

Adam FIC, Małgorzata HANUSZKIEWICZ-DRAPAŁA,  
Jan SKŁADZIEN

*Institut Techniki Ciepłej*

*Politechniki Śląskiej*

*ul. Konarskiego 22, 44-101 Gliwice*

*[skladzie@itc.ise.polsl.gliwice.pl](mailto:skladzie@itc.ise.polsl.gliwice.pl)*

## UKŁADY Z POMPAMI GRZEJNYMI WYKORZYSTUJĄCE ZAKUMULOWANĄ W GRUNCIE ENERGIĘ PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

*Streszczenie.* W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania energii promieniowania słonecznego akumulowanego w gruncie w cyklach rocznych. Energia ta, pochłaniana głównie w okresie wiosenno-letnim, jest następnie wykorzystywana jako źródło ciepła dla układów z pompami grzejnymi (pompami ciepła). Ciepło pobierane jest od górotworu w poziomym lub pionowym gruntowym wymienniku ciepła, przy czym nośnikiem „zimna” jest odpowiedni niezamarzający roztwór, np. wodny roztwór glikolu etylenowego. Czynnikiem ten następnie przekazuje ciepło w parowaczu medium roboczemu pompy grzejnej. Celem pracy jest głównie zaprezentowanie przykładowych rezultatów złożonych obliczeń numerycznych, których wynikiem jest pole temperatury w gruncie oraz strumienie pobieranego ciepła.

## HEAT PUMP SYSTEMS UTILIZING SOLAR ENERGY ACCUMULATED IN GROUND

*Summary.* In the paper there are presented some possibilities of utilization of solar energy accumulated in the ground in annual cycles. Solar energy absorbed mainly during spring-summer time is then used as a heat source for systems with heat pumps. Heat is transferred from the ground by use of horizontal or vertical heat exchangers and the suitable non-freezing intermediate medium having a form, e.g., a water solution of ethylene glycol is used. This medium transfers then heat in evaporator to the working medium of heat pump unit. The aim of the paper there is the presentation of exemplary results of complex thermal calculations for the vertical ground heat exchanger. The results of these calculations have a form of temperature distributions in the ground as well as the heat fluxes taken from the ground.

### 1. Wstęp

Jednym ze wspólnych obszarów zainteresowań szeroko rozumianej energetyki oraz inżynierii środowiska jest energetyczne wykorzystanie niekonwencjonalnych oraz

odnawialnych źródeł energii. O ile sformułowanie „niekonwencjonalne” ma dość szeroki i niezbyt ściśle sformułowany zasięg, o tyle „źródła odnawialne” to takie możliwości pobierania energii z otoczenia, które nie powodują jego energetycznego zubożenia. Zgodnie z tym sformułowaniem nie wszystkie źródła uważane za odnawialne są nimi w pełni. Sytuacja taka ma miejsce np. w przypadku nieodpowiedniego wykorzystania wód termalnych, co może prowadzić do długotrwałego wychłodzenia górotworu, a nawet – co gorsze – do jego odwodnienia.

Powszechnie uważa się, że eksploatacja odnawialnych źródeł energii jest działaniem niezwykle ekologicznym, bardzo korzystnym dla człowieka i jego bliższego oraz dalszego otoczenia. Z punktu widzenia oddziaływań bezpośrednich często tak jest, choć z pewnością nie zawsze. Na przykład niewłaściwie usytuowane turbiny wiatrowe mogą powodować pewne zakłócenia o charakterze falowym, jak też mogą stwarzać problemy na trasach ptasich wędrówek. Mogą one też stanowić zagrożenie dla obsługi i okolicznej ludności w sytuacjach ekstremalnych. Przypadki takie są co prawda bardzo nieliczne, ale ilość energii elektrycznej produkowanej w takich układach jest też niewielka, co sprawia, że wskaźnik obrazujący stosunek skutków powypadkowych do ilości wyprodukowanej energii elektrycznej może tu być relatywnie duży. Z kolei w przypadku energetyki wodnej wypadki zdarzają się niesłychanie rzadko, gdy jednak takowe wystąpią, głównie w postaci przerwania tamy, to ich skutki bywają przerażające.

Bardzo poważnym ekologicznym skutkiem ubocznym wielu inwestycji jest negatywne oddziaływanie na środowisko o charakterze pośrednim, które może też mieć bardzo istotne znaczenie. Sytuacja taka występuje np. w przypadku elektrowni słonecznej. Elektrownia tego typu z punktu widzenia ekologicznego jest niewątpliwie bardzo przyjazna dla bezpośredniego otoczenia. Wybudowanie takiej elektrowni jednak (w tym np. 0,5 ha zwierciadeł na 1 MW [1]) powodować może bardzo poważne skutki środowiskowe w miejscu działania obiektów wytwarzających materiały do budowy elektrowni słonecznej.

Powyżej podane przykłady dotyczą wytwarzania energii elektrycznej. Podobne problemy mogą jednak pojawiać się również w przypadku wykorzystywania źródeł odnawialnych, w tym energii promieniowania słonecznego, do celów grzejnych, przy czym istnieje tu wiele możliwości bezpośredniego lub pośredniego skorzystania z tej energii. Niniejsza praca dotyczy jednego z pośrednich sposobów wykorzystania energii promieniowania słonecznego, a ściślej pobierania energii słonecznej zakumulowanej w górotworze przez układ: sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy wymiennik ciepła.

## 2. System z pompą grzejną i gruntem jako dolnym źródłem ciepła

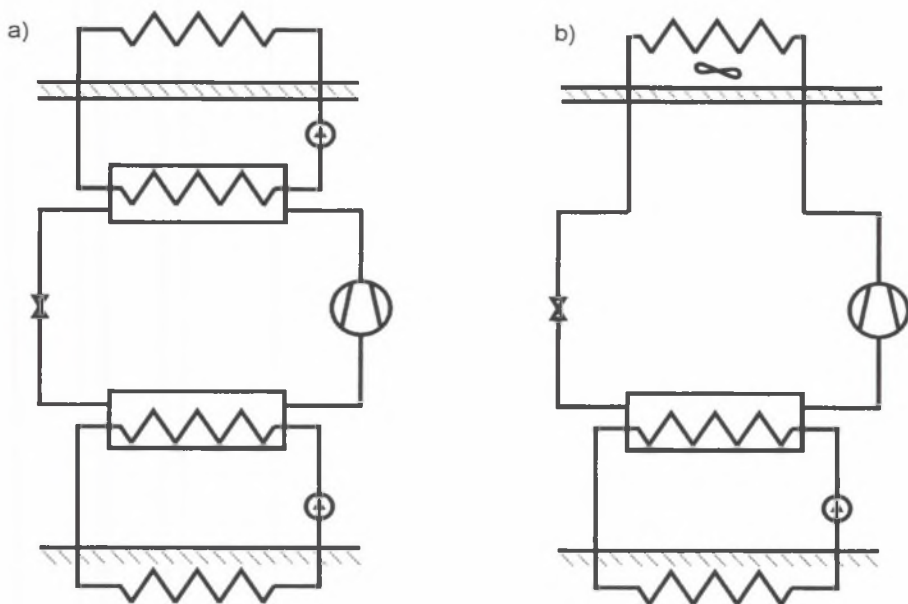
Pompy grzejne są w krajach rozwiniętych bardzo często stosowane jako elementy systemów grzejnych zarówno w przypadku dużych układów, zasilających dzielnice miejskie zamieszkałe przez setki tysięcy ludzi, jak i w warunkach małych układów, wykorzystywanych np. w domkach jednorodzinnych. Szacuje się, że w chwili obecnej na świecie jest zainstalowanych ponad 60 milionów różnego rodzaju pomp grzejnych [2÷6].

Podstawowym problemem, niezwykle istotnym zwłaszcza w warunkach polskich, przy instalowaniu systemów grzejnych z pompami ciepła, jest pobieranie ciepła ze źródła „dolnego”, czyli niskotemperaturowego. Źródło to może mieć postać naturalną lub wynikającą z działalności człowieka. W tym drugim przypadku źródłem tym mogą być np.

ścieki lub nośnik przemysłowej czy też komunalnej energii odpadowej w postaci np. powietrza z klimatyzowanych albo wentylowanych pomieszczeń. W przypadku naturalnych dolnych źródeł ciepła bardzo korzystne może być wykorzystanie niskotemperaturowych wód termalnych, jak np. w ciepłowni w Pyrzycach [4]. Jako dolne źródła ciepła mogą też występować: powietrze, niestety raczej nie w naszej strefie klimatycznej, niezamarzające zbiorniki lub ciekłe wodne oraz grunt jako przypowierzchniowa warstwa górotworu. Bardzo ciekawym rozwiązaniem jest zespół sprężarkowych parowych pomp ciepła stanowiących element systemu grzejnego dużej dzielnicy Sztokholmu o łącznej mocy cieplnej układu ponad 260 MW. Dolnym źródłem ciepła są tu w ziemie niezamarzające przy dnie wody Bałtyku o stałej temperaturze  $+4^{\circ}\text{C}$ , co umożliwia eksploatację systemu przy ustabilizowanej efektywności grzewczej wynoszącej ok. 3,0. System ten można uznać za wyjątkowo ekologiczny, gdyż dolne źródło ciepła ma tu postać w pełni odnawialną i jego wykorzystanie jest całkowicie obojętne dla otoczenia, a z drugiej strony energia elektryczna zasilająca, poprzez silniki elektryczne, agregaty sprężarkowe jest pobierana z systemu energetycznego opartego na elektrowniach wodnych oraz elektrowniach jądrowych z reaktorami wodnymi wrzącymi. Elektrownie ze współczesnymi wodnymi reaktorami jądrowymi z kolei [7÷11] są, obok elektrowni gazowych, najbardziej przyjaznymi dla środowiska i człowieka instalacjami służącymi do wytwarzania energii elektrycznej.

W przypadku wykorzystania bezpośrednio otoczenia, jako dolnego źródła ciepła w systemach grzejnych z pompami ciepła, rozwiązaniem mającym w warunkach polskich największe znaczenie praktyczne są układy: sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy wymiennik ciepła. Ogólne schematy takich układów przy ogrzewaniu powietrznym lub wodnym oraz przy wykorzystaniu czynnika pośredniczącego w obiegu ogrzewania parowacza pokazano na rys. 1. Z kolei na rys. 2 przedstawiono schematycznie, w sposób bardzo uproszczony, przykładowy poziomy oraz pionowy gruntowy wymiennik ciepła. Wymienniki takie pobierają od górotworu ciepło, które w praktyce jest zakumulowaną energią promieniowania słonecznego. Ciepło dopływające z wnętrza Ziemi w wyniku istnienia stopnia (gradientu temperaturowego) geotermalnego stanowi na ogół mniej niż 1% całkowitej ilości ciepła odbieranego od gruntu.

Pełna analiza termodynamiczna układu: sprężarkowa parowa pompa grzejna – gruntowy wymiennik ciepła wymaga rozpatrzenia bardzo złożonego zestawu równań opisujących pracę podstawowych elementów agregatu chłodniczego oraz przebieg zjawisk ciepłno-przepływowych zachodzących w rejonie gruntowego wymiennika ciepła. Działanie całego systemu zależy ponadto od sposobu sterowania jego pracą. W rozważaniach, których rezultaty przedstawiono przykładowo w niniejszej pracy, założono, iż sterowanie to powoduje jednoznaczne zdeterminowanie temperatury czynnika pośredniczącego opuszczającego parowacz, a więc kierowanego do wymiennika gruntowego. Układ może przy tym pracować przez cały okres grzewczy w sposób ciągły, może też działać okresowo, np. gdy sprężarka jest każdej doby uruchamiana jedynie w okresie, gdy obowiązuje niższa cena energii elektrycznej. W takim przypadku, tzn. gdy zadana jest temperatura czynnika pośredniczącego przy dopływie do wymiennika gruntowego, modelowanie procesów termodynamicznych w układzie sprowadza się do wyznaczania stanu termicznego górotworu, a przede wszystkim strumienia ciepła przejmowanego od gruntu przez czynnik pośredniczący.

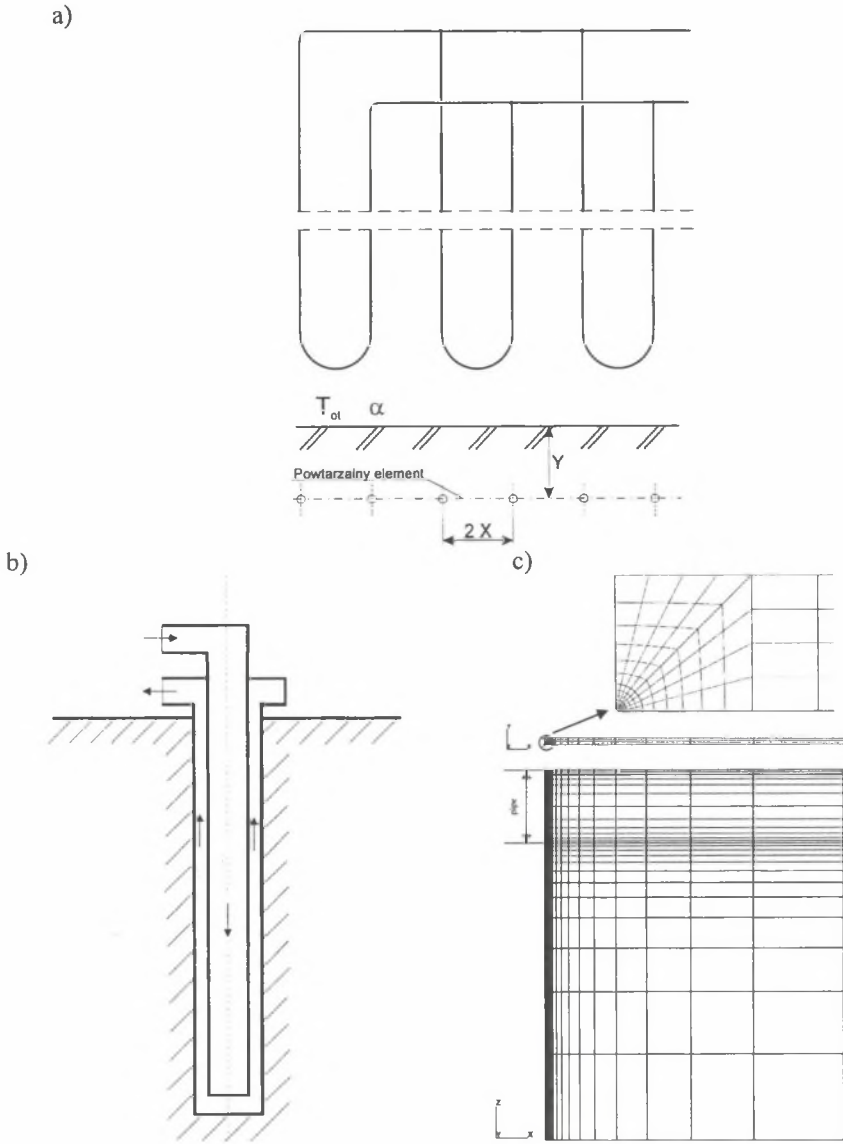


Rys.1. Schemat układów pomp grzewczych współpracujących z: a) ogrzewaniem wodnym, b) ogrzewaniem powietrznym

Fig.1. The scheme of heat pump systems working with: a) water heating system, b) air heating system

### 3. Modelowanie procesów ciepłno-przepływowych w obszarze gruntowego wymiennika ciepła pompy grzewczej

W Zakładzie Przepływu Ciepła, Energetyki Jądrowej i Źródeł Odnawialnych Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej od wielu lat prowadzone są analizy modelowo-komputerowe stanowiące kontynuację jednego z tradycyjnych nurtów zainteresowań badaczy gliwickiego ośrodka termodynamicznego [12]. Prace te związane są z procesami złożonego przepływu ciepła przy zmianie fazy, przy czym cechą charakterystyczną badań numeryczno-modelowych realizowanych w Zakładzie PCEJiŹO stanowi rozpatrywanie nieustalonego przepływu ciepła w zawodnionym ośrodku, w którym występują przemiany fazowe wilgoci. Jednym z głównych osiągnięć wynikających z dotychczasowych prac jest opracowanie przez A. Fica złożonego kodu obliczeniowego FEMCONV, wykorzystanego w niniejszej pracy [13÷17].



Rys.2. a) Schemat poziomego gruntowego wymiennika ciepła oraz powtarzalny jego fragment (obszar obliczeniowy), b) schemat powtarzalnego elementu pionowego wymiennika ciepła pompy grzewczej, c) obszar obliczeniowy i schemat podziału trójwymiarowego obszaru wokół pionowego wymiennika ciepła

Fig.2. a) The scheme of the horizontal ground heat exchanger and repetitive fragment (computational domain), b) the scheme of repetitive fragment of vertical heat exchanger, c) computational domain and the mesh assumed in 3D calculations of vertical heat exchanger

Podstawowym celem prac modelowo-obliczeniowych analizujących procesy zachodzące w rejonie gruntowego wymiennika ciepła pompy grzewczej jest, jak już wspomniano, wyznaczenie nieustalonego pola temperatury w górotworze w sąsiedztwie rur wymiennika, a następnie określenie strumieni ciepła przejmowanego od gruntu przez rury wymiennika i wnikającego następnie do czynnika pośredniczącego. Rozwiązanie takiego zagadnienia początkowo-brzegowego jest problemem złożonym z następujących powodów:

- proces jest nieustalony, a po pewnym czasie, z dużym na ogół przybliżeniem, powtarzalny w cyklach rocznych,
- pole temperatury w gruncie ma w zasadzie postać trójwymiarową, a jedynie w pewnych przypadkach, po przyjęciu określonych założeń, może być traktowane jako dwuwymiarowe,
- górotwór, którego górną, zewnętrzną, warstwę stanowi rozpatrywany grunt, zawiera pewną ilość wilgoci, która może podlegać – i na ogół podlega – przemianom fazowym,
- warunki początkowe i brzegowe mają dość złożoną formę; rozpatrywany obszar ma postać częściowo nieskończoną, a na zewnętrznej, górnej powierzchni gruntu występuje absorpcja promieniowania słonecznego (czyli o małej długości fali), radiacyjna wymiana ciepła o większej długości fal z przestrzenią kosmiczną oraz konwekcyjna wymiana ciepła z powietrzem atmosferycznym, którego temperatura podlega określonym, sezonowym, zmianom,
- w niezamrożonej części górotworu – gruntu może występować przesączanie się wody z bardzo niewielką prędkością rzędu  $10^{-5}$  m/s, a nawet  $10^{-6}$  m/s, co jednak ma istotne znaczenie z punktu widzenia strumieni ciepła odbieranego od górotworu w wymienniku gruntowym

Jak już wspomniano, podstawowym narzędziem obliczeniowym był własny kod komputerowy FEMCONV, do pomocniczych obliczeń zaś, a głównie do generacji siatki różnicowej, wykorzystano profesjonalny, komercyjny kod PATRAN. Procedury tworzące kod FEMCONV mają następujące, podstawowe cechy charakterystyczne:

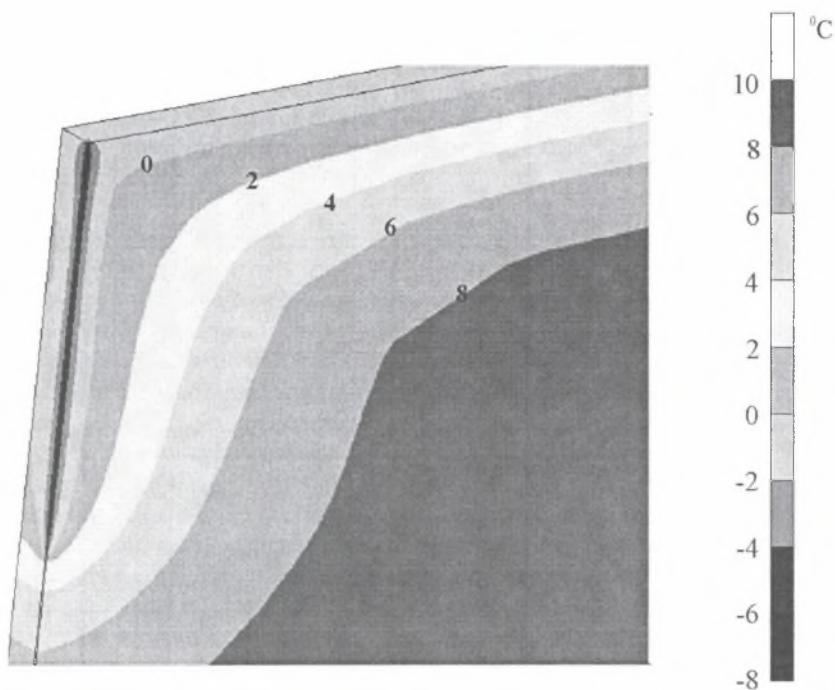
- zasadnicze obliczenia związane z rozwiązywaniem równania przewodzenia ciepła Fouriera-Kirchhoffa wykorzystują metodę elementów skończonych (FEM), odpowiednio dostosowaną do warunków rozpatrywanego zagadnienia,
- efekty cieplne procesu zmiany fazy wilgoci uwzględniono poprzez tzw. procedurę uśrednień całkowych, tj. założenie, że przemiana fazowa ma miejsce w bardzo niewielkim – choć skończonym – przedziale temperaturowym, przy odpowiednio zwiększonej, fikcyjnej pojemności cieplnej właściwej, obejmującej entalpię zmiany fazy,
- efekty ruchu wilgoci uwzględniono poprzez wykorzystanie prawa Darcy'ego, co wiąże się z pewnymi dodatkowymi założeniami, bardzo dobrze w rozpatrywanych przypadkach oddającymi rzeczywistość. Należy do nich np. przyjęcie, że temperatura migrującej wilgoci jest równa temperaturze w danym miejscu górotworu oraz że pole prędkości ruchu wilgoci ma taką postać jak w warunkach ustalonych. To ostatnie założenie wynika z faktu bardzo powolnych zmian kształtu i objętości obszaru niezamrożonego.

Oprócz wymienionych w obliczeniach wykorzystano cały szereg dodatkowych, dość oczywistych, na ogół, założeń upraszczających. Należy do nich zaliczyć np. przyjęcie, iż

charakterystyczne parametry termofizyczne gruntu są stałe i że zmieniają się one skokowo jedynie w chwili zmiany fazy wilgoci.

#### 4. Wyniki przykładowych obliczeń numerycznych

Przykładowe, ilustracyjne obliczenia liczbowe wykonano dla wymiennika utworzonego przez ustawione w jednym rzędzie w odległości 2 m pionowe elementy Fielda (rura w rurze) o długości 10 m i o średnicy zewnętrznej 0,052 m. Obszar obliczeniowy miał postać prostopadłościanu o wymiarach 1x20x30 m, a jego granice tworzyły m. in. dwie pionowe płaszczyzny symetrii prostopadłe do rzędu rur – jedna przechodząca przez oś rury i druga będąca płaszczyzną symetrii obszaru między rurami oraz prostopadła do nich płaszczyzna przechodząca przez osie rur. Jako początek sezonu grzewczego przyjęto koniec września, a czas jego trwania wynosił 230 dni. Charakterystyczne parametry termofizyczne gruntu miały postać: gęstość 1700 kg/m<sup>3</sup>, pojemność cieplna właściwa 1200 J/(kg·K), przewodność cieplna 1,5 W/(m·K), entalpia zmiany fazy 30 000 J/kg. Założono ponadto, że pojemność cieplna strumienia czynnika pośrodkującego jest na tyle duża, iż można przyjąć stałą jego temperaturę w całej rurze równą temperaturze przy dopływie do systemu rur w gruncie. W rzeczywistości przyrost temperatury czynnika podczas przepływu przez rurę jest na ogół wyraźnie poniżej 1 K.

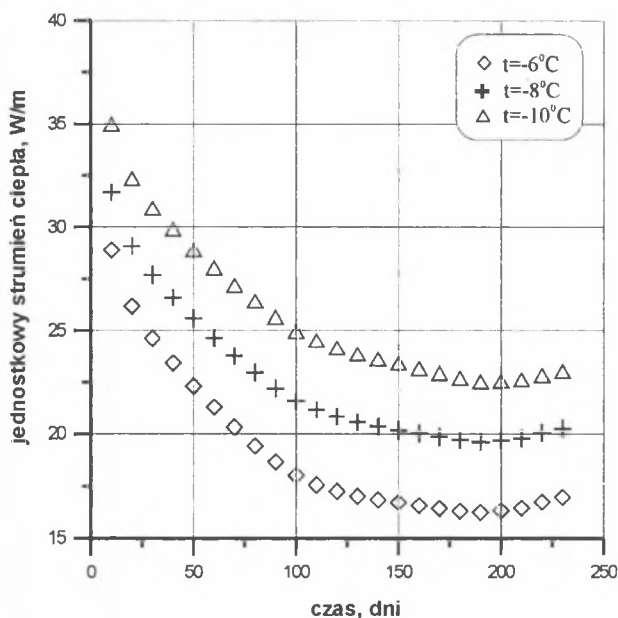


Rys.3. Rozkład temperatury w gruncie wokół rury pionowego wymiennika ciepła pompy grzewczej po 150 dniach od początku sezonu grzewczego

Fig.3. Contours of the temperature in the ground surrounding pipe of vertical exchanger of heat pump after 150 days of heating season

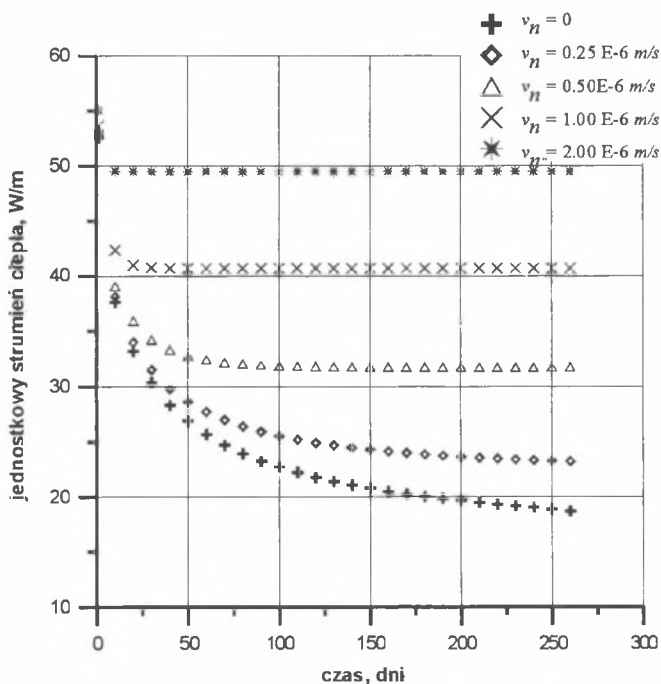
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy wykres przestrzenny pola temperatury w gruncie w rozpatrywanym obszarze po 150 dniach trwania drugiego sezonu grzejącego, tzn. pod koniec lutego. Dla użytkownika systemu z pompą grzejącą i wymiennikiem gruntowym istotne są, jak już wspomniano, strumienie ciepła przejmowanego od górotworu. Średnie wartości tych jednostkowych strumieni dla różnej, ale stałej w całym sezonie grzewczym, temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie do elementów rurowych w gruncie zawiera wykres na rys. 4, który dotyczy również drugiego sezonu grzewczego. Widać tu wyraźny spadek strumienia przejmowanego ciepła, potem jego pewną stabilizację, a następnie niewielki wzrost w okresie wiosennym, co wynika z silniejszego promieniowania słonecznego oraz wyższej, średniej w ciągu doby, temperatury powietrza atmosferycznego.

Na rysunku 4 widać także wyraźny wpływ temperatury czynnika pośredniczącego przy dopływie, tzn. nawet niewielki spadek tej temperatury powoduje widoczny wzrost strumienia ciepła przejmowanego od gruntu. Z drugiej jednak strony obniżenie poziomu temperatury czynnika pośredniczącego wiąże się z obniżeniem temperatury zmiany fazy czynnika roboczego w parowaczu agregatu pompy grzejącej, to zaś powoduje spadek jej efektywności grzewczej.



Rys.4. Jednostkowe strumienie ciepła pobieranego w pionowym wymienniku ciepła w funkcji czasu dla różnych wartości temperatury czynnika pośredniczącego  
 Fig.4. Heat flux density in vertical ground exchanger of heat pump versus time for various values of the temperature of an intermediate medium





Rys.5. Jednostkowe strumienie ciepła pobieranego w pionowym wymienniku ciepła pompy grzewczej w funkcji czasu dla różnych wartości prędkości wody gruntowej

Fig.5. Heat flux density in the vertical ground exchanger of heat pump for various values of seepage velocity

Obliczenia, których wybrane rezultaty zaprezentowano na rys. 3 i 4, dotyczyły przypadku, gdy nie występowały ruchy wód podziemnych. Aby zbadać wpływ migracji wilgoci przeprowadzono dodatkowe analizy, tym razem w układzie dwuwymiarowym, z dopływem wody poziomo, prostopadle do rur wymiennika. Rozpatrywano zatem poziomą, jednorodną warstwę górotworu prostopadłą do rur i położoną na takiej głębokości, że można pominąć wpływ zmian parametrów otoczenia zewnętrznego na pole temperatury wokół rur. Obszar obliczeniowy miał postać prostokąta o wymiarach 1x50 m, a fragment rezultatów uzyskanych dla drugiego sezonu grzewczego i przy stałej temperaturze dopływającego czynnika pośredniczącego  $-8^{\circ}\text{C}$  przedstawiono na rys. 5. Parametrem w odniesieniu do krzywych wyrażających przebieg zmienności jednostkowego strumienia przejmowanego ciepła jest tu prędkość graniczna dopływu wody. Mimo niezwykle małych prędkości przesączania się wilgoci ma ona jednak bardzo duży wpływ na strumienie odbieranego ciepła. Przy odpowiednio dużej prędkości napływu wilgoci strumienie te po krótkim czasie stabilizują się na poziomie tym wyższym, im większa jest prędkość napływu.

Obliczenia, których wyniki przedstawiono na rys. 4 i 5, zostały zrealizowane przy nieco innych założeniach, dlatego para odpowiadających sobie krzywych na tych rysunkach (zerowa prędkość dopływu wilgoci, temperatura początkowa czynnika  $-8^{\circ}\text{C}$ ) nie pokrywa się całkowicie. Wynika to głównie z braku wpływu procesu wiosennego ogrzewania gruntu

w przypadku wariantu jak na rys. 5, co powoduje monotoniczny przebieg krzywych, podczas gdy na rys. 4 widoczny jest, co prawda niewielki, ale wyraźnie zauważalny wpływ warunków wiosennych na procesy ciepłne w przepowierzchniowej warstwie gruntu.

## 5. Wnioski, uwagi końcowe

Wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych, przykładowych obliczeń zostały już podane w formie komentarzy do kolejnych rysunków. Wyjaśnienia wymaga jednak fakt prezentowania każdorazowo wyników dla drugiego sezonu grzewczego. Wynika to stąd, że jako warunek początkowy, przed pierwszym sezonem grzejnym, zakładano stałą, wyrównaną temperaturę górotworu. Postać pola tej temperatury przed drugim sezonem grzejnym wynikała z obliczeń realizowanych dla całego pierwszego roku. Obliczenia dla dalszych lat wykazały, że w kolejnych latach pole temperatury w gruncie, a tym samym strumienie przejmowanego ciepła, zmieniały się cyklicznie w taki sposób, jak w roku drugim, jeśli cyklicznie zmieniały się w kolejnych latach warunki brzegowe.

Przedmiotem rozważań numeryczno-obliczeniowych jest w pracy przykładowy wymiennik gruntowy o postaci pionowej. Wyniki podobnych analiz zamieszczono również w opracowaniach [18÷23]. Autorzy niniejszej publikacji przeprowadzili także wielowariantowe analizy obliczeniowe dla przykładowych wymienników gruntowych z rurami poziomymi [20÷31]. W przypadku takich wymienników oczywiście znacznie silniejszy jest wpływ warunków otoczenia. W szczególności strumień ciepła odbieranego od gruntu maleje w czasie zimy w większym stopniu, gdyż większy jest wpływ procesu wychłodzenia przepowierzchniowej warstwy gruntu. Obliczenia wykazały również, że ewentualne poziome ruchy wilgoci nie mają wtedy aż tak istotnego wpływu, co związane jest z kolei z dużym obszarem gruntu wokół rur. Analizy obliczeniowe potwierdziły także przypuszczenia, jak określone parametry mogą wpływać na strumienie odbieranego ciepła, a przede wszystkim jaki jest wpływ głębokości położenia poziomych rur.

Ostatnia uwaga ma charakter bardzo ogólny. Wykorzystanie pomp grzejnych sprawia, że mniej ciepła służącego do celów grzejnych pochodzi, pomijając przypadki bardzo szczególne, ze spalania paliw organicznych. Tym samym stosowanie tego typu urządzeń jest całkowicie zgodne z zasadą rozwoju zrównoważonego. Autorzy pracy są ponadto przekonani, że stosowanie pomp grzejnych także w warunkach polskich mogłoby się stać w pełni opłacalne, gdyby opłaty za nośniki energii uzyskane w wyniku spalania paliw kopalnych uwzględniały w pełni koszty zewnętrzne, a więc koszty środowiskowe.

## Bibliografia

1. Szargut J., Ziębiak A.: Podstawy energetyki ciepłnej. PWN, Warszawa 1998
2. Brodowicz K., Dyakowski T.: Pompy ciepła. PWN, Warszawa 1990
3. Mikielewicz J., Cieśliński J.: Niekonwencjonalne urządzenia i systemy konwersji energii. ZN im. Ossolińskich, Wrocław 1999
4. Sobański R., Kabat M., Nowak W.: Jak pozyskać ciepło z Ziemi. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa 2000
5. Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe. IPPU MASTA, Gdańsk 2001

6. Lewandowski W.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej. WNT, Warszawa 2001
7. Celiński Z., Strupczewski A.: Podstawy energetyki jądrowej. WNT, Warszawa 1984
8. Strupczewski A.: Awarie reaktorowe, a bezpieczeństwo energetyki jądrowej. WNT, Warszawa 1990
9. Lech M.: Kierunki rozwoju elektrowni jądrowych. Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 1997
10. Mastalerz P.: Ekologiczne kłamstwa ekowojowników. Wydawnictwo Chemiczne, Wrocław 2000
11. Składzień J., Fic A.: Zjawiska cieplno-przepływowe w układach lokalizacji awarii lekkowodnych reaktorów jądrowych. XI Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Gliwice-Szczyrk 2001
12. Białecki R., Fic A., Rudnicki Z., Składzień J., Skorek J.: Wybrane metody modelowania procesów wymiany ciepła. Gospodarka Paliwami i Energią 1, 1999
13. Fic A.: FEM technique for convective-diffusion problems with moving boundary. Int. Conf. Heat Transfer with Change of Phase "Heat 96", Kielce 1996
14. Fic A., Składzień J.: FEM solution of the ground freezing problem with flowing groundwater. Int. Conf. on Moving Boundaries, Gandawa 1997
15. Fic A.: FEM solution of heat transfer problem in the ground with change of phase and groundwater flow. Europ. Cong. ECCOMAS 2000, Barcelona 2000
16. Fic A.: FEM technique of solving of the ground freezing problem with flowing groundwater. 34<sup>th</sup> National Heat Transfer Conf., Pittsburg 2000
17. Fic A.: Solving of 3D heat transfer problems in the ground with change of phase and groundwater flow. 2-nd Int. Conf. on Comp. Heat and Mass Transfer, Rio de Janeiro 2001
18. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Numeryczna analiza procesów termodynamicznych w pionowym gruntowym wymienniku ciepła pompy grzewczej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Zesz. Kat. Mech. Stos., Gliwice, 2002.
19. Składzień J., Hanuszkiewicz-Drapała M., Fic A.: Modelowanie procesów cieplnych w gruntowym wymienniku ciepła pompy grzewczej z elementami Fielda. XLII Symp. PTMTS Modelowanie w mechanice, Wisła 2003
20. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Piątek R., Składzień J.: Heat transfer analysis in ground heat exchanger systems of heat pumps. Europ. Cong. ECCOMAS 2000, Barcelona 2000
21. Składzień J., Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M.: Procesy cieplne w obszarach gruntowych wymienników ciepła pomp grzewczych. Konf. N-T XXXIII Dni Chłownictwa, Poznań 2001
22. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Numerical analysis of thermal processes in ground heat exchangers of heat pump systems. 2-nd Int. Conf. on Comp. Heat and Mass Transfer, Rio de Janeiro 2001
23. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Wpływ ruchu wód podziemnych na efektywność gruntowego wymiennika ciepła pompy grzewczej. XVIII Zjazd Termodynamików, Warszawa 2002
24. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Piątek R., Składzień J.: Temperature field analysis in region of heat pump underground heat exchanger. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Zesz. Kat. Mech. Stos., Gliwice, 2000

25. Hanuszkiewicz-Drapała M., Piątek R., Składzień J., Fic A.: Wpływ zewnętrznych strumieni ciepła na efektywność gruntowego wymiennika pompy ciepła. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Zesz. Kat. Mech. Stos., Gliwice, 2001
26. Składzień J., Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M.: Ochładzanie i nagrzewanie gruntu w obszarze wymiennika ciepła pompy grzewczej. Gospodarka Paliwami i Energią 11, 2002
27. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Wpływ strumienia czynnika pośredniczącego na efektywność gruntowego wymiennika pompy grzewczej. XI Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Gliwice-Szczyrk 2001
28. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Procesy cieplno-przepływowe w poziomym wymienniku gruntowym pompy grzewczej. VIII Konf. Kierunki i Sposoby Oszczędzania Energii, Katowice 2002
29. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Obszar gruntowego wymiennika pompy grzewczej jako akumulator energii słonecznej. XVIII Zjazd Termodynamików, Warszawa 2002
30. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M.: Strumienie ciepła przejmowanego w poziomym gruntowym wymienniku pompy grzewczej. Chłodnictwo 6, 2002
31. Fic A., Hanuszkiewicz-Drapała M., Składzień J.: Modelowanie procesów przepływowych w poziomym gruntowym wymienniku ciepła pompy grzewczej przy ruchu wód podziemnych. XLII Symp. PTMTS Modelowanie w Mechanice, Wisła 2003

*Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego nr 4T10B 039 23 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.*