

Maciej MIECZNIK
Instytut Gospodarki Surowcami
Mineralnymi i Energią PAN
Ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków
Tel. (+48 12) 617-16-24,
e-mail: miecznik@min-pan.krakow.pl

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2013

BŁĄD SZACOWANIA POTENCJAŁU DLA WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ W INSTALACJACH BINARNYCH TYPU ORC ZWIĄZANY ZE ZMIENNOŚCIĄ PARAMETRÓW TERMODYNAMICZNYCH WODY GEOTERMALNEJ

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano metodykę szacowania potencjału geotermalnego do wytwarzania energii elektrycznej w siłowniach binarnych z wykorzystaniem obiegu organicznego Rankine'a (ang. ORC – *Organic Rankine Cycle*). Proponowana metodyka zaleca prowadzenie obliczeń z wykorzystaniem zależności gęstości oraz ciepła właściwego wody od temperatury i mineralizacji. W szacowaniu potencjału uwzględniono także relację pomiędzy sprawnością konwersji energii cieplnej w elektryczną, a temperaturą źródła ciepła. Wykonano obliczenia prowadzące do wyznaczenia błędów szacowania potencjału poprzez przyjęcie stałych wartości parametrów eksploatowanej cieczy oraz sprawności konwersji energii, które w rzeczywistości są silnie zależne od temperatury i mineralizacji. W zakresie temperatur od 100 do 180°C oraz mineralizacji od 0 do 160 g/kg ewentualny błąd względny szacowania potencjału do wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach ORC może w skrajnych przypadkach przekroczyć 50%.

SŁOWA KLUCZOWE

Potencjał geotermalny, sprawność ORC, gęstość wody, ciepło właściwe wody

* * *

WPROWADZENIE

Obszar Polski jest miejscem występowania znacznych zasobów wód geotermalnych o niskiej i średniej entalpii, które są wykorzystywane głównie w ciepłownictwie, balneologii oraz rekreacji. Temperatura eksploatowanych obecnie w Polsce wód nie przekracza 90°C (Kępińska 2010, 2011). Dzięki wykorzystaniu technologii siłowni binarnych możliwe jest wy-

korzystanie zasobów energii geotermalnej o temperaturze rzędu 90°C lub wyższej do produkcji energii elektrycznej. Istniejące opracowania, głównie w postaci atlasów geotermalnych Niżu Polskiego (Górecki red. 2006 a i b), Karpat Zachodnich (Górecki red. 2011) oraz Zapadliska Przedkarpacciego (Górecki red. 2012) wskazują na istnienie takich zasobów oraz możliwość zastosowania cyklu organicznego Rankine'a (cykl ORC – ang. *Organic Rankine Cycle*) lub cyklu Kaliny do produkcji energii elektrycznej. Możliwości takiego wykorzystania ośrodków skalnych o temperaturze powyżej 150°C na obszarze Polski stwarzają również zamknięte struktury geotermiczne typu HDR (Ocena potencjału... 2013; Skrzypczak 2011; Miecznik, Pająk 2012). Ośrodki te, pomimo korzystnej charakterystyki termicznej cechuje niska lub bardzo niska przepuszczalność oraz porowatość, która uniemożliwia wykorzystanie zakumulowanych w nich zasobów energii w sposób konwencjonalny. Od lat siedemdziesiątych XX wieku prowadzone są badania (Hayashi i in. 1999) mające na celu zwiększanie naturalnej przepuszczalności skał poprzez sztuczne utworzenie nowych spękań lub otwarcie istniejących szczelin, umożliwiając w rezultacie eksploatację zasobów cieplnych górotworu.

W poniższym artykule zaproponowano metodykę szacowania potencjału dla wytwarzania energii elektrycznej w układach ORC, kładąc szczególny nacisk na wyznaczenie możliwego błędu związanego ze zmiennością gęstości i ciepła właściwego wody oraz sprawności konwersji energii wynikającej z lokalnych warunków hydrogeotermalnych.

1. SZACOWANIE POTENCJAŁU DLA WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Szacowanie potencjału geotermalnego wykonuje się z reguły dla okresu poprzedzającego proces eksploatacji. Wraz z eksploatacją złoża, potencjał geotermalny ulega pomniejszeniu, zwłaszcza w przypadku intensywnego zatłaczania schłodzonych wód. Jednakże, przy rozsądnie prowadzonej gospodarce złożem, możliwe jest utrzymanie stabilnej temperatury na wypływie lub jej nieznaczny spadek przez długi czas (np. $\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$ w okresie 50 lat). Wartość ta jest często mniejsza niż niepewność oszacowania temperatury złożowej, zwłaszcza na rozległym obszarze.

Wartości parametrów termodynamicznych wody geotermalnej, których znajomość jest niezbędna do wyznaczenia mocy systemu energetycznego – takich jak gęstość lub ciepło właściwe – są silnie zależne od temperatury oraz mineralizacji, natomiast w mniejszym stopniu od ciśnienia ze względu na bardzo niski współczynnik ściśliwości wody. Z uwagi na różnorodność występujących w Polsce warunków hydrotermalnych równanie stanu eksploatowanej wody (solanki) powinno być funkcją wyżej wymienionych parametrów, w szczególności jeżeli eksploatowana woda posiada wysoką temperaturę oraz jest silnie zmineralizowana. W ten sposób uniknie się uproszczeń obliczeniowych, które mogą jednak prowadzić do istotnych odstępstw od rzeczywistych wartości. Przykładowe zależności gęstości (Sharqawy, Lienhard, Zubair 2010) oraz ciepła właściwego (Jamieson i in. 1969) solanek od temperatury i zasolenia (mineralizacji) są podane odpowiednio równaniami 1 i 2 oraz przedstawione na rysunkach 1 i 2.

$$\rho_w(T, S) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 t^4 + b_1 s + b_2 st + b_3 st^2 + b_4 st^3 + b_5 s^2 t^2 \quad (1)$$

gdzie:

t – temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

s – mineralizacja [kg/kg],

$a_1 = 9,999 \cdot 10^2$, $a_2 = 2,034 \cdot 10^{-2}$, $a_3 = -6,162 \cdot 10^{-3}$, $a_4 = 2,261 \cdot 10^{-5}$, $a_5 = -4,657 \cdot 10^{-8}$

$b_1 = 8,020 \cdot 10^2$, $b_2 = -2,001$, $b_3 = 1,677 \cdot 10^{-2}$, $b_4 = -3,060 \cdot 10^{-5}$, $b_5 = -1,613 \cdot 10^{-5}$

Zakres stosowalności: ρ_w [kg/m³], $0 < t < 180^{\circ}\text{C}$, $0 < s < 0,16$ kg/kg

Dokładność w podanym zakresie: $\pm 0,1\%$

$$c_w(T, S) = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (2)$$

gdzie:

T – temperatura [K],

S – mineralizacja [g/kg],

$A = 5,328 - 9,760 \cdot 10^{-2} S + 4,040 \cdot 10^{-4} S^2$

$B = -6,913 \cdot 10^{-3} + 7,351 \cdot 10^{-4} S - 3,150 \cdot 10^{-6} S^2$

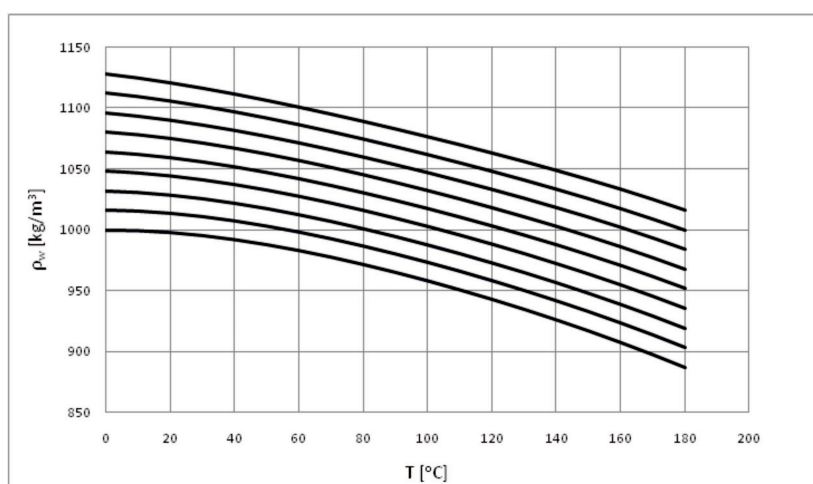
$C = 9,600 \cdot 10^{-6} - 1,927 \cdot 10^{-6} S + 8,230 \cdot 10^{-9} S^2$

$D = 2,500 \cdot 10^{-9} + 1,666 \cdot 10^{-9} S - 7,125 \cdot 10^{-12} S^2$

Zakres stosowalności: c_w [kJ/(kg·K)], $273,15 < T < 453,15$ K, $0 < S < 180$ g/kg

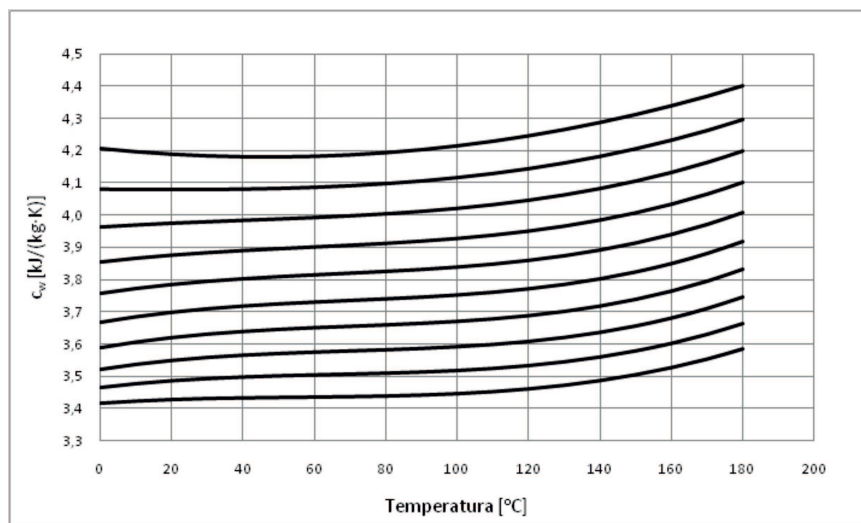
Dokładność w podanym zakresie: $\pm 0,28\%$.

Moc cieplna P_{th} pozyskiwana ze złoza za pomocą dubletu otworów dana jest równaniem 3:



Rys. 1. Zależność gęstości wody od temperatury i zasolenia (Sharqawy, Lienhard, Zubair 2010)

Fig. 1. Water density dependence on temperature and salinity (Sharqawy, Lienhard, Zubair 2010)



Rys. 2. Zależność ciepła właściwego wody w funkcji temperatury i zasolenia (Jamieson i in. 1969)

Fig. 2. Dependence of the specific heat as a function of water temperature and salinity (Jamieson et al. 1969)

$$P_{th} = \dot{m}c_w(T_{prod} - T_{inj}) = \dot{V}\rho_w c_w(T_{prod} - T_{inj}) \quad (3)$$

gdzie:

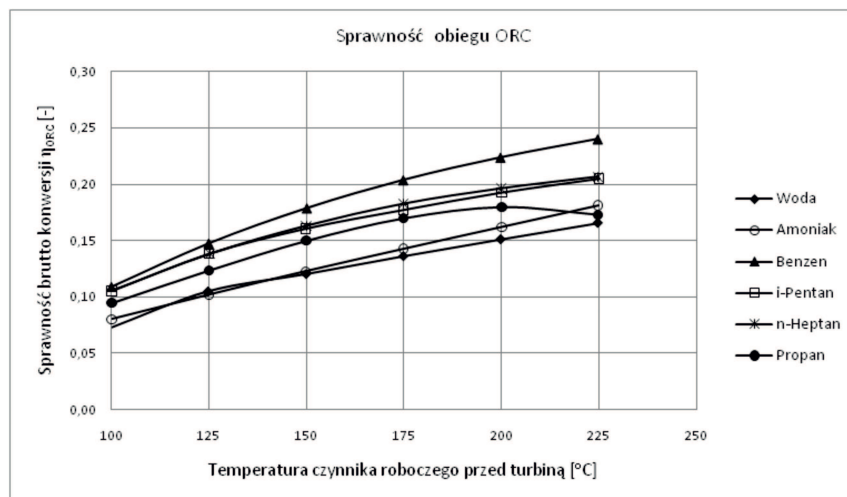
- \dot{m} – strumień masowy,
- \dot{V} – strumień masowy,
- ρ_w – gęstość wody (solanki),
- c_w – ciepło właściwe wody (solanki),
- T_{prod} – temperatura wody (solanki) eksploatowanej na głowicy otworu,
- T_{inj} – temperatura zatłaczana otworem chłonnym.

Eksploatacja cieczy złożowej o odpowiednio wysokiej temperaturze na wypływie (przeważnie min. 90°C) stwarza możliwość wykorzystania systemów bazujących na obiegu ORC do wytwarzania energii elektrycznej (Moon, Zarrouk 2012). W pewnych warunkach, np. przy bardzo niskiej temperaturze wody chłodzącej w skraplaczu (rzędu kilku °C) możliwe jest także wykorzystanie wód o temperaturze około 70°C, jak np. w Chena Hot Springs na Alasce (Aneke, Agnew, Underwood 2011).

Moc elektryczną P_{el} wytwarzaną w układzie ORC można wyznaczyć, znając potencjał cieplny danego obszaru oraz współczynnik określający sprawność konwersji energii cieplnej w elektryczną (równanie 4).

$$P_{el} = \eta_{el} P_{th} \quad (4)$$

Sprawność konwersji energii cieplnej w energię elektryczną w układzie ORC jest bardzo silnie zależna od temperatury eksploatowanej wody. Woda termalna w obiegu pierwotnym oddaje część swojej energii cieplnej niskowrzącej cieczy roboczej w obiegu wtórnym, powodując jej gwałtowne parowanie. Odparowana ciecz robocza (np. benzen, amoniak, toluen) napędza turbinę. Opuszczając turbinę pary cieczy roboczej mają obniżoną temperaturę i ciśnienie. Stosunek różnicy entalpii cieczy roboczej przed i za turbiną pomniejszony o energię niezbędną do napędu pomp cyrkulacyjnych czynnika roboczego do całkowitej energii cieplnej dostarczonej do systemu binarnego wyznacza jego sprawność termiczną. Do szacunkowych obliczeń potencjału energetycznego dla wytwarzania prądu w geotermalnych siłowniach binarnych na obszarze Polski można przyjąć pewne stałe parametry układu, takie jak temperatura zrzutu wody termalnej oraz temperatura skraplania cieczy roboczej. Zmianym parametrem jest więc przede wszystkim temperatura wydobywanej wody termalnej, zależna od lokalnych warunków hydrotermalnych i uwarunkowań technologicznych. Część autorów podaje sprawność konwersji energii cieplnej w elektryczną z wykorzystaniem cyklu ORC (Nguyen i in. 2006; Heberle, Bruggemann 2010; Vankeirsbilck i in. 2011). Jak widać z wykresu przedstawionego na rysunku 3, sprawność brutto η_{ORC} może w skrajnych przypadkach wynosić od 7,2 do 24% w zakresie temperatur od 100 do 225°C. Błędem jest więc przyjęcie stałej sprawności konwersji energii cieplnej w elektryczną, przykładowo 8% dla zakresu temperatur eksploatowanej solanki od 90 do 150°C. W tym miejscu należy wspomnieć o istotnym uproszczeniu, jakim jest przyjęcie temperatury czynnika roboczego tuż przed turbiną równej temperaturze eksploatowanej wody (solanki). W rzeczywistości nigdy nie dochodzi do wyrównania temperatury obu cieczy. Powstała różnica nosi nazwę tzw. temperatury zbliżenia (ang. *pinch-point temperature*).



Rys. 3. Sprawność brutto konwersji energii cieplnej w elektryczną z wykorzystaniem obiegu ORC (Nguyen i in. 2010)

Fig. 3. Gross efficiency of heat into electricity conversion using ORC cycle (Nguyen et al. 2010)

Turbina oraz generator również posiadają określoną sprawność, którą należy uwzględnić w celu wyznaczenia sprawności netto konwersji energii w obiegu organicznym Rankine'a¹ (równanie 5).

$$\eta_{el} = \eta_{ORC} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \approx 0,7 \cdot \eta_{ORC} \quad (5)$$

gdzie:

- η_{ORC} – sprawność cyklu ORC,
- $\eta_i = 0,75$ – sprawność wewnętrzna turbozespołu,
- $\eta_m = 0,98$ – sprawność mechaniczna turbiny,
- $\eta_g = 0,95$ – sprawność generatora elektrycznego.

Wartości powyższych współczynników zaczerpnięto z literatury (Kaczmarek 2011; Szargut 1991).

2. WYZNACZENIE MOŻLIWEGO BŁĘDU OSZACOWANIA POTENCJAŁU GEOTERMALNEGO

Częstą praktyką jest przyjmowanie do obliczeń potencjału cieplnego parametrów fizycznych wody, jakie występują dla wody słodkiej oraz dla warunków standardowych ($T = 25^\circ\text{C}$, $p = 1 \text{ atm}$) – przykładowo gęstość $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ oraz ciepło właściwe $c_p = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Jednakże w geotermii wysokotemperaturowej, gdzie występują wysoko zmineralizowane wody takie przybliżenie może prowadzić do znacznego odstępstwa od wartości rzeczywistych. W poniższych obliczeniach przeanalizowano wartość ewentualnego błędu szacowania potencjału geotermalnego w przypadku nieuwzględnienia zależności gęstości oraz ciepła właściwego wody od temperatury i mineralizacji oraz przyjęcia stałej wartości współczynnika konwersji energii, który w znacznym stopniu jest zależny od temperatury. W tym celu wykorzystano przytoczone zależności dla gęstości oraz ciepła właściwego wody. Jako przykładowy czynnik roboczy obiegu ORC przyjęto benzen w celu wyznaczenia zależności sprawności brutto elektrowni binarnej od temperatury (Nguyen i in. 2010).

Wielkość ewentualnego błędu względnego wyznaczono we wszystkich dalszych analizach według równania 6:

$$\Delta Q = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} = 1 - \frac{Q_1}{Q_0} \quad (6)$$

gdzie:

- Q_0, Q_1 – wartości rozpatrywanej wielkości fizycznej ($\rho_w, c_w, \rho_w \cdot c_w$) w stanie referencyjnym oraz innym dowolnie wybranym punkcie układu termodynamicznego

¹ Sprawność netto obiegu ORC nie jest tożsama ze sprawnością netto siłowni ORC. Wyznaczenie sprawności netto elektrowni binarnej wymaga uwzględnienia poboru mocy przez pozostałe urządzenia, m.in.: pompy geotermalne, w tym pompy zatłaczające, pompy cyrkulacyjne, system chłodzenia.

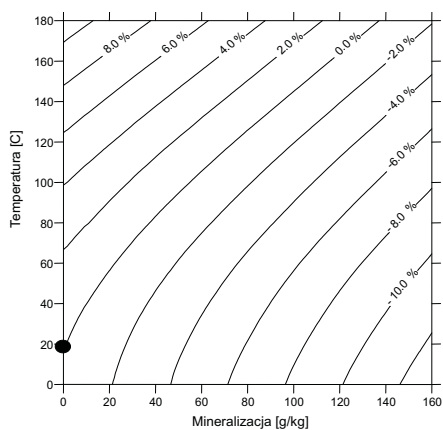
cznego. Stan referencyjny określa stan termodynamiczny wody geotermalnej o temperaturze $t = 20^{\circ}\text{C}$, ciśnieniu $p = 1 \text{ atm}$ oraz zerowej mineralizacji. Woda w powyższych warunkach termodynamicznych jest często wykorzystywana do obliczeń szacunkowych potencjału geotermalnego. W proponowanej metodzie jest to punkt odniesienia dla dalszych obliczeń, mający na celu określenie błędu, jaki popełnia się przyjmując stan referencyjny wody geotermalnej zamiast stanu rzeczywistego. Wartości dodatnie błędu względnego oznaczają, że wartość danej wielkości fizycznej, charakteryzująca wodę geotermalną w punkcie referencyjnym, jest wyższa od wartości tej wielkości w punkcie porównywanym, wartości ujemne – wielkość ta ma niższą wartość w punkcie referencyjnym niż w punkcie, wobec którego dokonujemy porównania.

Gęstość wody geotermalnej

- w zakresie temperatur $20\text{--}180^{\circ}\text{C}$ oraz w zakresie mineralizacji $0\text{--}160 \text{ g/kg}$ względna różnica wartości gęstości w odniesieniu do punktu referencyjnego wynosi od $-13,0\%$ do $10,4\%$ (rys. 4). Zmiana wartości gęstości wody geotermalnej w podobnej mierze zależy od mineralizacji, jak i od temperatury.

