MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISSN 1896-771X
38, s. 57-68, Gliwice 2009

MODELOWANIE ZJAWISK CIEPLNYCH W GRUNTOWYCH WYMIENNIKACH CIEPŁA POMP GRZEJNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM OPORÓW PRZEPŁYWU CZYNNIKA POŚREDNICZĄCEGO

MAŁGORZATA HANUSZKIEWICZ-DRAPAŁA

Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska
e-mail: malgorzata.hanuszkiewicz-drapala@polsl.pl

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest analiza nieustalonych procesów cieplnych zachodzących w obszarze gruntowego wymiennika ciepła współpracującego ze sprężarkową parową pompą grzejną. Zaprezentowano dwuwymiarowe modele numeryczne gruntowego poziomego oraz pionowego U-rurowego wymiennika ciepła, uwzględniające m.in. charakterystykę układu przepływowego wymiennika oraz charakterystykę pompy obiegowej czynnika pośredniczącego. Głównymi wynikami obliczeń są strumienie ciepła pobieranego z gruntu, przyrost temperatury czynnika pośredniczącego oraz rozkład temperatury w gruncie wokół rur wymiennika. Zaprezentowano przykładowe rezultaty analizy dla obu typów gruntowych wymienników ciepła.

1. WSTĘP

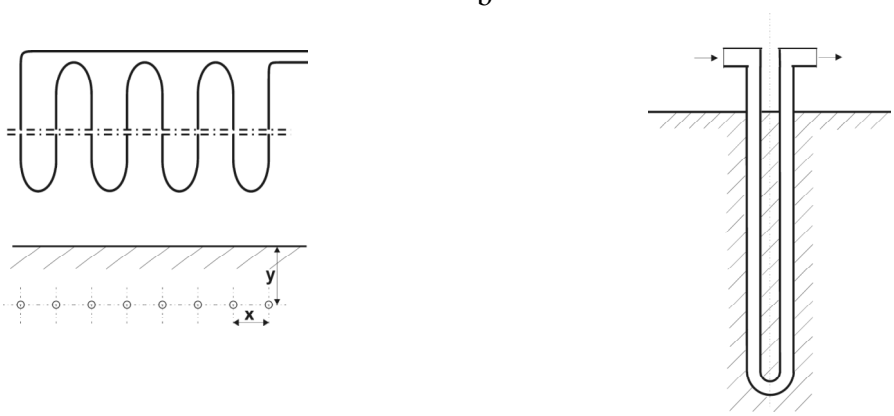
Sprężarkowe parowe pompy grzejne, nazywane również skrótowo pompami ciepła, znajdują coraz częstsze zastosowanie w systemach grzewczych pojedynczych obiektów mieszkalnych bądź obiektów użyteczności publicznej [1-3]. W wielu przypadkach dolnym źródłem ciepła dla pompy grzejnej jest górotwór, w którym zainstalowany jest rurowy wymiennik ciepła, poziomy bądź pionowy. Poziome wymienniki ciepła mają często postać wężownicy i usytuowane są na głębokości 1-1,5 m (rys.1a). Wymagają one większej powierzchni gruntu w porównaniu z wymiennikami pionowymi, które na ogół mają postać U-rury zainstalowanej w odwiercie o głębokości sięgającej 100 m (rys.1b). Wewnątrz rur gruntowego wymiennika ciepła przepływa czynnik pośredniczący, pobierający ciepło od górotworu, a następnie przekazujący je czynnikowi roboczemu w parowaczu sprężarkowej parowej pompy grzejnej. Jak wykazały wcześniejsze analizy, podczas sezonu grzewczego, gdy ciepło pobierane jest z gruntu, w otoczeniu rur gruntowego wymiennika ciepła kształtuje się nieustalone pole temperatury, a tym samym także wartości strumienia ciepła pobieranego z gruntu są zmienne w czasie. Ilość pobieranego ciepła zależna jest m.in. od konfiguracji rur wymiennika, właściwości termofizycznych gruntu, jego wilgotności [4-6], ewentualnego przesączania się wody gruntowej [7], jak również związana jest ze sposobem działania agregatu sprężarkowej parowej pompy grzejnej, tzn. pracą cykliczną bądź ciągłą [8-10].

Strumień ciepła pozyskiwany z górotworu związany jest ponadto z parametrami czynnika pośredniczącego takimi jak jego temperatura oraz strumień.

W pracy niniejszej zaprezentowano modele numeryczne dwóch wersji gruntowego wymiennika ciepła. Bazują one na opracowanych wcześniej modelach poziomego oraz pionowego U-rurowego gruntowego wymiennika ciepła [6, 9, 10], służących do analizy nieustalonych procesów zachodzących w otoczeniu tych wymienników. Przedstawione w artykule modele uwzględniają dodatkowo m.in. charakterystykę układu przepływowego czynnika pośredniczącego oraz charakterystykę pompy obiegowej tego czynnika. Tym samym modele te umożliwiają określenie wpływu oporu towarzyszącego przepływowi czynnika pośredniczącego na funkcjonowanie gruntowego wymiennika ciepła. Przyjęto ponadto, iż właściwości fizyczne czynnika pośredniczącego oraz współczynnik wnikania ciepła od płynu do ścianki rury są zależne od temperatury.

Założenia przyjęte w modelu, jak również zależności pomiędzy charakterystycznymi parametrami cechującymi układ gruntowego wymiennika ciepła powodują, iż procedura obliczeniowa ma charakter iteracyjny. Jak wspomniano, rozpatrywane zagadnienie ma charakter nieustalony. W pracy zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń porównując dwa przypadki. W przypadku pierwszym uwzględniono hydrauliczne opory przepływu czynnika pośredniczącego przez układ rur gruntowego wymiennika ciepła, w przypadku zaś drugim oporów tych nie uwzględniono. Obliczenia przeprowadzono dla wybranego okresu czasu, przyjmując, że ciepło pobierane jest z górotworu w sposób ciągły. Głównymi wynikami obliczeń w każdym z rozpatrywanych przypadków są zmienne w czasie wartości strumienia czynnika pośredniczącego, wartości strumienia ciepła pobieranego z gruntu oraz wartości temperatury czynnika pośredniczącego przy wypływie z rur wymiennika. Rezultatami są ponadto rozkłady temperatury w górotworze otaczającym rury wymiennika.

a b



Rys.1 Schematy gruntowych wymienników ciepła: a) wymiennik poziomy, b) wymiennik pionowy U-rurowy

2. MODEL NUMERYCZNY GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA

Numeryczna analiza procesów cieplnych zachodzących w górotworze, w rejonie rur wymienników w ogólnym przypadku wymaga stworzenia trójwymiarowego modelu rozpatrywanego obszaru, obejmującego powtarzalny element wymiennika ciepła wraz z przylegającym fragmentem górotworu. Możliwe jest wówczas wyznaczenie trójwymiarowego pola temperatury w gruncie oraz wartości temperatury czynnika pośredniczącego przy wypływie z rur wymiennika. Warunkiem brzegowym jest wówczas m.in.

temperatura czynnika pośredniczącego przy dopływie do rur wymiennika, która w rzeczywistości związana jest z działaniem agregatu pompy grzejnej. Z uwagi na to, iż gruntowe wymienniki ciepła pomp grzejnych cechują się dość znaczą długością, czas obliczeń numerycznych przy wykorzystaniu modelu trójwymiarowego, w szczególności w analizach układów pompa grzejna – gruntowy wymiennik ciepła, może być bardzo długi [8]. Mankamentu tego nie posiadają dwuwymiarowe modele numeryczne gruntowych wymienników ciepła. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie modeli dwuwymiarowych w analizach numerycznych układów: ogrzewany obiekt – sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy wymiennik ciepła, pozwala na znaczące skrócenie czasu obliczeniowego dla przypadków gruntowych wymienników ciepła o znacznych długościach rur oraz dla długich przedziałów czasowych np. dla całego okresu sezonu grzewczego [9, 10].

Konieczność wyznaczania temperatury podgrzanego czynnika pośredniczącego, przy założeniu dwuwymiarowego modelu wymiennika ciepła, związana jest z przyjęciem dodatkowego założenia upraszczającego. W opracowanym wcześniej modelu założono, iż wyznaczany w każdym z kroków czasowych, dla średniej temperatury czynnika pośredniczącego, jednostkowy strumień ciepła pobieranego z gruntu $q_l(t_{sr})$ jest jednostkowym strumieniem średnim q_{lsr} [9, 10]. Przyjęcie takiego założenia jest uzasadnione z uwagi na to, iż przyrost temperatury czynnika pośredniczącego w gruntowym wymienniku ciepła jest na ogół niewielki (ok.2-4K) [6, 9].

$$q_{lsr} = q_l(t_{sr}) \tag{1}$$

Średnia temperatura czynnika pośredniczącego w wymienniku w danym kroku czasowym obliczana jest jako średnia arytmetyczna temperatury tego czynnika przy dopływie do rur t_d i przy wypływie z rur t_w.

$$t_{sr} = \frac{t_d + t_w}{2} \tag{2}$$

Wartość tej temperatury związana jest z temperaturą czynnika przy dopływie do rur oraz z ilością ciepła pochłoniętego przez czynnik podczas przepływu przez rury wymiennika. Przy znanej długości rur l możliwe jest wyznaczenie całkowitego strumienia ciepła pobieranego z gruntu w danym kroku czasowym Q, a następnie dla założonej pojemności cieplej strumienia czynnika pośredniczącego, możliwe jest obliczenie temperatury czynnika przy wypływie z wymiennika gruntowego t_w.

$$Q = q_{lsr} l \tag{3}$$

$$t_w = t_d + \frac{Q}{c_{sr} m} \tag{4}$$

gdzie: m - strumień czynnika pośredniczącego, c_{sr} - średnia pojemność cieplna właściwa czynnika pośredniczącego.

Przyjęte w modelu gruntowego wymiennika ciepła założenie wymaga realizacji w każdym kroku czasowym obliczeń o charakterze iteracyjnym. W opracowanej procedurze numerycznej rozkład temperatury w gruncie w otoczeniu rur wymiennika ciepła oraz jednostkowy strumień ciepła pobieranego z gruntu wyznaczany jest z wykorzystaniem oprogramowania Fluent, który jest procedurą wielokrotnie wywoływaną w każdym kroku czasowym [8]. Warunkiem brzegowym jest średnia temperatura czynnika pośredniczącego oraz wartość współczynnika przenikania ciepła od zewnętrznej powierzchni rury do płynu wewnątrz rury.

Wcześniejsze analizy złożonych pionowo – poziomych gruntowych wymienników ciepła, przeprowadzone na podstawie zaprezentowanego modelu, wykazały dużą zgodność o charakterze jakościowym wyników obliczeń z wynikami pomiarów [6, 11]. Obliczenia te przeprowadzono dla średniej wartości strumienia objętości czynnika pośredniczącego w rozpatrywanym przedziale czasowym, będącej rezultatem pomiaru.

Przyjęcie stałej wartości strumienia masy czynnika pośredniczącego w zależności (4) stanowi pewne przybliżenie. W rzeczywistości strumień ten może ulegać zmianie podczas sezonu grzewczego, z uwagi na zmienną wartość średniej temperatury czynnika pośredniczącego. Wpływa ona na właściwości termofizyczne czynnika obiegowego, jak również na opory przepływu czynnika przez układ rur. Dla określonego, przyjętego typu pompy obiegowej, zmiana oporów przepływu powoduje zmianę wydajności pompy, z kolei zmiana strumienia objętości czynnika skutkuje zmianą oporów przepływu.

Uwzględnienie charakterystyki układu przepływowego czynnika pośredniczącego oraz charakterystyki pompy obiegowej czynnika stanowi rozwinięcie opracowanego wcześniej modelu gruntowego wymiennika ciepła. Dodatkowym elementem jest uzależnienie współczynnika wnikania ciepła od wewnętrznej ścianki rury do czynnika pośredniczącego od temperatury i prędkości tego czynnika.

Charakterystyki pomp obiegowych, wykorzystywanych m.in. do przetłaczania czynników pośredniczących w gruntowych wymiennikach ciepła, tj. wodnych roztworów glikolu etylenowego lub propylenowego, określone są na ogół dla wody i mają postać:

$$H_w = f(\dot{V}_w) \tag{5}$$

gdzie: H_w - wysokość podnoszenia pompy,

$\dot{V}_w$ - wydajność objętościowa pompy.

Charakterystykę pompy obiegowej tłoczącej roztwór glikolu należy skorygować z uwagi na zmieniającą się wraz z temperaturą lepkość oraz gęstość tego czynnika. Literatura [12] podaje przybliżone zależności, które należy zastosować, gdy stężenie roztworu glikolu jest większe od 10%:

$$\dot{V} = \dot{V}_w f_{V\rho} f_{V\eta} \tag{6}$$

$$H = H_w f_{H\rho} f_{H\eta} \tag{7}$$

gdzie: $\dot{V}, \dot{V}_w$ - strumień objętości roztworu glikolu oraz wody

$f_{V\rho}, f_{V\eta}$ - współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ odpowiednio gęstości i lepkości roztworu glikolu na strumień tłoczonej przez pompę cieczy,

H, H_w - wysokość podnoszenia dla pompy przetłaczającej odpowiednio roztwór glikolu oraz wodę,

$f_{H\rho}, f_{H\eta}$ - współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ odpowiednio gęstości i lepkości roztworu glikolu na wysokość podnoszenia pompy.

Występujące w zależnościach (6) i (7) współczynniki poprawkowe zależne są od średniej temperatury roztworu glikolu i na ogół podane są w postaci wykresów [12].

Na opory hydrauliczne towarzyszące przepływowi czynnika pośredniczącego przez rury gruntowego wymiennika ciepła składają się opory liniowe oraz miejscowe:

$$\Delta p = Rl + Z \tag{8}$$

gdzie: R - jednostkowa strata ciśnienia podczas przepływu przez układ rur wymiennika, Pa/m, l - długość rur wymiennika, m, Z - strata ciśnienia spowodowana oporami miejscowymi, Pa.

Jednostkowe opory przepływu charakterystyczne dla danego typu rur zależne są od rodzaju czynnika, jego prędkości i strumienia objętości. Można je wyznaczyć na podstawie nomogramów. Nomogramy takie są na ogół opracowane dla wody o temperaturze 20^0C. W celu wyznaczenia jednostkowych oporów dla innego czynnika, np. wodnego roztworu glikolu, można wykorzystać zależność [9]:

$$R = R_w \sqrt[4]{\frac{\nu}{\nu_w}} \tag{9}$$

gdzie: R_w - jednostkowa strata ciśnienia dla wody, Pa, ν, ν_w - kinematyczne współczynniki lepkości odpowiednio dla roztworu glikolu oraz dla wody.
Miejscowe straty ciśnienia związane są m.in. z zaworami, zmianą średnicy, kształtem przewodu rurowego (kolana, łuki) itp. Opisuje je następująca zależność:

$$Z = \sum_i \xi_i \frac{w^2}{2} \rho_i \tag{10}$$

gdzie: ξ_i - współczynnik oporów miejscowych, w_i, ρ_i - prędkość i gęstość czynnika. Można także posłużyć się zależnością (11), w której zastępcze długości rur, charakterystyczne dla oporu miejscowego, są funkcją średnicy wewnętrznej rury [13].

$$Z = R \sum_j l_{ej} \tag{11}$$

gdzie: l_{ej} - zastępcza długość rury dla oporu miejscowego, m.

Ciepło, które pobierane jest przez czynnik pośredniczący z górotworu, jest następnie przekazywane w parowaczu czynnikowi roboczemu cyrkulującemu w obiegu sprężarkowej parowej pompy grzejnej. Z przepływem roztworu glikolu przez parowacz wiąże się także strata ciśnienia. Przykładowo dla parowacza płaszczowo-rurowego z przegrodami segmentowymi spadek ciśnienia można określić w sposób przybliżony na podstawie następującej zależności [13]:

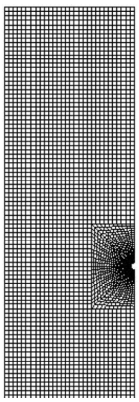
$$\Delta p_p = \zeta_p (N+1) \frac{w\rho^2}{2} \frac{D}{d_e} \tag{12}$$

gdzie: ζ_p - współczynnik zależny od liczby Reynoldsa, N - liczba przegród, w - prędkość przepływu prostopadłego do rur liczona między rurkami na średnicy wymiennika, pomiędzy sąsiednimi przegrodami, m/s, ρ - gęstość czynnika, kg/m^3, D - średnica wymiennika, m, d_e - średnica zastępcza liczona tak, jakby przegród nie było, dla przypadku przepływu równoległego do rur, m.

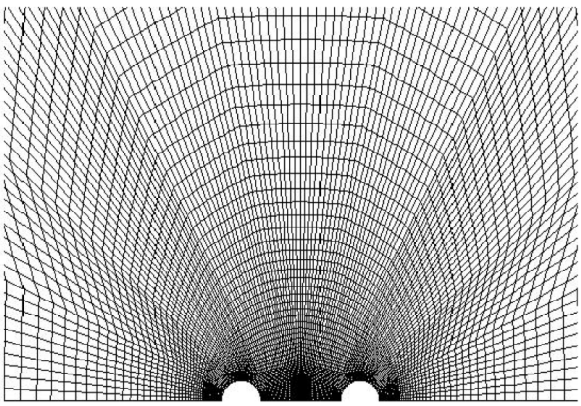
Zależności (5)-(12) umożliwiają wyznaczenie w każdym momencie nowego punktu pracy pompy cyrkulacyjnej, tzn. wartości strumienia objętości tłoczonego czynnika. Związany jest on ze średnią temperaturą czynnika pośredniczącego, charakterystyczną dla danego kroku czasowego, a tym samym ze średnim strumieniem ciepła pobieranego z górotworu.
Jak wspomniano, przeprowadzona analiza dotyczy dwóch typów gruntowych wymienników ciepła: poziomego oraz pionowego, U-rurowego. Powtarzalny fragment wymiennika poziomego obejmuje rurę wraz z przylegającym obszarem gruntu. Od góry ograniczony jest on powierzchnią gruntu, od dołu - powierzchnią usytuowaną na głębokości ok. 30 m. Powierzchnie boczne rozpatrywanego obszaru stanowią dwie pionowe płaszczyzny

adiabatyczne, z których jedna zawiera oś rury, druga zaś leży w połowie odległości pomiędzy sąsiednimi rurami. Pionowy gruntowy wymiennik ciepła ma kształt U-rury. Powtarzalny fragment tego wymiennika obejmuje obszar leżący w poziomej płaszczyźnie prostopadłej do osi U-rury, około połowy jej długości. Obszar ograniczony jest czterema powierzchniami adiabatycznymi, z których jedna jest płaszczyzną symetrii U-rury, druga leży w połowie odległości pomiędzy rurami, pozostałe zaś dwie płaszczyzny leżą w odległościach ok. 10 m od rury. Rozpatrywany obszar ma wymiary 12,5 m x 10 m. Powtarzalne fragmenty dla obu typów wymienników pokazano na rys. 2. W obliczeniach cieplnych obszaru górotworu otaczającego rury wymiennika uwzględniono efekty przemian fazowych wilgoci zawartej w gruncie poprzez przyjęcie w elementach, w których ma miejsce zmiana fazy, odpowiednio dużej zastępczej pojemności cieplnej właściwej. Warunkiem początkowym jest rozkład temperatury w górotworze.

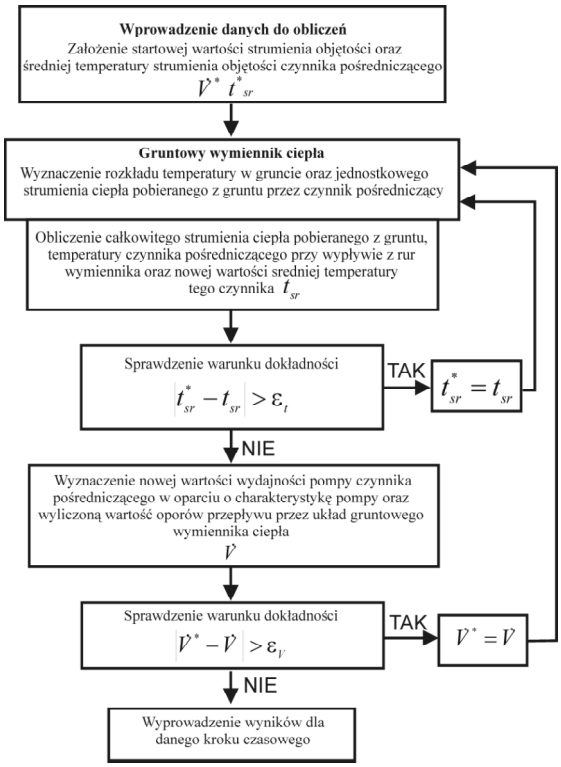
a



b



Rys.2 Fragmenty powtarzalnych elementów gruntowych wymienników ciepła: a) poziomego, b) pionowego



Rys.3 Schemat obliczeń realizowanych w każdym z kroków czasowych

Jak wspomniano, w dwuwymiarowych modelach wymienników ciepła założono jako warunek brzegowy temperaturę średnią czynnika pośredniczącego wewnątrz rury oraz zastępczy całkowity współczynnik przenikania ciepła od czynnika do zewnętrznej powierzchni rur. Temperatura ta jest zmienna w czasie, jej wartość zaś w każdym z kroków czasowych wynika z równań modelu. W obliczeniach uwzględniono ponadto zmienność wspomnianego współczynnika przenikania, wyznaczając wartość współczynnika wnikania ciepła od ścianki

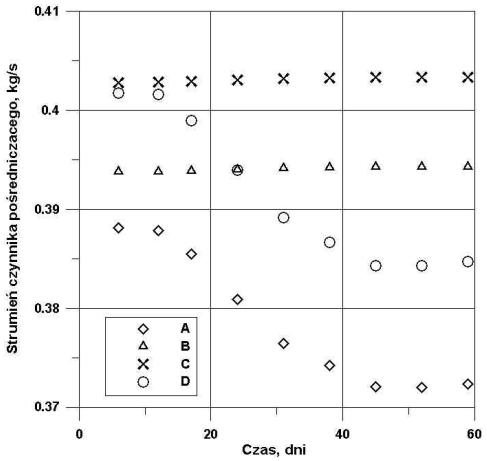
rury do płynu w oparciu o zależności podane w literaturze [14], dla średniej temperatury czynnika pośredniczącego.

Zależności (1)-(12) uwzględniają związek pomiędzy temperaturą czynnika pośredniczącego w gruntowym wymienniku ciepła, strumieniem tego czynnika, strumieniem ciepła pobieranego z górotworu oraz stanem termicznym górotworu w otoczeniu rur wymiennika ciepła. Jak wspomniano, rozpatrywane procesy cieplne zachodzące w układach gruntowych wymienników ciepła mają charakter nieustalony. W każdym kroku czasowym rozwiązywany jest układ zależności (1)-(12) przy uwzględnieniu zmienności współczynnika przenikania ciepła, jak również wyznaczany jest rozkład temperatury wokół rur wymiennika ciepła, co powoduje, iż procedura obliczeniowa ma charakter iteracyjny. Schemat obliczeń realizowanych w każdym kroku czasowym przedstawiono na rys. 3. Głównymi rezultatami obliczeń przedstawionego modelu są m.in. zmienne w czasie wartości strumienia czynnika pośredniczącego, wartości jego temperatury przy wypływie z wymiennika ciepła, wartości strumienia ciepła pobieranego z gruntu, jak również moc napędowa pompy obiegowej czynnika pośredniczącego.

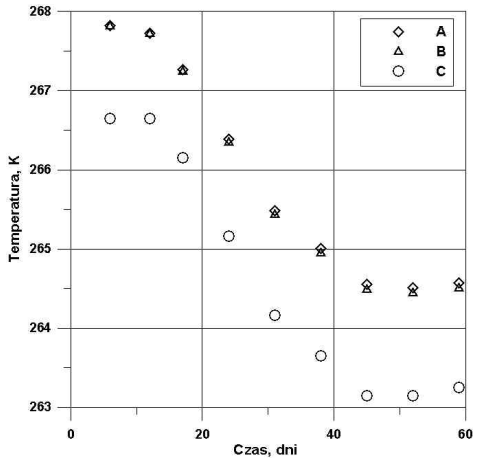
3. WYNIKI PRZYKŁADOWYCH OBLICZEŃ

Na podstawie przedstawionego modelu opracowano procedurę numeryczną, która umożliwia analizę procesów cieplnych zachodzących w gruntowych wymiennikach ciepła pomp grzejnych, z uwzględnieniem zmienności strumienia czynnika pośredniczącego. Obliczenia przeprowadzono, jak już wspomniano, dla wymiennika poziomego oraz pionowego U-rurowego. W obu przypadkach założono, iż wymiennik ciepła składa się z dwóch rur połączonych równolegle z parowaczem pompy grzejnej. Długość pojedynczej rury wymiennika poziomego wynosi 100 m, odległość pomiędzy równoległymi elementami rurowymi x=1,5 m, wymiennik zaś usytuowany jest na głębokości y=1,5 m (rys. 1a), liczba zaś powtarzalnych elementów wężownicy wynosi 10 (wariant podstawowy). Pomiędzy zewnętrzną powierzchnią gruntu a powietrzem atmosferycznym o zmiennej temperaturze [5] zachodzi konwekcyjna wymiana ciepła przy stałej wartości współczynnika wnikania ciepła 10 $W/(m^2 \cdot K)$. Startowy rozkład temperatury w gruncie jest rezultatem obliczeń cieplnych górotworu zrealizowanych dla przypadku, gdy ciepło z gruntu nie jest pobierane przez okres ok. dwóch lat poprzedzających moment startowy poboru ciepła z gruntu. W przypadku wymiennika pionowego przyjęto, że w chwili początkowej rozkład temperatury jest wyrównany w całym obszarze obliczeniowym. Temperatura ta równa jest 10^0C, zaś głębokość otworu, w którym usytuowany jest pojedynczy element U-rurowy, wynosi 50 m. Odległość pomiędzy U-rurami równa jest 5 m, zaś średnica zewnętrzna rur wynosi 40 mm, podobnie jak dla wymiennika poziomego. W obliczeniach przyjęto następujące wartości parametrów termofizycznych gruntu: gęstość - 1700 kg/m^3, pojemność cieplna właściwa 1200 $J/(kg \cdot K)$, współczynnik przewodzenia ciepła 1,5 $W/(m \cdot K)$, entalpia zmiany fazy 30000 J/kg. Rozpatrzono dwa zasadnicze przypadki: z uwzględnieniem charakterystyki układu przepływowego i charakterystyki pompy obiegowej (I) oraz z pominięciem tych elementów (II). W wariancie I obliczenia przeprowadzono dla przyjętej, rzeczywistej charakterystyki pompy, która tłoczy 33% wodny roztwór glikolu propylenowego. W każdym z rozpatrywanych układów gruntowego wymiennika ciepła założono tę samą konstrukcję parowacza oraz układu kolektora doprowadzającego czynnik pośredniczący do gruntowego wymiennika ciepła z parowacza oraz wyprowadzającego ten czynnik z wymiennika gruntowego do parowacza pompy grzejnej. Analizę obliczeniową w obu przypadkach (I i II) przeprowadzono dla zadanej czasowej zmienności temperatury czynnika przy dopływie do rur wymiennika,

charakterystycznej dla rzeczywistej instalacji z pompami grzejnymi sprężarkowymi parowymi, która zasila kompleks szkolno –sportowy w gminie Ożarowice [6, 11]. Przeprowadzone obliczenia dotyczyły okresu dwóch miesięcy od momentu uruchomienia instalacji, w którym ciepło pobierane było z gruntu w sposób ciągły. Okres ten rozpoczął się w trzeciej dekadzie lutego. Przykładowe wyniki obliczeń zaprezentowano na rys. 4-10.

