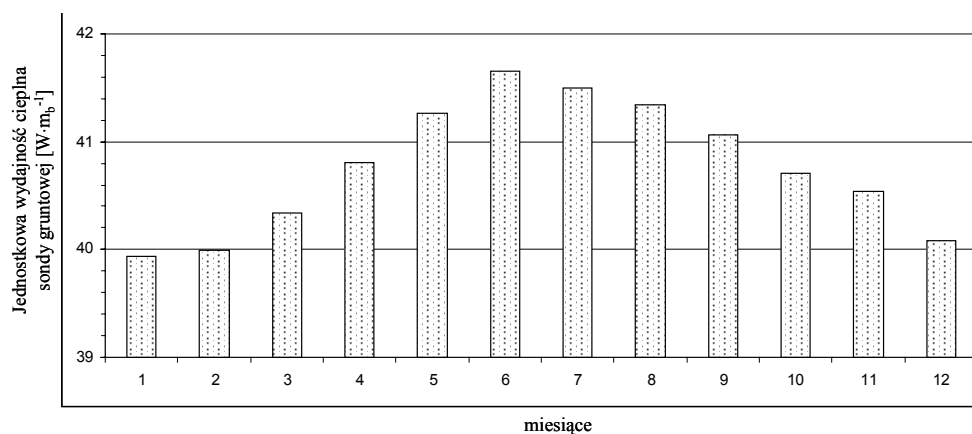
Przeprowadzona szczegółowa analiza teoretyczna wykazała, że na zmianę wydajności cieplnej znaczny wpływ wywiera współczynnik filtracji, bowiem zakres zmian średniej wartości wydajności (dla skrajnych wartości współczynnika) zawiera się w przedziale od 38,1 do $42,1 \text{ W} \cdot \text{m}_b^{-1}$. Analiza statystyczna wykazała, że zmiany te (na poziomie istotności $\alpha=0,05$) są statystycznie istotne.

Należy mieć jednak świadomość, że dokładne wyniki wydajności grzewczej można określić stosując metodę badań eksperymentalnych. Zgromadzona dotychczasowa aparatu-

ra, wypracowane metody badawcze pozwolą na zweryfikowanie uzyskanych wyników badań.



Rys. 3. Temperatura gruntu w funkcji jego głębokości dla poszczególnych miesięcy
Fig. 3. Temperature of the ground in the function of its depth for particular months



Rys. 4. Oszacowana jednostkowa wydajność cieplna sondy gruntowej dla poszczególnych miesięcy
Fig. 4. Estimated unit heat output of the ground probe for particular months

Wnioski

1. Średnia wartość temperatury w rozpatrywanej warstwie gruntu mieści się w granicach od 8 do blisko 11,5°C.
2. Wyliczona wydajność cieplna sond gruntowych, w zależności od przyjętej wartości współczynnika filtracji w warstwie wodonośnej zawiera się od 38,1 do 42,1 W·m_b⁻¹. Współczynnik filtracji wywiera istotny wpływ na zmianę wydajności cieplnej rozpatrywanych sond.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego: Nr N N313 445137.

Bibliografia

- Brodowicz K., Dyakowski T.** 1990. Pompy ciepła. PWN Warszawa. ISBN- 83- 01- 09781-7.
- Huang B.J., Lee C.P.** 2004. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater. *Renewable Energy*. 29(4). s. 633-639.
- Kaygusuz K., Ayhan T.** 1999. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. *Energy Conversion and Management*. 40(13). s. 1377-1396.
- Kurpaska S., Latała H., Rutkowski K.** 2006. Analiza wydajności cieplnej gruntowego wymiennika ciepła w instalacji wykorzystującej pompę ciepła. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 11(86). Kraków. s. 251- 259.
- Kurpaska S.** 2007. Analiza energetyczna dolnych źródeł ciepła pompy grzewczej przy ogrzewaniu tunelu foliowego. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 9(97). Kraków. s. 103-111.
- Kurpaska S.** 2008a. Ekonomiczno-ekologiczne aspekty stosowania zintegrowanego systemu do ogrzewania obiektów ogrodnich. *Inżynieria Rolnicza*. 2(100). Kraków. s. 145-154.
- Kurpaska S.** 2008b. Wytyczne konstrukcyjno-eksploatacyjne dla systemów wykorzystujących pompę ciepła do ogrzewania obiektów ogrodnich. *Inżynieria Rolnicza*. 2(100). Kraków. s. 155-162.
- Nagano K., Katsura T., Takeda S.** 2006. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*. 26 (14-15). s. 1578-1592.
- Xu G., Zhang A., Deng S.** 2006. Simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering*. 26 (11-12). s. 1257-1265.
- Yumruta R., Unsal M.** 2000. A computational model of a heat pump system with a hemispherical surface tank as a ground heat source. *Energy*. 25(4). s. 371-388.
- Zalewski W.** 2001. Pompy ciepła: sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe. IPPU MASTA. Gdańsk. ISBN 83-913895-4-5.

METHODICAL ASPECTS OF THE ANALYSIS OF ENERGY ISSUES OF THE HEAT PUMP CO-OPERATING WITH VERTICAL HEAT EXCHANGERS

Abstract. This work presents the changes of efficiency of operation of the heat pump co-operating with vertical heat exchangers. On the basis of theoretical considerations, factors affecting the efficiency of the pump were distinguished and a model of multiple regression describing changes of efficiency in the function of decision variables was found. These considerations will be verified during laboratory tests at a station built of a compressor heat pump and vertical ground heat exchangers with a depth of 100 m.

Key words: heat pump, effectiveness, vertical ground heat exchangers

Adres do korespondencji:

Sławomir Kurpaska; e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków