

WPŁYW DŁUGOŚCI RUR POZIOMEGO GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA NA FUNKCJONOWANIE UKŁADU GRZEWczego Z POMPĄ CIEPŁA SPRĘŻARKOWĄ PAROWĄ

MAŁGORZATA HANUSZKIEWICZ-DRAPAŁA

*Institut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
e-mail: malgorzata.hanuszkiewicz-drapala@polsl.pl*

Streszczenie. W pracy zaprezentowano rezultaty analizy termodynamicznej układu: ogrzewany obiekt – sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy poziomy wymiennik ciepła. Procesy zachodzące w rozpatrywanym układzie mają charakter nieustalony. Przedstawiono i porównano wyniki obliczeń dla różnych, założonych długości rur wymiennika gruntowego. Wynikami obliczeń są m.in. zmienne w czasie strumienie ciepła pobieranego z gruntu, przekazywanego do ogrzewanego obiektu z pompy ciepła oraz z dodatkowego źródła ciepła, parametry w charakterystycznych punktach układu oraz całkowite zużycie energii. Rozpatrywano okres jednego sezonu grzewczego.

1. WSTĘP

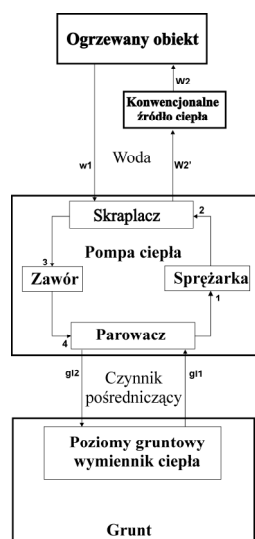
Układy grzewcze zasilane pompami ciepła (pompami grzejnymi) są coraz powszechniej stosowane. Szacuje się, iż liczba zainstalowanych w świecie pomp grzejnych sięga 40 milionów [1]. W Polsce w ciągu ostatnich kilku lat nastąpił wzrost zainteresowania tymi urządzeniami, jednakże ze względu na duże nakłady inwestycyjne są one nadal stosowane jedynie sporadycznie. Na ogół w układach grzewczych zasilających pojedyncze obiekty, takie jak np. domy mieszkalne, obiekty sportowe, szkoły [2], stosuje się pompy ciepła sprężarkowe parowe, dla których dolnym źródłem ciepła jest górotwór. Ciepło pobierane jest z górotworu za pośrednictwem czynnika cyrkulującego w układzie poziomego lub pionowego gruntowego wymiennika ciepła. W warunkach pogodowych charakterystycznych dla Polski, gdy okresowo występują niskie temperatury powietrza atmosferycznego, układy grzewcze z pompami ciepła posiadają dodatkowe źródło ciepła, które w przypadku prawidłowo działającej pompy grzejnej, pełni funkcję jedynie źródła szczytowego. Jak wykazały wcześniejsze analizy [3, 4, 6], parametry charakteryzujące działanie agregatu sprężarkowej parowej pompy grzejnej są ściśle związane z charakterystycznymi parametrami w obiegu czynnika pośredniczącego w gruntowym wymienniku ciepła, stanem termicznym górotworu, jak również z parametrami charakterystycznymi dla ogrzewanego obiektu, np. wymaganym zapotrzebowaniem na ciepło. Z kolei sposób działania pompy ciepła: ciągły bądź cykliczny wpływa na stan termiczny górotworu jako dolnego źródła ciepła.