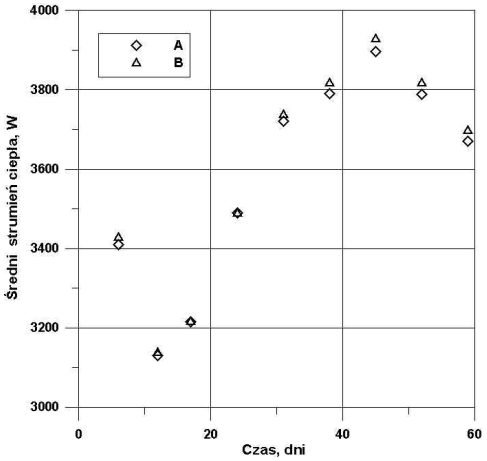


Rys.4. Zmienność strumienia masy czynnika pośredniczącego dla wymiennika poziomego (A- przypadek I, B – przypadek II) oraz dla wymiennika pionowego (D- przypadek I, C – przypadek II)

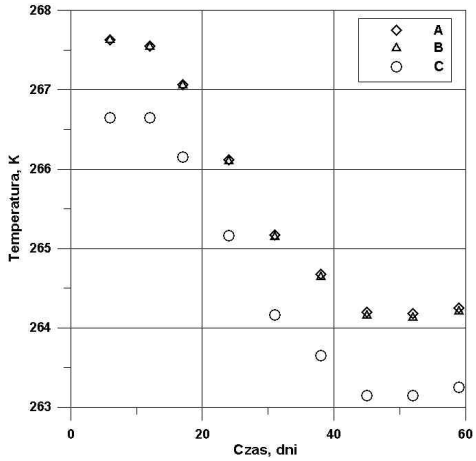


Rys.5. Zmienność temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie do wymiennika poziomego C) oraz przy wypływie z niego: A) przypadek I, B) przypadek II

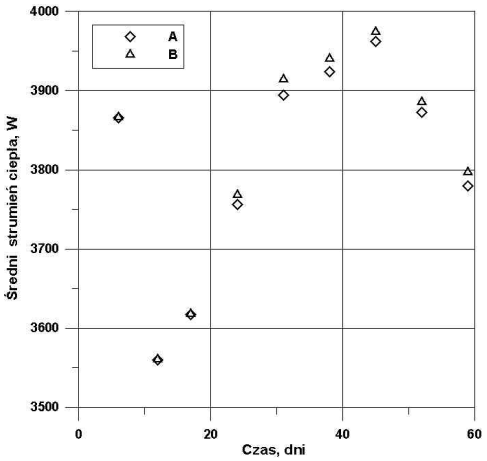
Na rys. 4 (A, B) przedstawiono zmienność strumienia masy czynnika pośredniczącego podczas rozpatrywanego okresu funkcjonowania wymiennika poziomego dla obu rozpatrywanych przypadków. W przypadku (II) przyjęto, iż stała wartość strumienia objętości równa jest wartości maksymalnej tego strumienia, która występuje w momencie rozpoczęcia funkcjonowania wymiennika dla przypadku I. W przypadku tym niewielkie zmiany strumienia masy czynnika podczas rozpatrywanego okresu wynikają jedynie ze zmian gęstości płynu. Analogiczne obliczenia zrealizowano dla pionowego U-rurowego wymiennika gruntowego (rys.4). W przypadkach uwzględniających występowanie oporów podczas przepływu zarówno dla wymiennika poziomego jak i pionowego zauważalna jest wyraźna zmiana wartości strumienia czynnika pośredniczącego. Zjawisko takie występuje już przy stosunkowo niewielkich zmianach temperatury tego czynnika przy dopływie do rur wymiennika podczas rozpatrywanego okresu (rys.5). Dla każdego kroku czasowego, co jest oczywiste, ustala się nowy punkt pracy pompy cyrkulacyjnej, wynikający z jej charakterystyki oraz charakterystyki układu przepływowego. Większe opory, charakterystyczne dla poziomego gruntowego wymiennika ciepła mającego postać wężownicy, skutkują mniejszymi chwilowymi wartościami strumienia czynnika w porównaniu z wymiennikiem pionowym. Zmiany strumienia czynnika pośredniczącego w pewnym stopniu wpływają na efekty funkcjonowania gruntowych wymienników ciepła. Otrzymane rezultaty obliczeń wykazują, że chwilowe obliczeniowe wartości całkowitego strumienia ciepła pozyskiwanego z górotworu są w rozpatrywanych układach wymienników nieznacznie mniejsze w przypadku I w stosunku do wartości wyznaczonych przypadku II (rys. 6, 8), temperatury zaś czynnika przy wypływie z rur są nieco wyższe (rys. 5, 7). Oczywiste jest, iż dla poziomego wymiennika ciepła mającego postać wężownicy wpływ oporów przepływu jest nieco bardziej widoczny w porównaniu z układem pionowego wymiennika U-rurowego.



