

Grzegorz PEŁKA
Wojciech LUBOŃ
Monika SZCZYGIEŁ
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Katedra Surowców Energetycznych
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30
tel. (12) 617-40-57; e-mail: gpelka@geol.agh.edu.pl,
lubon@agh.edu.pl, monika.szczygiel@o2.pl

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 1–2/2011

ANALIZA PARAMETRÓW INSTALACJI GRZEWCZO-CHŁODZĄCEJ Z GRUNTOWĄ POMPĄ CIEPŁA W TRYBIE OGRZEWANIA I PASYWNEGO CHŁODZENIA

STRESZCZENIE

W ostatnim czasie wzrasta w Polsce zainteresowanie pompami ciepła, szczególnie tymi z gruntowym dolnym źródłem ciepła. Powoduje to powstanie nowej możliwości zastosowania jednej, zintegrowanej instalacji do celów centralnego ogrzewania, przygotowania ciepłej wody użytkowej i chłodzenia pomieszczeń. W artykule zawarto wyniki symulacji dynamicznej przeprowadzonej w programie Polysun, dotyczącej określenia i porównania parametrów instalacji grzewczo-chłodzącej z parametrami pracy instalacji grzewczej zastosowanych w nisko-energetycznym domu jednorodzinnym. Symulacja wykazała, że dla domu o niskim zapotrzebowaniu na energię dolne źródło pompy ciepła jest wystarczające do utrzymania odpowiedniej temperatury w budynku w okresie letnim. Dodatkowo wykazano, że wykorzystanie chłodzenia pasywnego pozytywnie wpływa na stan dolnego źródła ciepła w dłuższej perspektywie czasowej. W instalacji grzewczo-chłodzącej, współczynnik sezonowej efektywności pompy ciepła jest wyższy, w porównaniu z instalacją służącą tylko na cele grzewcze, szczególnie wyraźnie jest to zauważalne w okresie letnim, gdy następuje zrzut energii z chłodzenia budynku do gruntu, a pompa ciepła przygotowuje wyłącznie ciepłą wodę użytkową.

SŁOWA KLUCZOWE

Pompa ciepła, chłodzenie pasywne, symulacja energetyczna

* * *

Recenzował mgr inż. Marek Hajto

Artykuł wpłynął do Redakcji 11.08.2011 r., zaakceptowano do druku 16.08.2011 r.

WPROWADZENIE

Obecnie w Polsce następuje powolny rozwój rynku pomp ciepła. Wpływ na to ma m.in. wielorakość zastosowań tych urządzeń. Pompa ciepła może spełniać trzy funkcje: oprócz ogrzewania pomieszczeń (co) i ogrzewania wody użytkowej (cwu), może również chłodzić. Ta wielorakość zastosowań pozwala, pomimo większych kosztów inwestycyjnych w porównaniu z instalacją grzewczą opartą na kotłach, zaoszczędzić na instalacji klimatyzacyjnej, która obecnie staje się coraz popularniejsza nawet w jednorodzinnych budynkach mieszkalnych.

Gruntowe pompy ciepła mogą wykorzystywać dwa typy dolnych źródeł ciepła – kolektor poziomy oraz otworowy wymiennik ciepła. Kolektor poziomy odbiera ciepło z gruntu za pomocą poziomych rur ułożonych poniżej strefy przemarzania. Kolektor taki jest regenerowany ciepłem słonecznym ogrzewającym jego powierzchnię, a także wodami opadowymi infiltrującymi w głąb gruntu. Górne warstwy gruntu mają jednak spore sezonowe wahania temperatury, które dodatkowo zakłócają się poprzez odbiór ciepła przez pompę ciepła. W polskich warunkach klimatycznych temperatura na głębokości 2 m waha się od 7°C w lutym do 13°C w sierpniu (Viessmann 2008).

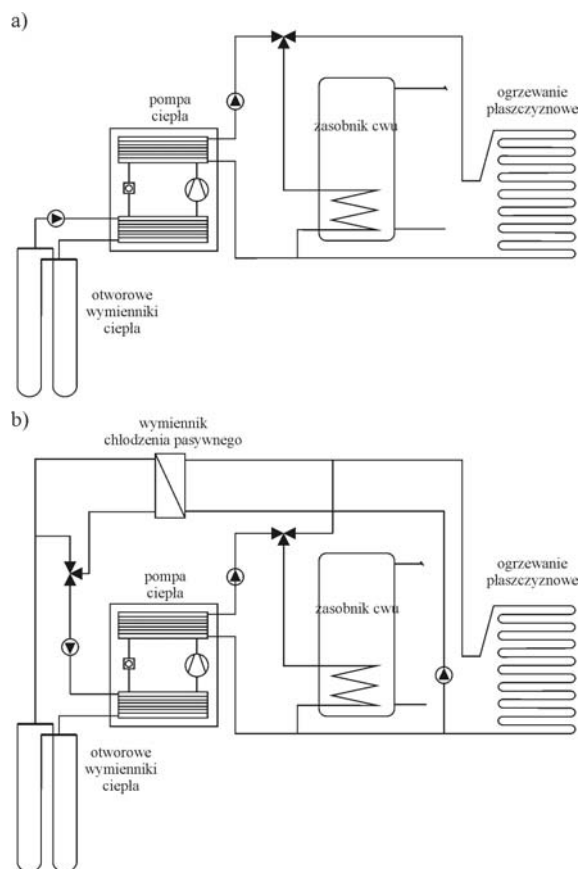
Drugą możliwością pozyskiwania ciepła z gruntu jest wykorzystanie otworowego wymiennika ciepła. Ciepło w tym typie dolnego źródła odbierane jest za pomocą U-rurki (lub podwójnej U-rurki, rur umieszczonych koncentrycznie itp.) umieszczonej w otworze wypełnionym gruntem rodzimym bądź odpowiednim materiałem przewodzącym ciepło. Poniżej strefy termicznie neutralnej (w Polsce ok. 18–20 m p.p.t. (Plewa 1994)) temperatura w zakresie sezonowym zaczyna się stabilizować i wynosi około 10°C, rosnąc na każde 100 metrów o około 3°C. Otworowe wymienniki ciepła oparte na rurach polietylenowych rzadko mają głębokości większe niż 200 metrów.

Ogrzewanie budynku i przygotowanie ciepłej wody może odbywać się zarówno za pomocą pomp ciepła z kolektorem poziomym, jak i z otworowym wymiennikiem ciepła. W przypadku chłodzenia budynków, jedynie otworowy wymiennik ciepła może zostać wykorzystany. W przypadku kolektora poziomego ciepło pochodzące z układów chłodzenia może przesuszyć grunt, a w skrajnym przypadku doprowadzić nawet do zamarcia w nim życia (Dimplex 2006). Dodatkowo moc chłodnicza układu będzie spadać wraz ze wzrostem temperatury gruntu, który w tej sytuacji nastąpi dość szybko.

W przypadku instalacji pompy ciepła z otworowym wymiennikiem ciepła możliwa jest realizacja chłodzenia budynku. Można wyróżnić dwa systemy chłodzenia z wykorzystaniem otworowych wymienników ciepła (OWC): system aktywny oraz system pasywny. Aktywny system chłodzenia wykorzystuje sprężarkę i jest realizowany w podobny sposób jak ogrzewanie, z tym, że ulegają zamianie źródła ciepła (górne źródło staje się dolnym, dolne – górnym). Pasywny system chłodzenia nie wykorzystuje sprężarki pompy ciepła. Poprzez specjalnie dobudowany wymiennik ciepła ciecz z instalacji grzewczej budynku (np. w postaci ogrzewania płaszczyznowego) oddaje ciepło z budynku do cieczy dolnego źródła ciepła. Z urządzeń elektrycznych pracują jedynie pompy górnego i dolnego źródła ciepła.

W sytuacji dużego zapotrzebowania na chłód w budynku, chłodzenie pasywne – szczególnie późnym latem – może okazać się niewystarczające do uzyskania właściwej temperatury wewnątrz. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie chłodzenia aktywnego, bądź też użycie innego dodatkowego systemu chłodzenia.

W artykule określono różnice w parametrach pracy instalacji grzewczej, porównując instalację pracującą tylko na cele cwu do instalacji z dodatkowo wbudowanym modulem pasywnego chłodzenia. W związku z tym w programie Polysun (Vela Solaris 2011) wykonano symulację energetyczną dla instalacji grzewczo-chłodzącej z gruntową pompą ciepła w trybie ogrzewania i chłodzenia pasywnego. Dla instalacji pracującej tylko na cele grzewcze schemat instalacji jest przedstawiony na rysunku 1a, zaś dla instalacji grzewczo-chłodzącej z pasywnym chłodzeniem schemat jest przedstawiony na rysunku 1b.



Rys. 1. Schematy instalacji grzewczej z pompą ciepła

a) w trybie ogrzewania i przygotowania cwu, b) w trybie ogrzewania, przygotowania cwu i chłodzenia pasywnego

Fig. 1. Diagrams of the heating installation with heat pump

a) mode of central heating and domestic hot water, b) mode of central heating, domestic hot water and passive cooling

Dla celów artykułu określono lokalizację rozpatrywanej instalacji w podkrakowskiej miejscowości Miękinia.

1. BUDOWA GEOLOGICZNA I TEKTONICZNA W REJONIE PROJEKTOWANEJ INSTALACJI

W celu określenia parametrów odbioru ciepła z gruntu przeanalizowano warunki geologiczne dla rejonu Miękinia, położonej w gminie Krzeszowice, nad potokiem Miękinia, na południowo-zachodnim zboczu Doliny Miękinia oraz na wschodnim stoku Miękińskiej Góry. Z geologicznego punktu widzenia rejon Miękinia położony jest w obrębie monokliny śląsko-krakowskiej, której geneza związana jest z laramijskimi ruchami górotwórczymi, mającymi miejsce na przełomie kredy i trzeciorzędu (Gradziński 1972).

W budowie tektonicznej obszaru badań można wyróżnić antyklinę Miękinia, która jest jednostką tektoniczną wieku waryscyjskiego. Zbudowana jest ona z osadów karbonu ze strefy brzeżnej (warstwy malinowickie, sarnowskie, florkowskie), wypiętrzonych antyklinalnie na kontakcie z antykliną Dębника. Z kolei jednostką tektoniczną wieku mioceńskiego na analizowanym obszarze stanowi płyta ojcowiska, która graniczy bezpośrednio z rowem krzeszowickim.

Najstarszymi skałami odsłaniającymi się na powierzchni terenu w rejonie Miękinia są osady środkowego dewonu (żywetu), reprezentowane przez dolomity ze Zbrzy, przechodzące ku górze w wapienie dębnickie. W bezpośrednim sąsiedztwie Miękinia odsłaniają się utwory permu i karbonu. Najstarszym przejawem wulkanizmu jaki towarzyszył orogenezie waryscyjskiej jest występujący wśród osadów górnokarbońskich diabaz z Niedźwiedziej Góry. Główna masa wylewów porfirowych (Miękinia) i melafirowych (Rudno, Alwernia–Regulice), a także towarzyszących im piroklastyków porfirowych (Filipowice–Karniowice) i melafirowych (Alwernia–Regulice), zalega na permskim zlepińcu myślachowickim lub też jest nim przewarstwiona (Malczewski i in. 2006).

W Miękinia znajduje się kamieniołom z dolnopermskimi porfirami zalegającymi bezpośrednio na górnokarbońskich łupkach miękińskich i częściowo na zlepińcach myślachowickich (Górecki, Kuczera, Szwed 2006), a przykrytymi przez transgresyjne osady dolnego triasu. Kamieniołom ten obecnie nieczynny (od 1979 r.), a znany od XVII w. stanowi jedno z ciekawszych świadectw górnictwa skalnego na Ziemi Krzeszowickiej. Wydobycie czerwonej odmiany porfiru dolnopermskiego w Miękinia rozpoczęto w 1852 r. (Płonczyński, Łopusiński 1993).

Profil geologiczno-litostratygraficzny – wynikający z projektu prac geologicznych dla instalacji grzewczej w Laboratorium Edukacyjno-Badawczym Odnawialnych Źródeł i Poszanowania Energii AGH w Miękinia – gmina Krzeszowice (Bielec 2010) – określa, że do głębokości 8 m p.p.t. występuje nasyp zbudowany z rumoszu porfirowego, przemieszanego z gliną i innymi osadami czwartorzędowymi. Od 8 do 12 m p.p.t. występuje przewarstwienie porfiru ryodacytowego, następnie od 12 do 100 m p.p.t. występują utwory karbońskie

w postaci warstw malinowickich (od 12 do 40 m p.p.t. w postaci iłowców i mułowców z niewielkimi wkładkami piaskowców, od 40 do 100 m p.p.t. w postaci spękanych piaskowców z wkładkami iłowców i mułowców). Zwierciadło wód gruntowych znajduje się na głębokości 40 m p.p.t.

2. ZAŁOŻENIA WARUNKÓW BRZEGOWYCH DLA OBLICZEŃ EFEKTYWNOŚCI PRACY INSTALACJI Z POMPĄ CIEPŁA

Obliczenia przeprowadzono dla niskoenergetycznego budynku o powierzchni 150 m², w którym zapotrzebowanie na energię ogrzewania wynosi 31,5 kWh/rok, zaś wskaźnik zapotrzebowania na moc wynosi 37 W/m². Zapotrzebowanie na moc grzewczą budynku obliczono na 5,55 kW. Założono, że budynek jest wyposażony w instalację ogrzewania podłogowego o parametrach pracy 35/27 °C, zaś ciepła woda przygotowywana w ilości średnio 200 l/dobę ma temperaturę 50°C.

Moc chłodnicza dla dolnego źródła ciepła – przy założeniu, że współczynnik SPF jest równy 3,8 – powinna wynosić 4,05 kW. W celu oszacowania całkowitej długości otworowego wymiennik ciepła należy oszacować parametry przewodzenia ciepła gruntu rozpatrywanego obszaru.

Biorąc pod uwagę wytyczne normy VDI 4640 część 1 przyjęto współczynniki przewodzenia ciepła i pojemności cieplne poszczególnych warstw, jak w tabeli 1.

Tabela 1

Współczynniki przewodzenia ciepła i właściwe pojemności cieplne dla poszczególnych warstw (na podstawie VDI 4640, część 1)

Table 1

Coefficients of thermal conductivity and heat capacity for each layer (based on standard VDI 4640, part 1)

| Warstwa | Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m K] | Właściwa pojemność cieplna [J/kg K] |
|---|--|-------------------------------------|
| Nasyp z rumoszu porfirowego przemieszany z gliną | 1,2 | 800 |
| Porfir ryodacytowy | 2,6 | 840 |
| Iłowce i mułowce z niewielkimi wkładkami piaskowców | 2,2 | 960 |
| Piaskowce z wkładkami iłowców i mułowców | 2,8 | 1 085 |

Dla zapotrzebowania na moc grzewczą 5,5 kW dobrano pompę ciepła o takiej samej mocy, przy parametrach pracy B0/W35. Współczynnik wydajności cieplnej (COP) dla tych parametrów wynosi 4,4.

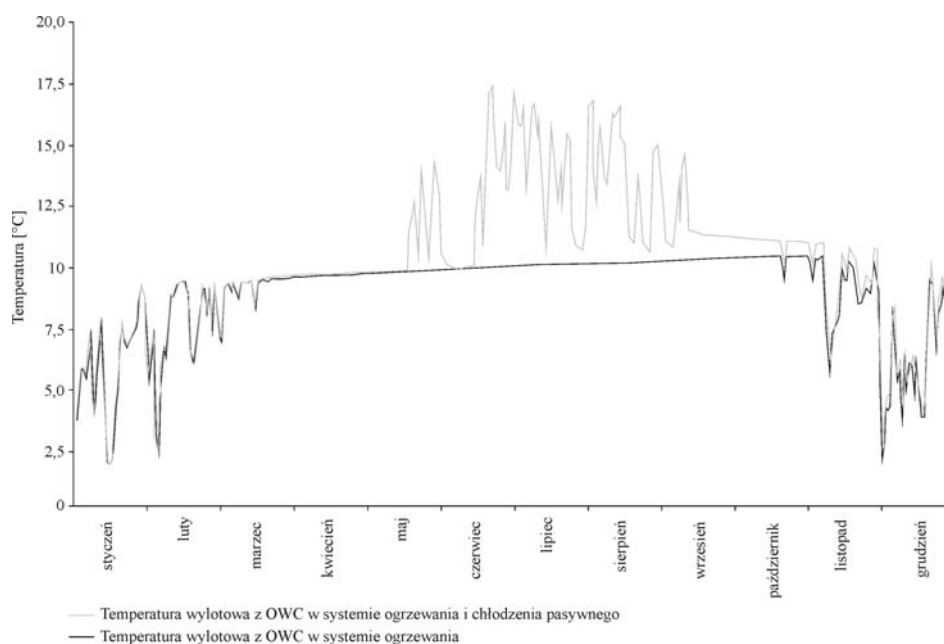
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykonano porównanie parametrów dla dwóch przypadków: instalacji OWC pracującej tylko na potrzeby ogrzewania budynku i przygotowania cwu oraz w drugim przypadku na potrzeby ogrzewania, przygotowania cwu i chłodzenia pasywnego budynku w okresie letnim. Biorąc pod uwagę usytuowanie i charakterystykę techniczną budynku przeprowadzono symulację temperatury wewnętrznej, zarówno w przypadku tylko ogrzewania oraz w przypadku ogrzewania i chłodzenia. Symulacja wykazała, że wykorzystanie instalacji OWC na potrzeby chłodzenia jest wystarczające, przy założeniu, że w lecie temperatura będzie utrzymywana na poziomie nie wyższym niż 24°C (dla przypadku, w którym pasywne chłodzenie nie jest wykorzystywane symulacja wykazała, że temperatura wewnątrz budynku w najgorętszym okresie wzrasta do ponad 28°C). Porównanie średniorocznej temperatury wylotowej glikolu z otworowego wymiennika ciepła wykazało, że dla instalacji pracującej tylko w trybie grzania wyniosła ona 8,8°C, przy wartości minimalnej -0,4°C i maksymalnej 10,4°C, zaś dla instalacji pracującej w trybie grzania i chłodzenia pasywnego wyniosła ona 9,9°C, przy wartości minimalnej -0,2°C i maksymalnej 19,1°C. Rozkład średniodobowych temperatur solanki wpływającej z OWC przedstawia rycina 2. Analizując średniodzienny rozkład temperatur dla omawianych przypadków, w okresie letnim w przypadku instalacji grzewczo-chłodzącej wzrost temperatury wylotowej z OWC jest znaczący. Na wykresie zauważalne jest również niewielkie przesunięcie pików, w kierunku wyższych temperatur, w stosunku do wykresu obrazującego pompę ciepła pracującą tylko na cele grzewcze.

Czas pracy pompy ciepła pracującej w instalacji grzewczo-chłodzącej jest nieznacznie mniejszy w porównaniu do czasu pracy sprężarki w pompie ciepła pracującej tylko na potrzeby grzewcze (1542 godzin dla instalacji grzewczo-chłodzącej do 1563 godzin dla instalacji grzewczej). Można zatem stwierdzić, że przyjęty wstępnie czas pracy instalacji 2400 godzin (zgodnie z normą VDI 4640 dla instalacji pracujących na cele co i cwu) został przeszacowany – jest to spowodowane faktem, że symulację wykonano dla budynku niskoenergetycznego, który w porównaniu z budynkiem standardowym ma niższe zapotrzebowanie na ciepło.

Wykonane obliczenia obrazują, jak zmieniają się powyżej przedstawione temperatury po 10 latach eksploatacji instalacji. Dla instalacji grzewczej pracującej tylko w trybie ogrzewania średnioroczna temperatura wylotowa wyniosła 8,4°C, przy wartości minimalnej -0,9°C i maksymalnej 10°C. Spadek temperatury dolnego źródła nie jest znaczny, co może świadczyć o odpowiednio dobranej długości OWC w istniejących warunkach geologicznych. Współczynnik sezonowej efektywności pompy ciepła SPF zmalał z 4,13 do 4,07. W przypadku instalacji pracującej w trybie ogrzewania i chłodzenia pasywnego po 10 latach również zauważono spadek parametrów dolnego źródła, ale był on jeszcze mniejszy niż w przypadku instalacji pracującej tylko w trybie grzewczym: średnioroczna temperatura wylotowa wyniosła 9,8°C, przy wartości minimalnej -0,6°C i maksymalnej 18,9°C. W skali dziesięciu lat sezonowy współczynnik efektywności zmalał z 4,16 do 4,14.

Na podstawie powyższych wartości można stwierdzić, że moc chłodnicza gruntu, pomimo, że do wstępnego zwymiarowania dolnego źródła przyjęto SPF równy 3,8, zamiast



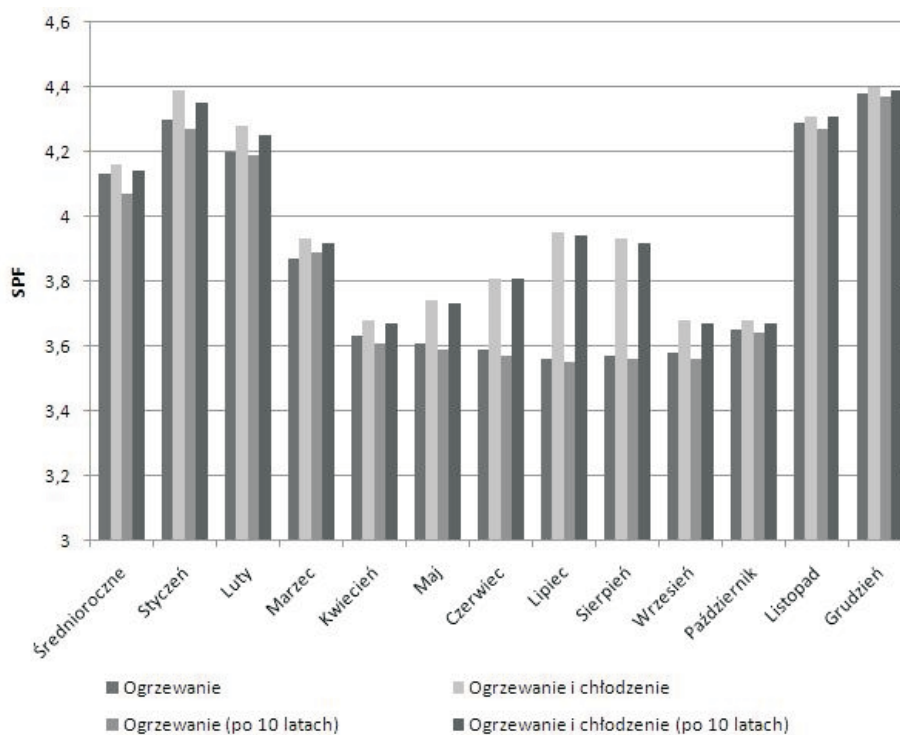
Rys. 2. Rozkład średniodobowych temperatur solanki wypływającej z OWC dla trybów pracy: ogrzewania i ogrzewania z chłodzeniem pasywnym w pierwszym roku eksploatacji

Fig. 2. Distribution of daily average temperature of brine flowing out of the BHE for two modes: heating system only and heating with passive cooling in the first year of operation

rzeczywistego na poziomie około 4,1, jest wystarczająca zarówno do ogrzewania, jak i do przyjmowania ciepła z pomieszczeń w trakcie gorących dni. Powyższe obliczenia dowodzą, że w przypadku budynków niskoenergetycznych chłodzenie pasywne jest wystarczającą formą obniżenia temperatury wewnątrz budynków.

Zestawienie miesięczne współczynników sezonowej efektywności pompy ciepła SPF przedstawiono na rysunku 3. Można zauważyć, że dla pomp ciepła pracujących tylko w trybie ogrzewania SPF znacząco maleje w miesiącach letnich. Jest to oczywiście spowodowane podgrzewaniem ciepłej wody użytkowej do temperatury 50°C, przez co w porównaniu z okresem zimowym, gdy w produkcji energii dominuje ciepło do ogrzewania o parametrze zasilania 35°C, wzrasta różnica temperatur pomiędzy dolnym i górnym źródłem ciepła, czego następstwem jest spadek SPF. W przypadku użytkowania instalacji grzewczej również na potrzeby chłodzenia pasywnego spadek wielkości współczynnika SPF nie jest aż tak znaczący – ze względu na zrzucanie ciepła do otworowych wymienników ciepła, podnosi się znacząco temperatura gruntu, przez co różnica temperatur pomiędzy dolnym i górnym źródłem ciepła jest niższa niż w przypadku instalacji działającej wyłącznie na cele grzewcze. Wielkość współczynnika SPF ma wpływ na czas pracy sprężarki, a co za tym idzie najkrótszy czas pracy sprężarki, tj. 2024,9 godziny ma instalacja działająca w pierwszym roku eksploatacji dla ogrzewania i chłodzenia pasywnego, zaś najdłuższy instalacja działająca tylko na potrzeby grzewcze w dziesiątym roku eksploatacji – 2063 godziny.

Spadek współczynnika SPF w trakcie użytkowania instalacji grzewczo-chłodzącej świadczy, że pobieranie energii z gruntu i jej wprowadzanie do gruntu nie jest zbilansowane. Symulacja wykazała, że z dolnego źródła rocznie jest pobierane 6562 kWh, zaś odprowadzane do gruntu jest 3261 kWh. Można zatem stwierdzić, że zbilansowanie dolnego źródła jest częściowe. Jednak zmniejsza nieco spadek średniorocznego SPF, zaś w okresie letnim wzrasta dzięki temu znacznie efektywność przygotowania cwu (rys. 3).



Rys. 3. Średniomiesięczny współczynnik sezonowej efektywności pompy ciepła dla pracy pompy ciepła tylko na cele grzewcze oraz na cele grzewcze i pasywnego chłodzenia (w pierwszym i dziesiątym roku eksploatacji instalacji)

Fig. 3. Average monthly seasonal performance factor for heat pump working for heating purposes only, and for heating and passive cooling (in the first and in the tenth year of operation))

PODSUMOWANIE

Jak wykazała symulacja energetyczna przeprowadzona na przykładzie budynku nisko-energetycznego, zastosowanie chłodzenia pasywnego pozytywnie wpływa na efektywność instalacji. Dodatkowo, bezsprzeczne jest, że chłodzenie pomieszczeń latem pozytywnie wpływa na komfort ich użytkowania. W rozpatrywanym przypadku chłodzenie pasywne jest wystarczające w celu zapewnienia temperatury nie wyższej niż 24°C. Zrzut nadmiaru energii

z budynku do gruntu powoduje znaczny wzrost efektywności przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz nieznacznie przyczynia się do podniesienia sezonowej efektywności całego systemu. Dla omawianego przypadku zbilansowanie eksploatacji i zrzutu energii jest częściowe, ale to już pozwala na zmniejszenie spadku SPF w przeciągu dziesięciu lat eksploatacji.

LITERATURA

- BIELEC B., 2010 — Projekt prac geologicznych na wykonanie w utworach karbonu odwiertów (kolektorów pionowych) stanowiących dolne źródło energii dla pompy ciepła na działce nr 1311/7 w Miękini, gm. Krzeszowice dla potrzeb Ośrodka Szkoleniowo-Dydaktycznego Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej. Arch. AGH WGGiOŚ KSE, Kraków.
- Dimplex, 2006 — Podręcznik projektowania. Ogrzewanie i chłodzenie pompą ciepła.
- GRADZIŃSKI R., 1972 — Przewodnik geologiczny po okolicach Krakowa. Wydawnictwa Geologiczne.
- GÓRECKI J., KUCZERA M., SZWED E., 2006 — Koncepcja zagospodarowania terenów poeksploatacyjnych w otoczeniu kamieniołomu porfiru w Miękini koło Krzeszowic. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 117.
- MALCZEWSKI D., BADERA J., LIZUSEK G., MIRKOWSKI Z., DORDA J., 2006 — Promieniotwórczość naturalna skał paleozoicznych z rejonu Krzeszowic. Przegląd Geologiczny vol. 54, nr 9.
- PLEWA S., 1994 — Rozkład parametrów geotermalnych na terenie Polski. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- PŁONCZYŃSKI J., ŁOPUSIŃSKI L., 1993 — Mapa geologiczna Polski. Arkusz Krzeszowice, skala 1:50 000. Państwowe Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- PŁONCZYŃSKI J., ŁOPUSIŃSKI L., 1993 — Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski. Arkusz Krzeszowice, skala 1:50 000. Państwowe Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Vela Solaris, 2011 — Polysun Simulation Software. User Manual.
- Viessmann, 2008 — Zeszyty fachowe: Pompy ciepła.
- VDI4640, 2000 — Thermal use of the underground: Fundamentals, approvals, environmental aspects.

THE ANALYSIS OF PARAMETERS OF HEATING – COOLING INSTALLATION WITH GROUND SOURCE HEAT PUMP IN HEATING AND PASSIVE COOLING MODE

Abstract

In recent years a growing interest in heat pumps has been observed, especially in ground source heat pumps. They give possibility to create one, integrated installation to cover demands for domestic hot water, central heating

and cooling the buildings. The paper contains results of the dynamic simulation made in Polysun software. The simulation defines and compares the parameters of heating - cooling installation to heating installation. The comparison was made for low-energy house installations. It shows that ground source is sufficient to cover the demand of low-energy house during the summer time. The paper also shows that passive cooling positively affects the ground source in the long term. In the heating - cooling installation the seasonal performance factor of heat pump is higher than seasonal performance factor in the installation working only to cover demand for central heating in the winter time. This is particularly evident in summer when the excess energy of the building is accumulated in the ground source and the heat pumps work only to cover demand for domestic hot water.

Key words

Heat pump, passive cooling, energetic simulation