

LIPNICKI ZYGMUNT*, PĄZIK RAFAŁ**

ANALIZA PORÓWNAWCZA SPRĘŻARKOWEGO UKŁADU CHŁODNICZEGO WSPÓLPRACUJĄCEGO Z ODWIERTEM I UKŁADU CHŁODZONEGO POWIETRZEM ZEWNĘTRZNYM

Streszczenie

Celem pracy jest porównanie sprężarkowego układu chłodniczego współpracującego z odwiertem w gruncie do układu, gdzie odbiornikiem ciepła jest otoczenie zewnętrzne oraz wskazanie – jak korzystne może być wykorzystanie gruntu, dla upustu ciepła. Przedstawiona przykładowa analiza dotyczy alternatywnej możliwości wykorzystania odwiertu geotermalnego, jako źródła chłodu.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, chłodzenie, odwiert

WSTĘP

W obecnych czasach chłodzenie obiektów staje się coraz popularniejsze. Najczęściej stosowanym odbiornikiem ciepła w takich układach jest otoczenie zewnętrzne. Układ chłodzenia może być wykorzystany, między innymi, do przygotowania „wody lodowej” stosowanej w układach klimatyzacyjnych. Zarówno termodynamiczna analiza pracy jak i analiza ekonomiczna, tego typu rozwiązania jest również bardzo istotna. Literatura w tym zakresie jest dość bogata [Ulrich 1999, Kalinowski i in. 2000, Gutkowski i Butrymowicz 2006, Pązik i in. 2009, Pązik i Lipnicki 2009].

Koszty eksploatacji układów klimatyzacyjnych i chłodniczych powinny być możliwie jak najniższe, co bezpośrednio wynika ze sprawności układu chłodniczego. Niska sprawność układu to wzrost zapotrzebowania na energię potrzebną do klimatyzacji. Powoduje to wzrost zużycia dodatkowej energii, której produkcja w znacznym stopniu oparta jest na wykorzystywaniu wyczerpywanych i nieodnawialnych zasobów przyrody, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz

* Instytut Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego

** Doktorant Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Uniwersytetu Zielonogórskiego

ziemny. Aby wzrastające zapotrzebowanie na chłód nie powodowało dodatkowego zużycia zasobów naturalnych można wykorzystywać do tego celu geotermalną energię odnawialną. Znanym sposobem jej użycia jest wykorzystanie pionowych sond i odwiertów jako upustów ciepła.

W stosowanych obecnie układach chłodniczych najczęściej odbiornikiem ciepła jest otoczenie, które latem ma temperatury w ciągu dnia przewyższające 25°C, a nawet 30°C. Ma to wpływ na określone warunki pracy i sprawność układu. Ponadto wykorzystywanie pomp ciepła dla pracy odwróconej celem naturalnego chłodzenia tzw. „natural cooling”, nie daje efektów porównywalnych ze standardowymi instalacjami wody lodowej 10.

Z dotychczas przeprowadzonych pomiarów geologicznych wynika, że w strefie umiarkowanej do której należy np. teren Polski, na głębokości 1÷4 m w ciągu całego roku panuje stała temperatura $+10\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (7). W miarę wzrostu głębokości grunt jest coraz cieplejszy. Temperatura wzrasta średnio o 1°C na każde 33÷50 m głębokości. W związku z powyższym na głębokościach ok. 100 - 200 m, na jakich lokalizuje się pionowe sondy 7, panuje temperatura w przybliżeniu stała i wynosi ona ok. 12 -17°C. Na wydajność układu ma duży wpływ również wilgotność i porowatość gruntu wpływające na jego przewodność.

„Darmowa” energia chłodu, jaką jest upust ciepła do gruntu czyni ją bardzo przydatną. Z tego też powodu, zastosowanie odwiertu jako upustu ciepła jest celowe.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem niniejszego artykułu jest porównanie pracy układu chłodzenia współpracującego z odwiertem geotermalnym, jako odbiornikiem ciepła, do najczęściej stosowanego układu chłodzonego powietrzem zewnętrznym oraz wskazanie, na podstawie analizy, jak bardzo korzystne może być wykorzystanie gruntu do upustu ciepła.