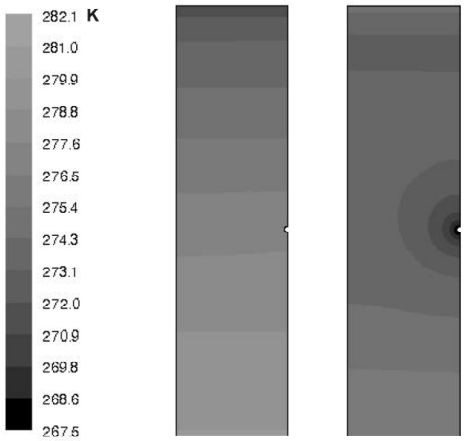
Rys.6. Zmienność strumienia ciepła pobieranego z gruntu w poziomym wymienniku ciepła: A) przypadek I, B) przypadek II



Rys.7. Zmienność temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie do wymiennika pionowego C) oraz przy wypływie z niego: A) przypadek I, B) przypadek II

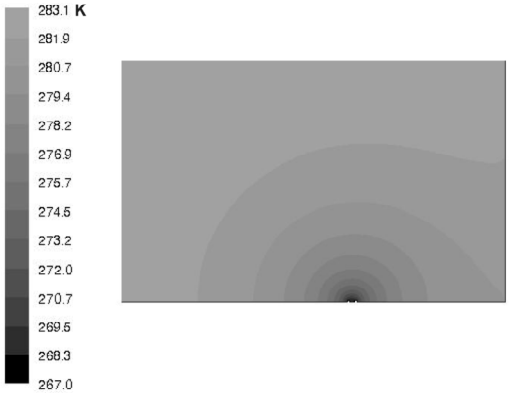


Rys.8. Zmienność strumienia ciepła pobieranego z gruntu w pionowym wymienniku ciepła: A) przypadek I, B) przypadek II

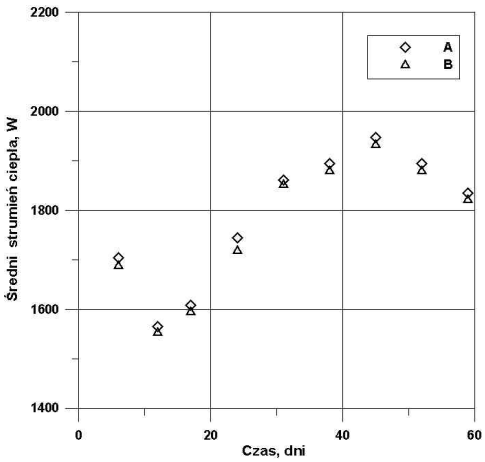


Rys.9. Rozkład temperatury w gruncie w otoczeniu rur poziomego wymiennika ciepła w momencie obliczeniowym startowym i końcowym (fragment obszaru)

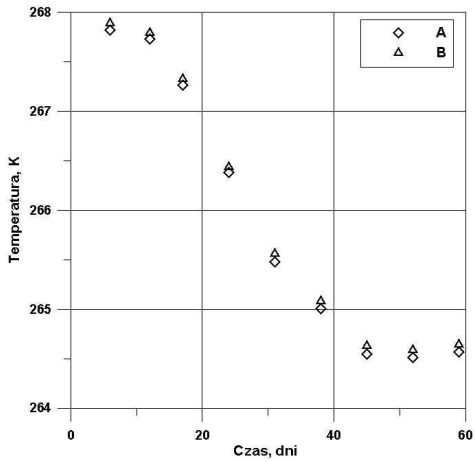
Na rys. 9 i 10 zamieszczono przykładowe rozkłady temperatury w gruncie w otoczeniu rur wymiennika poziomego oraz pionowego w końcowym okresie działania, jak również startowy rozkład temperatury dla wymiennika poziomego. Widoczne jest wyraźne wychłodzenie obszaru gruntu w sąsiedztwie rur wymienników ciepła w końcowym okresie poboru ciepła z gruntu, wzrost zaś temperatury gruntu w górnej warstwie dla przypadku wymiennika poziomego, związany jest ze wzrostem temperatury w otoczeniu w tym okresie.



Rys.10. Rozkład temperatury w górotworze w otoczeniu rury pionowego U-rurowego wymiennika ciepła w końcowym obliczeniowym momencie funkcjonowania (fragment obszaru)



Rys.11. Zmienność strumienia ciepła pobieranego z gruntu w poziomym wymienniku ciepła: A) przypadek Ia, B) przypadek Ib



Rys.12. Zmienność temperatury czynnika pośredniczącego przy wypływie z wymiennika poziomego: A) przypadek Ia, B) przypadek Ib

Kolejnym z rozpatrywanych problemów jest wpływ konfiguracji poziomego gruntowego wymiennika ciepła przy założonej takiej samej długości rur oraz założonej charakterystyce pompy cyrkulacyjnej na efekty energetyczne. Na rys. 11 i 12 porównano rezultaty obliczeń dotyczących przypadku I dla podstawowej konfiguracji wymiennika poziomego (Ia) z wynikami uzyskanymi dla wymiennika poziomego z dwukrotnie większą liczbą powtarzalnych elementów - zwojów wężownicy (Ib), przy pozostałych danych niezmiennych. W drugim ze wspomnianych wariantów chwilowe wartości strumienia czynnika pośredniczącego są mniejsze w porównaniu z wariantem podstawowym i zmieniają się w granicach 0,36-0,34 kg/s. Skutkuje to zmniejszeniem ilości ciepła pobieranego z gruntu.