W pracy niniejszej zaprezentowano wyniki analizy termodynamicznej układu: ogrzewany obiekt – sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy poziomy wymiennik ciepła. Rozpatrywany układ grzewczy, oprócz pompy ciepła, posiada dodatkowe, konwencjonalne źródło ciepła. Źródło to jest wykorzystywane wówczas, gdy wydajność cieplna sprężarkowej

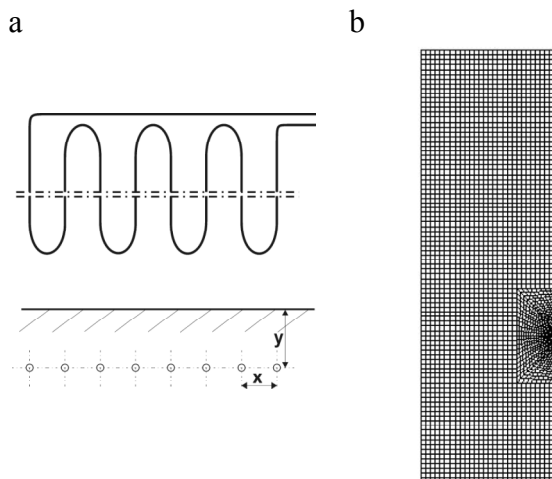
parowej pompy grzejnej jest zbyt mała, ażeby zapewnić wymaganą ilość ciepła. Wówczas pompa grzejna działa w sposób ciągły. W przypadku, gdy wydajność cieplna pompy grzejnej jest wystarczająco duża, pompa działa jedynie przez część doby aż do momentu, gdy zaspokojone zostanie wymagane zapotrzebowanie na ciepło grzejne. Przez pozostałą część doby, gdy ciepło z gruntu nie jest pobierane, ma miejsce regeneracja termiczna gruntu. Zmienne podczas sezonu grzewczego zapotrzebowanie na ciepło dla ogrzewanego obiektu jest znane. Głównym celem przeprowadzonej analizy było zbadanie wpływu długości rur gruntowego wymiennika ciepła na funkcjonowanie rozważanego układu, w tym także na zużycie energii elektrycznej do napędu sprężarki pompy grzejnej i do napędu pompy cyrkulacyjnej czynnika obiegowego w gruntowym wymienniku ciepła oraz na zużycie energii związane z działaniem dodatkowego źródła ciepła.

2. MODEL UKŁADU: OGRZEWANY OBIEKT - PAROWA SPRĘŻARKOWA POMPA GRZEJNA – GRUNTOWY POZIOMY WYMIENNIK CIEPŁA

Schemat analizowanego układu przedstawiono na rys.1. Zawiera on trzy zasadnicze elementy: ogrzewany obiekt, agregat sprężarkowej parowej pompy grzejnej składający się z parowacza, sprężarki, skraplacza i zaworu dławiącego oraz podukład: gruntowy wymiennik ciepła – grunt. W urządzeniach pompy grzejnej realizowany jest obieg Lindego. Funkcjonowanie wspomnianych trzech zasadniczych elementów jest ściśle z sobą powiązane.



Rys. 1 Schemat biwalentnego układu grzewczego z pompą grzejną sprężarkową parową i gruntowym poziomym wymiennikiem ciepła



Rys. 2 Schemat a) i powtarzalny fragment b) gruntowego poziomego wymiennika ciepła

W układzie wyróżnić można trzy obiegi termodynamiczne. W pierwszym z obiegów cyркуluje woda, która chłodzi skraplacz, a następnie oddaje ciepło w wymienniku ciepła do ogrzewanego obiektu. W obiegu drugim czynnikiem roboczym jest czynnik chłodniczy R134a, trzecim zaś obiegiem jest obieg czynnika pośredniczącego (wodnego roztworu glikolu propylenowego), który pobiera ciepło w gruntowym wymienniku ciepła, a następnie oddaje je w parowaczu pompy grzejnej. Numeryczną analizę obliczeniową przeprowadzono przy wykorzystaniu kodu komputerowego opracowanego na podstawie modelu matematycznego pompy grzejnej wraz z ogrzewanym obiektem oraz modelu gruntowego wymiennika ciepła

[4-5], przy dodatkowym uwzględnieniu hydraulicznych oporów przepływu czynnika pośredniczącego oraz radiacyjnej wymiany ciepła na powierzchni gruntu.