Ciepło pobrane z obiektu chłodzonego będzie odprowadzane do gruntu poprzez sondę ciepła. Analiza dotyczy upustu ciepła z chłodzonego obiektu do gruntu o mocy chłodzenia 20 kW.

METODYKA

Założenia ogólne

Alternatywnym źródłem chłodu do układu chłodzonego powietrzem, jest grunt otaczający odwiert. Sprężarkowy układ chłodzenia transportuje czynnik syntetyczny R717 (amoniak) przenoszący ciepło z górnego źródła: obiektu

chłodzonego – do dolnego źródła: gruntu. Odbiornikiem ciepła jest odwiert o głębokości 100 m z przepływem koncentrycznym (pierścieniowym, typu „rura w rurze”) płynu (np. wody w przypadku wykorzystania odwiertu tylko, jako upustu ciepła lub roztworu glikolu dla pracy przemiennej letnio -zimowej odwiertu) przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej. W analizie układu chłodniczego przyjęto płyn, jakim jest ergolid EKO 18%. Temperatura zasilania zatłaczanego płynu wynosi 20°C, a powrotu 16°C. Natomiast parametry wody lodowej w instalacji chłodzenia w obiekcie przyjmuje się na doprowadzeniu i odprowadzeniu z klimatyzatora równe 7/12°C. Umożliwia to pracę układu sprężarkowego w temperaturze skraplania $t_s = 26^\circ\text{C}$, dającej wysoki współczynnik efektywności i pracę w przyjętej temperaturze parowania $t_p = 2^\circ\text{C}$. Przyjęte wartości głębokości odwiertu i temperatury panujące w układzie, założono na podstawie literatury fachowej [Sevec 1987, Zalewski 2001, Kujawa i in. 2006, Rubik 2006].

Ilość ciepła oddawanego do odwiertu i następnie do gruntu zależna jest od temperatury płynu zatłaczanego do odwiertu, a więc różnicy temperatur między temperaturą gruntu i płynu przepływającego w odwiercie.

Założenia szczegółowe

Badania obejmowały wykonanie obliczeń obiegu termodynamicznego i efektywności odbioru ciepła przez grunt i przez otoczenie w okresie letnim (cykl chłodzenia) dla założonych wg tabeli 1 i 2 parametrów temperaturowych. Parametry do obliczeń dla obiegu oddającego ciepło do gruntu przedstawiono w tabeli 1, natomiast dla obiegu oddającego ciepło do otoczenia zewnętrznego w tabeli 2.

Tab. 1 Temperatura czynnika chłodniczego, wody i ergolidu EKO- grunt jako odbiornik ciepła

Tab. 1 Temperature of refrigerant, water and ergolid ECO- the ground as a heat sink

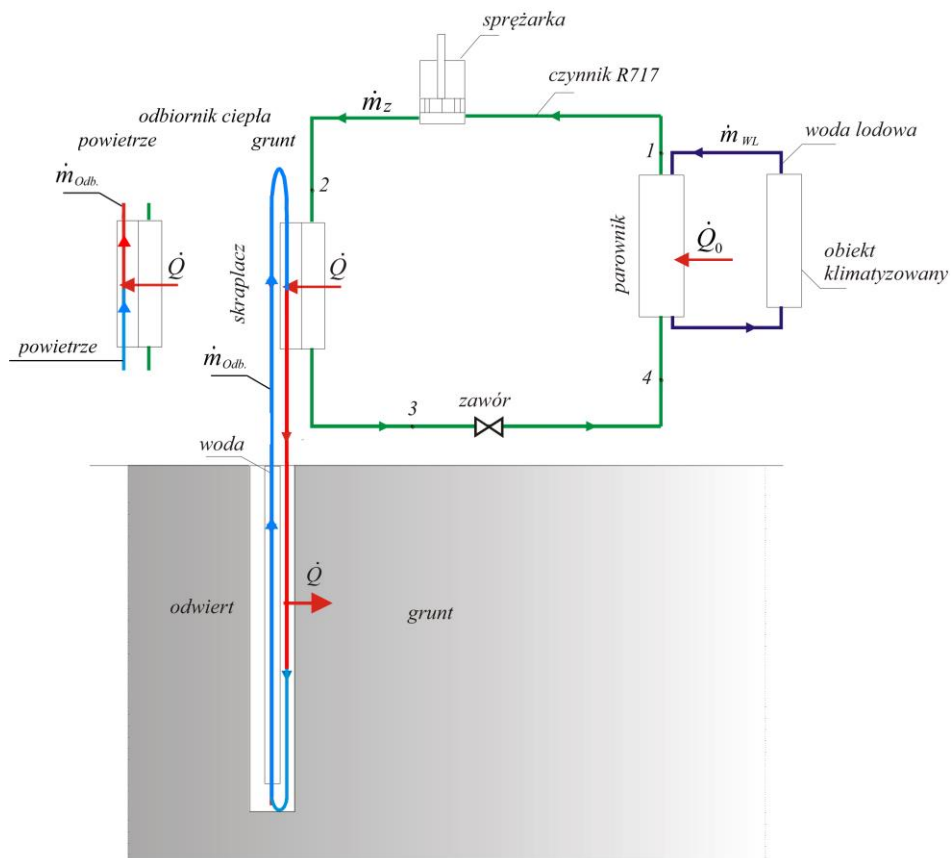
Parownik - temperatura czynnika	Parownik - temperatura wody	Skraplacz - temperatura czynnika	Skraplacz - temperatura ergolidu
$T_p = 2^\circ\text{C}$	$T_{Z(WL)} = 12^\circ\text{C}$	$T_s = 58^\circ\text{C}$	$T_{Zodb} = 16^\circ\text{C}$
$T_p = 2^\circ\text{C}$	$T_{P(WL)} = 7^\circ\text{C}$	$T_s = 26^\circ\text{C}$	$T_{Podb} = 20^\circ\text{C}$

Do analizy porównawczej wybrano czynnik niskowrzący amoniak R717 (w obiegu sprężarki), wodę lodową (w obiegu obiektu chłodzonego) i roztwór glikolu – ergolid EKO 18% (w obiegu odbiornika ciepła, jako gruntu) lub dla porównania -powietrze zewnętrzne (w obiegu odbiornika ciepła, jako otoczenie).

Tab. 2 Temperatury czynnika chłodniczego, wody i powietrza – otoczenie, jako odbiornik ciepła

Tab. 2 Temperature of refrigerant and water - the air as a heat sink

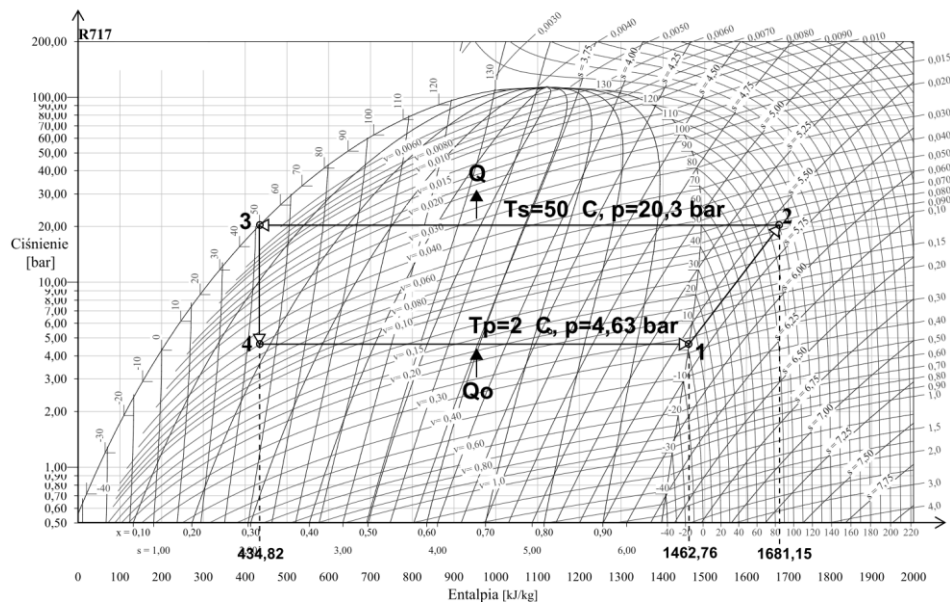
Parownik - temperatura czynnika	Parownik - temperatura wody	Skrapłacz - temperatura czynnika	Skrapłacz - temperatura powietrza
$T_P = 2\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{Z(WL)} = 12\text{ }^\circ\text{C}$	$T_S = 110\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{Zodb} = 35\text{ }^\circ\text{C}$
$T_P = 2\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{P(WL)} = 7\text{ }^\circ\text{C}$	$T_S = 50\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{Podb} = 45\text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 1. Schemat układu chłodniczego współpracującego z gruntem i otoczeniem
 Fig. 1. Scheme of cooling system cooperating with the ground and environment

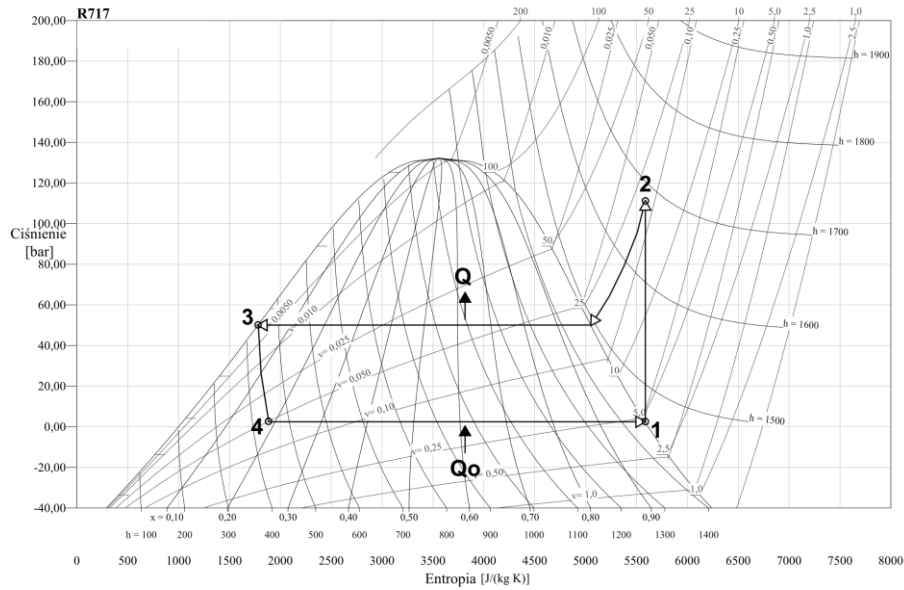
Schemat układu sprężarkowego chłodniczego pokazano na rysunku 1, a odpowiadający mu obieg termodynamiczny w układzie $p - i$ i $T - s$ na rysunkach 2 i 3 dla otoczenia, jako odbiornika oraz na rysunkach 4 i 5 dla gruntu, jako odbiornika.

Działanie układu chłodniczego polega na poborze ciepła \dot{Q}_o w obieku chłodzonym przez czynnik chłodniczy w parowniku (1). Następnie w postaci gazowej jest on sprężany w sprężarce do ciśnienia skraplania i doprowadzany do skraplacza (2), w którym oddaje ciepło skraplania \dot{Q} do płynu przepływającego w odwiercie lub otoczeniu poprzez powietrze. Następnie ciekły czynnik chłodniczy (3) rozpręża się na zaworze dławiącym i wraca do parownika (4).

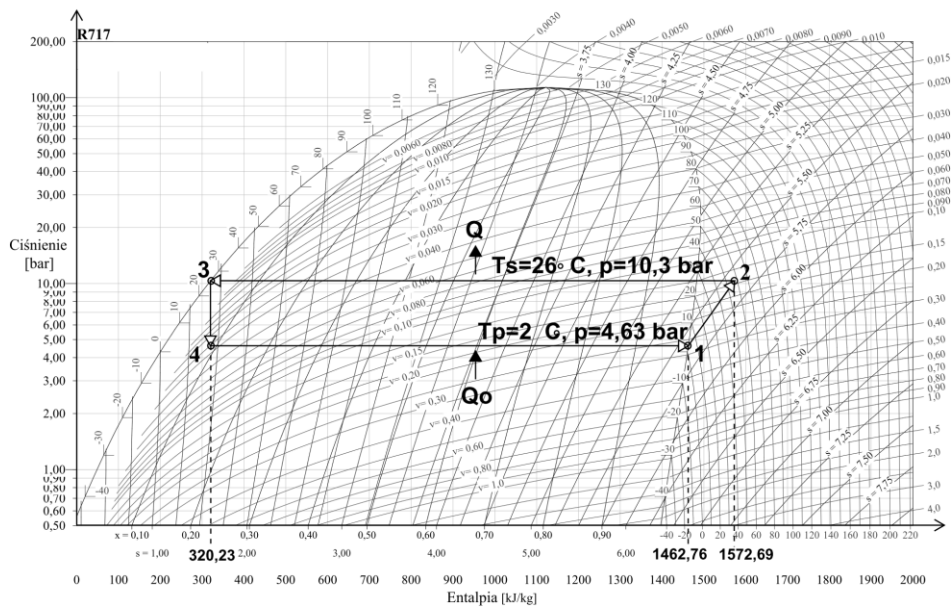


Rys. 2. Obieg termodynamiczny ze skraplaczem chłodzonym powietrzem zewnętrznym w układzie $p - i$

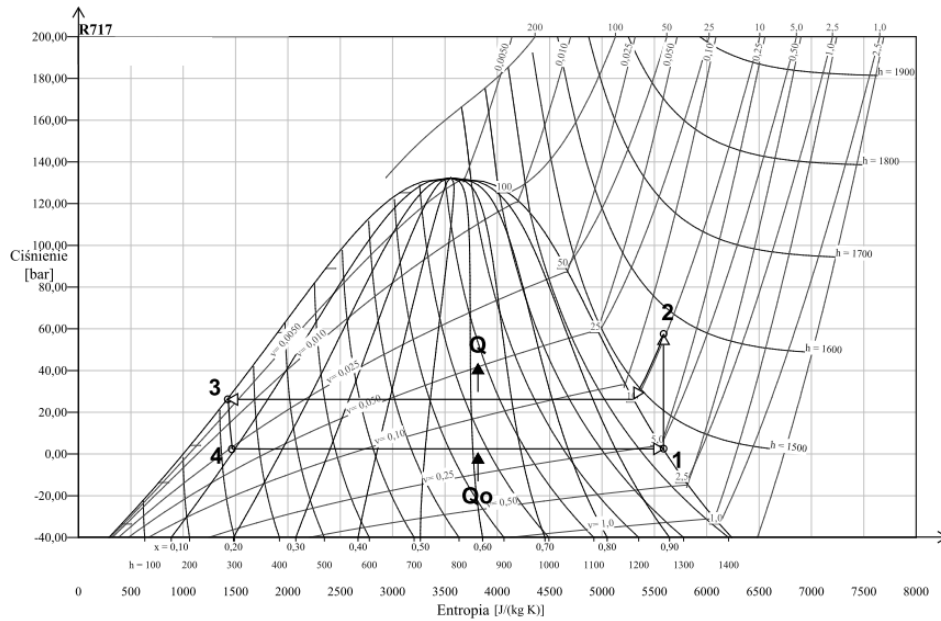
Fig. 2. Thermodynamic cycle with outdoor air-cooled condenser in the $p - i$



Rys. 3. Obieg termodynamiczny ze skraplaczem chłodzonym powietrzem zewnętrznym w układzie $T - s$
 Fig. 3. Thermodynamic cycle with outdoor air-cooled condenser in the $T - s$



Rys. 4. Obieg termodynamiczny ze skraplaczem chłodzonym gruntem w układzie $p - i$
 Fig. 4. Thermodynamic cycle with ground-cooled condenser in the $p - i$



Rys. 5. Obieg termodynamiczny ze skraplaczem chłodzonym gruntem w układzie $T - s$
 Fig. 5. Thermodynamic cycle with ground-cooled condenser in the $T - s$

Obliczenia wykonano w oparciu o wzory:

1. strumień masowy zasysanego przez sprężarkę czynnika roboczego (mając daną moc chłodniczą oraz wartości entalpii):

$$\dot{m}_z = \frac{Q_o}{i_1 - i_4}; \quad (1)$$

2. moc sprężarki

$$N_s = Q_o \cdot \frac{i_2 - i_1}{i_1 - i_4}; \quad (2)$$

3. współczynnik efektywności EER:

$$EER = \frac{Q_o}{N_{sp}}; \quad (3)$$

4. potrzebną moc skraplacza:

$$Q = Q_o + N_{sp}; \quad (4)$$

5. strumień masowy wody lodowej w obiegu chłodzonego obiektu:

$$\dot{m}_{WL} = \frac{\dot{Q}_0}{c \cdot \rho \cdot (T_{Z(WL)} - T_{P(WL)})}; \quad (5)$$

6. strumień masowy ergolidu EKO lub powietrza w obiegu odbiornika ciepła (otoczenia lub gruntu):

$$\dot{m}_{Odb.} = \frac{\dot{Q}}{c \cdot \rho \cdot (T_{POdb.} - T_{ZOdb.})}; \quad (6)$$

7. logarytmiczną różnicę temperatur w parowniku:

$$\Delta T_{\log P} = \frac{(T_{Z(WL)} - T_P) - (T_{P(WL)} - T_P)}{\ln \left(\frac{T_{Z(WL)} - T_P}{T_{P(WL)} - T_P} \right)}; \quad (7)$$

8. logarytmiczną różnicę temperatur w skraplaczu:

$$\Delta T_{\log S} = \frac{(T_S - T_{ZOdb.}) - (T_S - T_{POdb.})}{\ln \left(\frac{T_S - T_{ZOdb.}}{T_S - T_{POdb.}} \right)}; \quad (8)$$

Znając rozkład temperatur w parowniku i skraplaczu, moc chłodniczą parownika oraz strumień ciepła oddawany przez skraplacz do gruntu lub otoczenia, a także przyjmując współczynniki przenikania ciepła: dla parownika $u_p = 3500W/(m^2 \cdot K)$ 7; dla skraplacza chłodzonego powietrzem zewnętrznym $u_{SK} = 60W/(m^2 \cdot K)$ 7 i dla skraplacza chłodzonego gruntem $u_{SK} = 4000W/(m^2 \cdot K)$ 7 obliczono, według poniższych wzorów, powierzchnię parownika

$$F_p = \frac{\dot{Q}_0}{\Delta T_{\log P} \cdot u_p} \quad (9)$$

i powierzchnię skraplacza

$$F_s = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{\log S} \cdot u_s}, \quad (10)$$

WYNIKI BADAŃ

Poniżej zaprezentowano wyniki obliczeń, w których pominięto przechłodzenie czynnika chłodniczego. Założenie to nie ma znaczącego wpływu na końcowy wynik porównawczy.

W tabeli 3 przedstawiono wartości entalpii i ciśnień dla poszczególnych charakterystycznych punktów obiegu dla dwóch rodzajów chłodzenia skraplacza,

Tab. 3 Parametry obiegu

Tab. 3 Cycle parameters

Czynnik chłodniczy	Chłodzenie skraplacza	p_p bar	p_s bar	i_1 kJ/kg	i_2 kJ/kg	i_3 kJ/kg	i_4 kJ/kg
R717	GRUNT	4,63	10,34	1462,76	1572,69	320,23	320,23
R717	POWIETRZE	4,63	20,33	1462,76	1681,15	434,82	320,23

natomiast wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4.

Tab. 4 Wyniki obliczeń

Tab. 4 The results of calculations

Czynnik	Chłodzenie skraplacza	\dot{Q}_0	\dot{Q}	\dot{m}_z	N_{sp}	EER	F_p	\dot{m}_{WL}	F_s	\dot{m}_{odb}
-		kW	kW	kg/s	kW	-	m ²	kg/s	m ²	kg/s
R717	GRUNT	20,0	21,9	0,018	1,92	10,39	0,87	0,96	0,64	1,35
R717	OTOCZENIE	20,0	24,2	0,019	4,25	4,71	0,96	0,96	36,62	2,12

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że zastosowanie odwiertu zmniejsza znacznie koszty eksploatacyjne poprzez ponad dwukrotne zwiększenie współczynnika EER z 4,71 do 10,39. Jest to znaczna poprawa biorąc pod uwagę, że EER=4,71 jest już współczynnikiem bardzo korzystnym i zaliczającym urządzenie do klasy energetycznej A (EER>3,2).

PODSUMOWANIE

Zapotrzebowanie na chłód wciąż wzrasta co powoduje popyt na sprawne rozwiązania techniczne i urządzenia służące do chłodzenia w okresie letnim. Istotne są, obok inwestycyjnych – koszty eksploatacyjne takich urządzeń. Dotychczas najczęściej stosowane są układy chłodzenia z odprowadzaniem nadmiaru ciepła do otoczenia. Wpływa to na wartość współczynnika efektywności takich urządzeń. Wraz z jego wzrostem maleją koszty eksploatacyjne. Ważnym zadaniem jest analiza możliwości zwiększenia tego współczynnika. W tym celu

należy znaleźć odpowiedni odbiornik ciepła. Odbiornikiem takim może być grunt, do którego oddawane jest ono przy pomocy odwiertów. Energia geotermiczna możliwa jest do zastosowania na szeroką skalę w tym także na potrzeby klimatyzacyjne i chłodnicze.

Wykorzystanie pionowego odwiertu w celach chłodniczych jest bardzo korzystnym rozwiązaniem; znacznie zwiększa współczynnik EER instalacji chłodniczej. Na głębokościach ok. 100 m w gruncie panuje stabilna temperatura wynosząca ok 12°C, co stwarza warunki upustu ciepła znacznie korzystniejsze niż do otoczenia zewnętrznego (32-35°C).

Przy takim rozwiązaniu należy pamiętać o stopniowym nagrzewaniu się gruntu wokół odwiertu, jednakże podobnie jak w przypadku pracy pomp ciepła dla celów grzewczych - okres przerwy w pracy będzie stanowił czas na częściową regenerację odwiertu [Nowak i in. 2000]. Czas ten będzie dłuższy niż w przypadku układu pracującego zimą z uwagi na krótszy okres chłodzenia niż grzania.

Wadą analizowanego układu jest duży koszt inwestycyjny. Wykonanie odwiertu dla chłodzenia może przerastać znacznie opłacalność wykorzystania gruntu jako upustu ciepła. Jednakże koszty eksploatacji są bardzo niskie i zdecydowanie należy rozważyć wykorzystanie gruntu do tego celu. Aby wyeliminować wadę związaną z kosztami inwestycyjnymi należy rozpatrywać przedstawione rozwiązanie w połączeniu z zastosowaniem pompy ciepła w celach grzewczych. Oznaczałoby to wykorzystywanie odwiertu naprzemiennie do celów grzewczych i chłodniczych powodując dodatkowo bardzo korzystne zjawisko jakim jest przyspieszona regeneracja ciepła gruntu [Pązik 2013].

Wykorzystanie gruntu do celów chłodniczych jest więc bardzo korzystne. Jednakże należy w tym wypadku dodatkowo rozważyć jego naprzemienną pracę.



Autor jest stypendystą w ramach Poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa

Wykaz skrótów i symboli

\dot{m}_z - strumień czynnika chłodniczego zasysanego przez sprężarkę, kg/s

\dot{m}_{wL} - strumień wody przepływającej w obiegu wody lodowej, kg/s

- $\dot{m}_{odb.}$ - strumień płynu przepływającego w odwiercie lub strumień powietrza przepływający przez skraplacz, kg/s
- N_{sp} - moc sprężarki, kW
- \dot{Q} - ciepło oddawane w skraplaczu, kW
- \dot{Q}_O - moc chłodnicza parownika, kW
- c - ciepło właściwe, $J/(kg \cdot K)$
- F_p - powierzchnia wymiany parownika, m^2
- F_s - powierzchnia wymiany skraplacza, m^2
- i - entalpia właściwa, J/kg
- u_p - współczynnik przenikania ciepła w parowniku, $W/(m^2K)$
- u_s - współczynnik przenikania ciepła w skraplaczu, $W/(m^2K)$
- p_p - ciśnienie parowania czynnika chłodniczego, N/m^2
- p_s - ciśnienie skraplania czynnika chłodniczego, N/m^2
- $T_{Z(WL)}$ - temperatura zasilania wody lodowej, K
- $T_{P(WL)}$ - temperatura powrotu wody lodowej, K
- $T_{ZOdb.}$ - temperatura zasilania czynnika w skraplaczu w odbiorniku ciepła, K
- $T_{POdb.}$ - temperatura powrotu czynnika w skraplaczu w odbiorniku ciepła, K
- T_p - temperatura parowania czynnika chłodniczego, K
- T_s - temperatura skraplania czynnika chłodniczego, K
- EER - współczynnik efektywności układu chłodniczego

LITERATURA

1. Gutkowski K. M., Butrymowicz D. J.: Chłodnictwo i klimatyzacja. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa, 2006.
2. Kalinowski K., Paliwoda A., Bonca Z., Butrymowicz D., Targański W.: „Amoniakalne Urządzenia Chłodnicze T.1 i T.2”, Wydawnictwo MASTA, Gdańsk 2000.
3. Kujawa T., Nowak W., Stachel A. A.: Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy. Energy vol. 31, p. 650–664, 2006.
4. Nowak W., Sobański R., Kabat M., Kujawa T.: Systemy pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000.

5. Pązik R., Krasowski T., Lipnicki Z.: „Analiza współpracy odnawialnych źródeł ciepła z obiegiem silnika cieplnego wykorzystujących niskowrzące czynniki termodynamiczne”, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego. Inżynieria Środowiska.- 2009, nr 136 (16), s. 184-194.
6. Pązik R., Lipnicki Z.: Analiza strumieniowego układu chłodniczego napędzanego energią geotermalną = The analysis of the jet cooling system driving of the heat from ground”, XLI Dni chłodnictwa: konferencja naukowo-techniczna: nowe techniki i technologie w chłodnictwie, klimatyzacji i pompach ciepła obniżające koszty produkcji i eksploatacji urządzeń oraz instalacji. Poznań, Polska, 2009- Poznań: Systherm Chłodnictwo i Klimatyzacja Sp. z o. o., 2009, s. 145-153.
7. Rubik M.: Pompy ciepła Poradnik. Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2006.
8. Sevec O. J.: Potential of ground heat source systems, International Journal of Energy Research, vol. 11, p. 573-581, 1987.
9. Ullrich H. J.: „Technika chłodnicza- poradnik T.1 i T.2”, Wydawnictwo MASTA, Gdańsk 1999.
10. Viesmann 2008: „Pompy ciepła.”, Zeszyty fachowe.
11. Zalewski W.: „Pompy Ciepła Sprężarkowe, Sorpcyjne i termoelektryczne”, Wydawnictwo MASTA, Gdańsk 2001.
12. Pązik R. 2013: „Wykorzystanie odwiertu, jako źródła i upustu ciepła do ogrzewania i chłodzenia” Praca doktorska, Uniwersytet Zielonogórski.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BORE HOLE COOPERATING WITH THE COMPRESOR COOLING SYSTEM AND THE SYSTEM COOLED BY THE OUTSIDE AIR

S u m m a r y

Aim of this study is the compare of the compressor cooling system cooperating with the bore hole and ground to system, where the environment is the heat receiver and to indicate – how profitable could be using a ground as heat sink. Presented a sample analysis concerns the alternative possibility of using the geothermal boreholes as a cooling source.

Key words: heat pumps, cooling, bore- hole