Dla przypadku I w każdym z wariantów obliczeń zużycie energii napędowej przez pompę cyrkulacyjną w rozpatrywanym okresie wynosi ok. 220 kWh, ilość ciepła pobieranego z gruntu dla wymiennika pionowego równa jest ok. 5480 kWh, dla wymienników poziomych zaś o tej samej długości rur i różnej liczbie zwojów ma wartość odpowiednio ok. 5120 kWh (wariant podstawowy) oraz ok. 5080 kWh. Odpowiednie wartości strumieni ciepła pozyskiwanego z gruntu dla przypadku II wynoszą: dla wymiennika pionowego 5500 kWh, dla wymiennika poziomego (wariant podstawowy) 5150 kWh.

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Jak wspomniano, obliczenia numeryczne zrealizowano dla przyjętego rozkładu temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie do rur gruntowego wymiennika ciepła, przeprowadzając przy tym obliczenia dla stosunkowo krótkiego okresu czasu przy ciągłym poborze ciepła z gruntu. W rozpatrywanym zakresie zmian temperatury czynnika przy dopływie wpływ oporów hydraulicznych na ostateczny efekt funkcjonowania gruntowych wymienników ciepła czyli na ilość ciepła pobranego z gruntu jest stosunkowo niewielki. Nieduże są także zmiany temperatury podgrzanego czynnika opuszczającego wymiennik ciepła. Jak wykazały wcześniejsze analizy temperatura tego czynnika związana jest zarówno ze sposobem działania agregatu sprężarkowej parowej pompy grzejnej, ciągłym bądź okresowym, jak też z funkcjonowaniem wymiennika ciepła usytuowanego w górotworze, którego stan termiczny jest zmienny podczas sezonu grzewczego. Zakres zmian średniej temperatury czynnika pośredniczącego podczas sezonu grzewczego może być większy i sięgać kilkunastu K [9, 10]. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki obliczeń wykazały, iż w rozważanych przypadkach wpływ oporów przepływu czynnika pośredniczącego na efekty działania gruntowych wymienników ciepła jest znikomy. Można przypuszczać, że różnice efektów funkcjonowania mogą będą większe w przypadku większego zakresu zmian temperatury czynnika pośredniczącego podczas sezonu grzewczego.

Jak wykazały przeprowadzone obliczenia także konfiguracja gruntowych wymienników ciepła może wpływać na efekty energetyczne działania układu grzewczego z pompą ciepła. Ocena wpływu wspomnianych elementów wymaga jednak przeprowadzenia analiz znacznie szerszych, dotyczących układu trzech współdziałających elementów, tj. ogrzewanego obiektu, sprężarkowej parowej pompy grzejnej oraz gruntowego wymiennika ciepła

LITERATURA

1. Brodowicz K., Dyakowski T.: Pompy ciepła. Warszawa : PWN, 1990.
2. Sanner B.: Current status of ground source heat pumps in Europe. W: 9th Int. Conf. on Thermal Energy Storage FUTURESTOCK'2003.Warsaw 2003, s. 695-703.
3. Yasukawa K., Takasugi S.: Present status of underground thermal utilization in Japan. "Geothermics" 2003, 32, p. 609-618.
4. Składzień J., Hanuszkiewicz-Drapała M., Fic A.: Thermal analysis of vertical ground exchangers of heat pumps. "Heat Transfer Engineering" 2006, 27, No. 2 p. 2-13.
5. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M.: Strumienie ciepła przejmowanego w poziomym gruntowym wymienniku ciepła pompy grzejnej. „Chłodnictwo" 2002, nr 6, s. 8-12.
6. Hanuszkiewicz-Drapała M.: Analiza termodynamiczna gruntowego złożonego pionowo-poziomego wymiennika ciepła pompy grzejnej. „Chłodnictwo" 2008, nr 5, s.48-57.
7. Fic A.: Influence of Arrangement of freezing tubes on theground freezing proccess with flowing groundwater. W : Proc. Int. Conference Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems Moving Boundary V in Lubliana, Šarler, B., Brebbia, C.A., Power, H., ed., WITPRESS. Southampton, Boston 1999, s.19-28.
8. Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J., Fic A.: Numerical analysis of the system: vapour compressor heat pump – vertical ground heat exchanger, Archives of Thermodynamics, Vol. 28(2007), 1, s.15-32.
9. Hanuszkiewicz-Drapała M.: Comparative analysis of systems: vapour compressor heat pump – ground heat Exchange. "Archives of Thermodynamics" 2008, Vol. 29, 4, p. 49-61.

10. Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Energy consumption analysis in the system: vapour compressor heat pump – horizontal ground heat exchanger. Proceedings of the XII International Symposium Heat Transfer and Renewable Sources of Energy 2008, p.217-223.
11. 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.
12. Rubik M.: Pompy ciepła. Poradnik. Ośrodek Informacji: Technika instalacyjna w budownictwie. Warszawa 2006.
13. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. Warszawa : WNT, 1986.
14. Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne : podstawy teoretyczne, przykłady obliczeniowe. Gdańsk : IPPU Masta, 2001.

MODELING OF THERMAL PHENOMENA IN GROUND HEAT EXCHANGERS OF HEAT PUMPS TAKING INTO ACCOUNT HYDRAULIC RESISTANCES

Summary. Thermal unsteady processes in the ground heat exchanger system of heat pump are analysed in the paper. The two-dimensional numerical model of the horizontal and U-tube vertical heat exchanger is presented in the paper. The model takes into consideration characteristic of intermediate medium circulating pump and characteristic of flow system of this medium. The model allows the analysis of the hydraulic resistances influence on ground heat exchanger functioning. Heat flux taken from ground, the increase in the intermediate medium temperature and temperature field in the ground adjacent to the heat exchanger pipes are the main results of calculations. Exemplary results for both ground heat exchangers are also presented and analysed.