Jak wspomniano, zjawiska zachodzące w rozpatrywanym układzie mają charakter nieustalony. Zmiany charakterystycznych parametrów są jednak na tyle powolne, iż możliwe jest przyjęcie założenia, że w każdym z kroków czasowych działanie elementów pompy grzejnej oraz wymiennika ciepła w ogrzewanym obiekcie można opisać zależnościami dla stanu ustalonego [3, 4]. Podstawę modelu matematycznego pompy ciepła stanowią równania bilansu energii dla poszczególnych urządzeń oraz równania Pecleta dla wymienników ciepła. W modelu uwzględniono zmienność współczynników przenikania ciepła w parowaczu i skraplaczu. Parametry kaloryczne czynnika R134a wyznacza się, opierając się na formułach aproksymacyjnych na podstawie parametrów termicznych tego czynnika. Do grupy tych równań dołączono równanie bilansu energii i równanie Pecleta dla wymiennika ciepła w układzie ogrzewania budynku. Poniżej przedstawiono przykładowe równania opisujące działanie parowacza (1) - (3) oraz wymiennika w ogrzewanym obiekcie (4), przy czym znane jest zmienne podczas sezonu grzewczego dobowe zapotrzebowanie na ciepło grzejne. Jest ono liniową funkcją temperatury otoczenia (5) dla założonej znanej i stałej temperatury w ogrzewanym obiekcie oraz dla założonego maksymalnego zapotrzebowania na ciepło. Temperatura otoczenia jest zmienna podczas rozpatrywanego okresu – sezonu grzewczego (6). W obliczeniach, których wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy, przyjęto statystyczną dobową zmienność tej temperatury charakterystyczną dla Katowic. Równania opisujące funkcjonowanie skraplacza mają postać analogiczną jak równania (1)-(3). Podobnie jak w [3, 4] w modelu układu przyjęto, iż pompa grzejna działa w sposób ciągły przez część doby do momentu doprowadzenia do obiektu ogrzewanego wymaganej dobowej ilości ciepła. W pozostałym okresie doby agregat pompy grzejnej nie działa. W przypadku zbyt małej wydajności cieplnej pompy grzejnej układ wspomagany jest przez konwencjonalne źródło ciepła, pompa grzejna działa zaś przez całą dobę [4]. Równania opisujące funkcjonowanie elementów agregatu pompy grzejnej w każdym kroku czasowym uwzględniają wymienione założenia modelu.

$$\dot{Q}_e = \dot{V}_{gl} c_{gl} (T_{gl1} - T_{gl2}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_e = \dot{V}_f \rho_1 (h_1 - h_4) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_e = k_e A_e \frac{T_{gl1} - T_{gl2}}{\ln \frac{T_{gl1} - T_e}{T_{gl2} - T_e}} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{hs} = (kA)_{hs} \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln \frac{T_{w2} - T_p}{T_{w3} - T_p}} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{hs} = f(T_{ot}) \quad (5)$$

$$T_{ot} = f_{ot}(\tau) \quad (6)$$

gdzie:

A - powierzchnia wymiennika, m^2 , c - pojemność cieplna właściwa, $J/(kg \ K)$, h - entalpia właściwa, J/kg , \dot{V} - strumień objętości, m^3/s , \dot{Q} - strumień ciepła, W , T - temperatura, K , ρ - gęstość, kg/m^3 , indeksy: p - powietrze w ogrzewanym obiekcie, e - parowacz, f - czynnik R134a, gl - czynnik pośredniczący, hs - obiekt ogrzewany, ot - otoczenie, w - woda.

Jak wspomniano, analiza obliczeniowa związana jest z wpływem długości rur gruntowego wymiennika ciepła na działanie układu grzewczego. W każdym z rozważanych przypadków

przyjęto, iż układ gruntowego wymiennika ciepła składa się z czterech rur połączonych równolegle z parowaczem pompy grzewczej. Schemat wymiennika przedstawiono na rys. 2a. Model gruntowego wymiennika ciepła jest modelem dwuwymiarowym [4 - 5]. Rozpatrywane są zjawiska przepływu ciepła w powtarzalnym fragmencie obejmującym rurę wymiennika wraz z przylegającym obszarem gruntu (rys. 2b). Obszar ten ograniczony jest od dołu powierzchnią usytuowaną na głębokości ok. 30 m, jego powierzchnie boczne stanowią dwie pionowe płaszczyzny adiabatyczne, z których jedna zawiera oś rury, druga zaś leży w połowie odległości pomiędzy sąsiednimi rurami, górną zaś powierzchnią jest zewnętrzna powierzchnia gruntu. Przyjęcie dwuwymiarowego modelu wymiennika, przy konieczności wyznaczenia temperatury podgrzanego czynnika pośredniczącego, związane jest z przyjęciem dodatkowego założenia upraszczającego. Polega ono na tym, iż średni strumień ciepła pobieranego z gruntu q_{lsr} jest jednostkowym strumieniem średnim q_l wyznaczonym dla średniej temperatury czynnika pośredniczącego w wymienniku gruntowym T_{sr} [4 - 6]. Przyrost temperatury czynnika pośredniczącego w rurach gruntowych wymienników ciepła jest niewielki i w praktyce wynosi od 3 do 4 K [2, 6], co pozwala na przyjęcie wspomnianego założenia.

$$q_{lsr} = q_l(T_{sr}) \quad (7)$$

Średnia temperatura tego czynnika (8) związana jest zarówno z funkcjonowaniem gruntowego wymiennika ciepła jak i pompy grzewczej. Przy znanej długości rur wymiennika l możliwe jest wyznaczenie całkowitego strumienia ciepła pobieranego z gruntu w danym kroku czasowym Q_e , a następnie dla założonej pojemności cieplej strumienia czynnika pośredniczącego i temperatury tego czynnika przy dopływie do rur gruntowego wymiennika ciepła T_{gl1} , obliczenie temperatury przy wypływie T_{gl2} (9), (10).

$$T_{sr} = \frac{T_{gl1} + T_{gl2}}{2} \quad (8)$$

$$Q_e = q_{lsr} l \quad (9)$$

$$T_{gl2} = T_{gl1} + \frac{Q_e}{c_{gl} \dot{V}_{gl} \rho_{gl}} \quad (10)$$

Jak wspomniano, wartość strumienia czynnika pośredniczącego jest zmienna z uwagi na uwzględnienie w modelu oporów przepływu przez układ gruntowego wymiennika ciepła oraz parowacza H_R przy założeniu charakterystyki pompy cyrkulacyjnej H_p [5]. W każdym kroku czasowym wyznaczany jest nowy punkt pracy pompy cyrkulacyjnej, jako wypadkowa oporów przepływu (12) i charakterystyki pompy (11), tzn. wyznaczana jest nowa wartość strumienia objętości tłoczonego czynnika pośredniczącego \dot{V}_{gl} . Strumień ten jest związany ze średnią temperaturą czynnika pośredniczącego charakterystyczną dla danego kroku czasowego, a tym samym ze średnim strumieniem ciepła pobieranego z górotworu.

$$H_p = f(\dot{V}_{gl}) \quad (11)$$

$$H_R = f(\dot{V}_{gl}, T_{sr}) \quad (12)$$

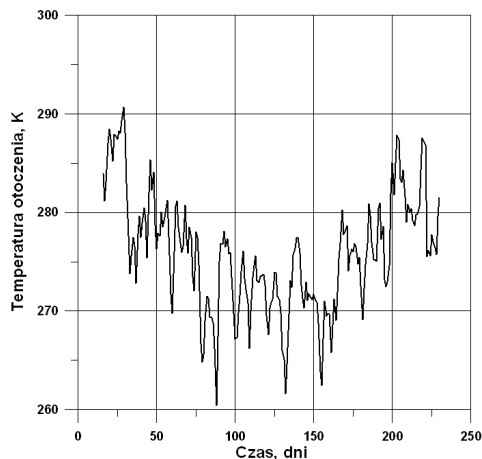
Do analizy procesów przewodzenia ciepła w gruncie otaczającym wymiennik ciepła wykorzystano oprogramowanie ANSYS-FLUENT. Bezpośrednim efektem jego działania jest jednostkowy strumień ciepła pobieranego z gruntu oraz rozkład temperatury w gruncie. W obliczeniach cieplnych obszaru górotworu otaczającego rury wymiennika uwzględniono

efekty przemian fazowych wilgoci zawartej w gruncie. Warunkiem brzegowym na styku zewnętrznej powierzchni rury i gruntu jest wartość zastępczego współczynnika przenikania ciepła $k = f_k(V_{gl}, T_{sr})$ oraz średnia temperatura czynnika pośredniczącego $T_{sr} = f(\tau)$. W okresie doby, w którym pompa ciepła nie działa, ciepło nie jest z gruntu pobierane i wówczas $k = 0$. Na zewnętrznej powierzchni gruntu założono konwekcyjno-radiacyjną wymianę ciepła z otoczeniem o zmiennej temperaturze, zmiennym natężeniu promieniowania słonecznego oraz zmiennej temperaturze niebosłonu [8]. Procedura obliczeniowa ma charakter iteracyjny.

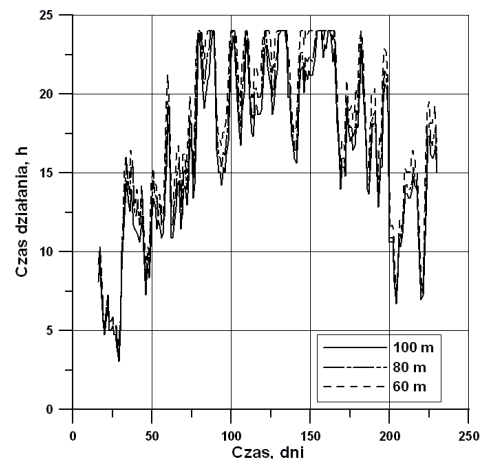
3. WYNIKI OBLICZEŃ, WNIOSKI

Przedstawiony model biwalentnego układu grzewczego z pompą grzejną posłużył do przeprowadzenia wariantowych obliczeń dla trzech założonych długości rur gruntowego wymiennika ciepła: 100 m, 80 m i 60 m. Rury znajdują się na głębokości 1,5 m i położone są w odległości 1,5 m. Obliczenia zrealizowano dla zróżnicowanych parametrów termofizycznych gruntu w stanie zamrożonym i niezamrożonym [7]. Parowacz i skraplacz są wymiennikami płaszczowo-rurowymi, przy czym parowacz posiada przegrody segmentowe. Średnice rur wymienników wynoszą 0,012 m/0,010 m, długości zaś rur są równe: dla parowacza 0,6 m, dla skraplacza 1,2 m. Przyjęto, iż iloczyn $(kA)_{hs}$ dla wymiennika ciepła w ogrzewanym obiekcie wynosi 600 W/K, strumień wody 0,8 kg/s, wydajność sprężarki 0,00475 m³/s, sprawność wewnętrzna sprężarki 0,80, sprawność mechaniczna sprężarki 0,92, sprawność silnika elektrycznego napędzającego sprężarkę 0,95. Chwilowe zapotrzebowanie na ciepło wyznaczano jako liniową funkcję temperatury otoczenia przy założeniu, że maksymalny wymagany strumień ciepła odpowiadający temperaturze otoczenia -20⁰C wynosi 12 kW, temperatura zaś w ogrzewanym obiekcie jest stała i wynosi 22⁰C. Dobową zmienność temperatury otoczenia przedstawiono na rys. 4. Obliczenia obejmowały okres, który rozpoczynał się w połowie września i trwał 230 dni. W okresie tym dobowy czas pracy agregatu pompy grzejnej był zmienny (rys. 5). W okresach zwiększonego zapotrzebowania na ciepło, tj w dniach charakteryzujących się spadkami temperatury otoczenia, dobowy czas działania agregatu pompy grzejnej jest najdłuższy. Rys. 6 przedstawia dobową ilość ciepła dostarczoną przez pompę grzejną w wybranych dniach sezonu grzewczego. W każdym z rozpatrywanych wariantów konieczne jest okresowe działanie dodatkowego źródła ciepła. Wówczas agregat pompy grzejnej działa w sposób ciągły przez całą dobę, niedobór zaś energii jest pokrywany przez źródło dodatkowe. W pozostałym okresie pompa grzejna funkcjonuje w sposób ciągły tylko przez część doby, doprowadzając w tym czasie do obiektu wymaganą ilość ciepła. W przypadku tym przez pozostałą część doby, tzn. w okresie, gdy pompa grzejna nie działa, ciepło z górotworu nie jest pobierane i ma miejsce częściowa regeneracja termiczna obszaru gruntu otaczającego rury wymiennika. Podczas sezonu grzewczego średni dobowy strumień ciepła pobieranego z gruntu maleje (rys.7). Jest to związane ze zjawiskiem wychładzania gruntu. Duży początkowo strumień ciepła z upływem czasu zmniejsza się, w końcowym zaś okresie sezonu grzewczego jego wartość rośnie, co wynika ze wzrostu temperatury otoczenia oraz natężenia promieniowania słonecznego w okresie wiosennym. Przy stałej wydajności sprężarki spadek strumienia ciepła pobieranego z gruntu skutkuje spadkiem wydajności cieplnej pompy grzejnej (rys. 7). Wielkości przedstawione na rys. 7, podobnie jak pozostałe wielkości średnie, wyznaczone zostały w odniesieniu do dobowego czasu działania agregatu pompy grzejnej (rys.8 - 11). Średnie dobowe wartości współczynnika efektywności energetycznej pompy grzejnej wyznaczone dla trzech długości rur są zróżnicowane i zmienne podczas sezonu grzewczego (rys. 8).

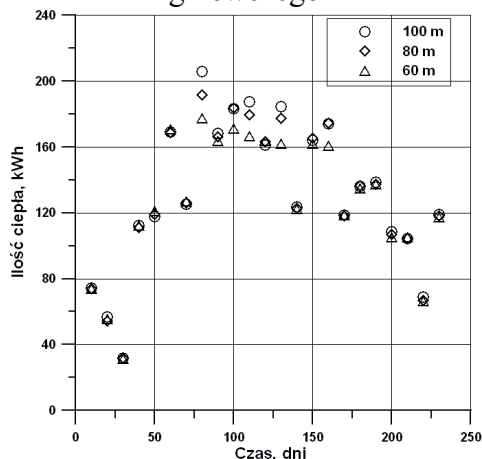
Najwyższe wartości współczynnik ten przyjmuje dla przypadku największej długości rur wymiennika. Zmienność strumienia czynnika pośredniczącego w rozpatrywanym okresie czasu jest nieduża (rys. 9). Najbardziej jest ona widoczna dla wymiennika o najmniejszej długości rur, co związane jest z niższymi wartościami temperatury czynnika pośredniczącego (rys. 10) w porównaniu z pozostałymi wariantami. Niższe temperatury czynnika pośredniczącego, skutkują także zwiększonym jednostkowym strumieniem ciepła pobieranego z gruntu (rys. 11).



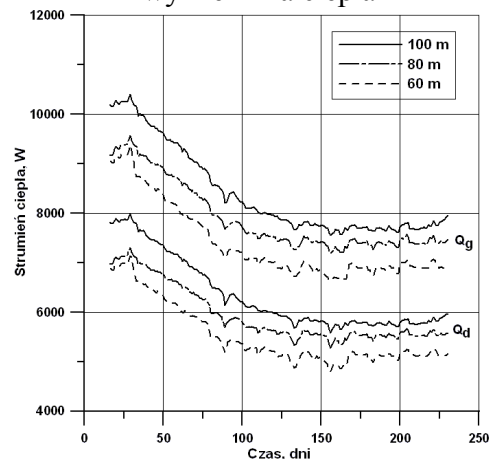
Rys. 4 Zmienność średniej dobowej temperatury otoczenia podczas sezonu grzewczego



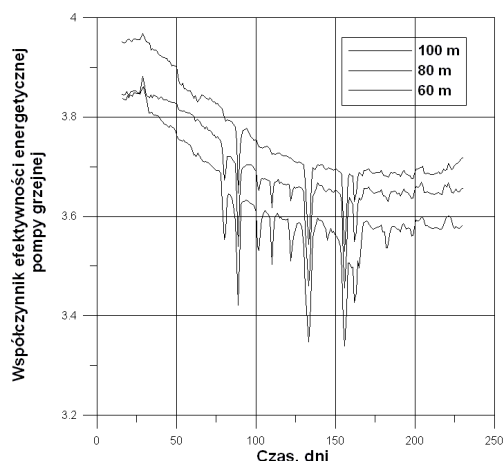
Rys. 5 Dobowy czas pracy pompy grzewczej dla założonych długości rur gruntowego wymiennika ciepła



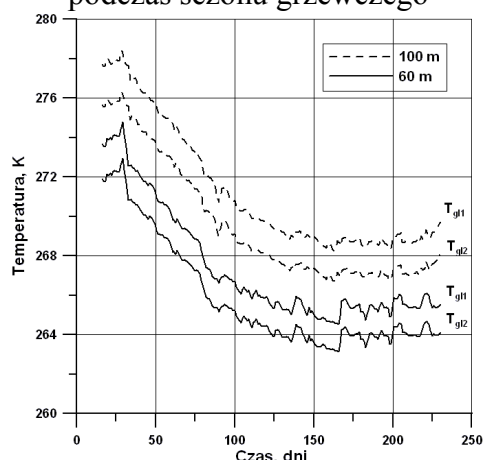
Rys. 6 Ilość ciepła dostarczanego przez pompę grzewczą w wybranych dniach sezonu grzewczego



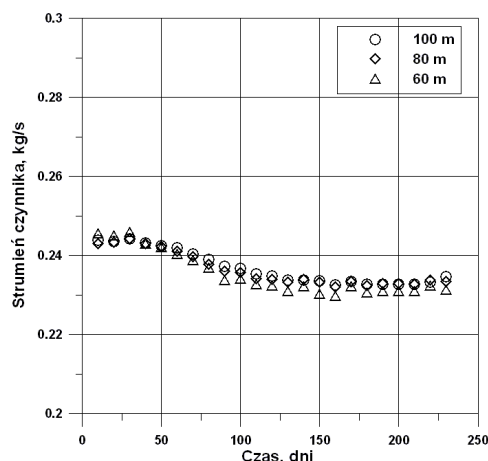
Rys. 7 Zmienność średniego dobowego strumienia ciepła wytwarzanego przez pompę grzewczą oraz pobieranego z gruntu podczas sezonu grzewczego



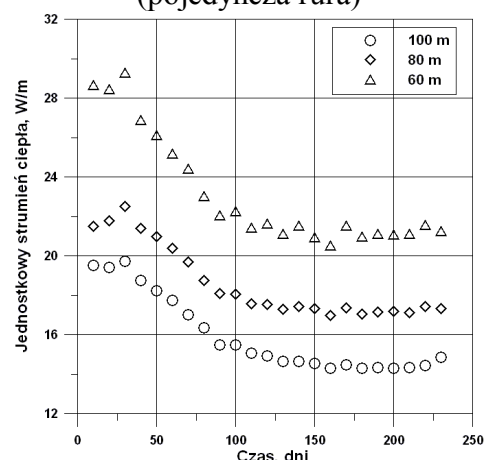
Rys. 8 Zmienność współczynnika efektywności energetycznej pompy grzewczej podczas sezonu grzewczego



Rys. 10 Zmienność średniej dobowej temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie i przy wypływie z gruntowego wymiennika ciepła



Rys. 9 Zmienność średniego dobowego strumienia czynnika pośredniczącego (pojedyncza rura)



Rys. 11 Zmienność średniego dobowego jednostkowego strumienia ciepła pobieranego w gruntowym wymienniku ciepła

Tabela 1 Wartości wskaźników charakteryzujących działanie układu

łączna długość rur gruntowego wymiennika ciepła, m	energia elektryczna/ilość ciepła dostarczonego przez pompę grzewczą	ilość ciepła z dodatkowego źródła/ilość ciepła dostarczonego przez pompę grzewczą
400	0,280	0,0081
320	0,285	0,0139
240	0,291	0,0204

Przeprowadzona wariantowa analiza obliczeniowa, której wybrane wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy, wykazała, że istnieje ścisły związek pomiędzy parametrami w każdym z trzech zasadniczych elementów rozpatrywanego układu, długość zaś rur wymiennika gruntowego wpływa na te parametry. W tabeli 1 zestawiono wartości wskaźników charakteryzujących funkcjonowanie układu. Uzyskane rezultaty wykazały, iż dobór długości rur gruntowego wymiennika ciepła jest istotny zarówno z uwagi na zużycie energii elektrycznej do napędu sprężarki oraz pompy czynnika pośredniczącego, jak też ze względu na energię dostarczaną do ogrzewanego układu przez dodatkowe źródło ciepła. W rozważanych wariantach, biorąc pod uwagę zużycie energii, zauważa się, że gruntowy

wymiennik ciepła o większej długości rur jest rozwiązaniem korzystniejszym, z drugiej zaś strony nakłady inwestycyjne w takim przypadku są zwiększone. Ostateczny dobór długości rur gruntowego wymiennik ciepła powinien być efektem analizy termodynamiczno-ekonomicznej o charakterze optymalizacyjnym

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy N N512 317238

LITERATURA

1. Brodowicz K., Dyakowski T.: Pompy ciepła. Warszawa : PWN, 1990.
2. Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne : podstawy teoretyczne, przykłady obliczeniowe. Gdańsk: IPPU Masta, 2001.
3. Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J., Fic A.: Numerical analysis of the system: vapour compressor heat pump – vertical ground heat exchanger. “Archives of Thermodynamics” 2007, Vol. 28, 1, p.15-32.
4. Hanuszkiewicz-Drapała m.: Heating system with vapour compressor heat pump and horizontal ground heat exchanger. “Archives of Thermodynamics” 2009, Vol. 30 4, p..49 – 61.
5. Hanuszkiewicz-Drapała M.: Modelowanie zjawisk cieplnych w gruntowych wymiennikach ciepła pomp grzejnych z uwzględnieniem oporów przepływu czynnika pośredniczącego. „Modelowanie Inżynierskie” 2009, nr4 38, t. 7, s.57 - 68.
6. Składzień J., Hanuszkiewicz-Drapała M., Fic A., Majchrzak K.: Pomiarowo obliczeniowa analiza pracy układu: sprężarkowa parowa pompa grzejna – pionowy gruntowy wymiennik ciepła. W: Materiały konferencji naukowo- technicznej „XXXVII Dni Chłodnictwa”. Poznań 2005, s. 199-210.
7. Składzień J.: Analiza cieplna i ekonomiczna mrożenia górotworu. Gliwice 1981. Zesz. Nauk. Pol. Śl. s. „Energetyka” nr 693.
8. Typowe lata meteorologiczne i statystyczne - dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków www.mi.gov.pl

INFLUENCE OF HORIZONTAL GROUND HEAT EXCHANGER PIPE LENGTH ON THE OPERATION OF THE HEATING SYSTEM WITH VAPOUR COMPRESSOR HEAT PUMP

Summary. This paper presents the results of thermodynamic analysis of the system: heated space – vapour compressor heat pump – ground heat exchanger. The processes taking place in the analysed system are of unsteady character. This paper compares calculation results for various length of horizontal ground heat exchanger pipes. The main results of calculations concern, among others, variable in time heat fluxes collected from the ground, transferred from heat pump and from additionally heat source to heated space, parameters at particular points of the system and total energy consumption in considered system during heating season. The period of one heating season is taken into consideration