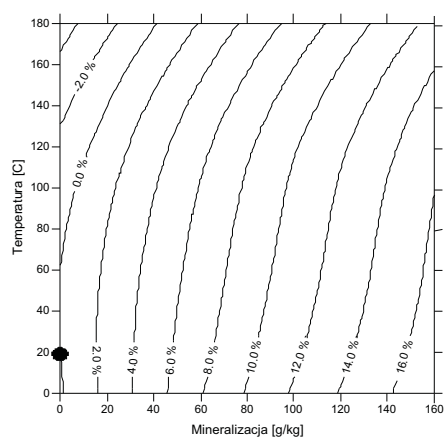
Ciepło właściwe wody geotermalnej

- w zakresie temperatur $20\text{--}180^{\circ}\text{C}$ oraz w zakresie mineralizacji $0\text{--}160 \text{ g/kg}$ względna różnica wartości ciepła właściwego wody geotermalnej w odniesieniu do punktu referencyjnego wynosi od $-4,5\%$ do $17,3\%$ (rys. 5). Zmiana wartości ciepła właściwego wody geotermalnej w głównej mierze zależy od mineralizacji.



Rys. 4. Błąd względny wyznaczenia gęstości wody geotermalnej przyjmując wartość punktu referencyjnego (czarna kropka)

Fig. 4. Relative error in determination of geothermal water density while assuming the value of the reference point (black dot)



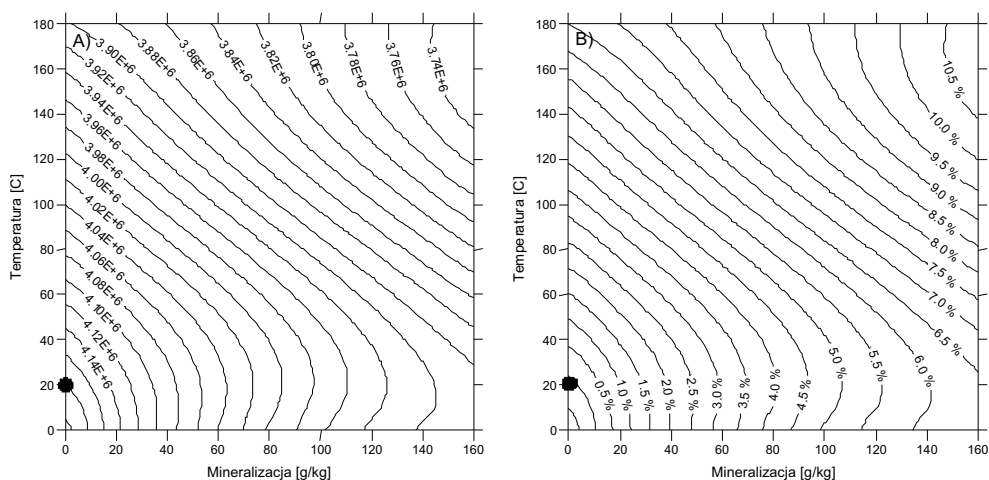
Rys. 5. Błąd względny wyznaczenia ciepła właściwego wody geotermalnej przyjmując wartość punktu referencyjnego (czarna kropka)

Fig. 5. Relative error in determination of the specific heat of geothermal water while assuming the value of the reference point (black dot)

Iloczyn $\rho_w \cdot c_w$ wody geotermalnej

Iloczyn gęstości oraz ciepła właściwego wody geotermalnej (wyrażony w jednostkach $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K} \right]$) można interpretować jako jednostkowy przyrost energii związany z wydobyciem

jednostkowej objętości wód geotermalnych ($V = 1 \text{ m}^3$) przy jednostkowym przyroście temperatury ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) (rys. 6a). Gęstość wody wykazuje odwrotną zależność względem temperatury i mineralizacji niż ciepło właściwe. Gęstość wody maleje wraz z temperaturą oraz rośnie wraz ze wzrostem mineralizacji, podczas gdy ciepło właściwe nieznacznie rośnie wraz z temperaturą oraz silnie maleje wraz ze wzrostem mineralizacji. Z tego względu iloczyn gęstości i ciepła właściwego wody geotermalnej kompensuje oba skrajne efekty, dając w rezultacie mniejsze wartości błędu względnego niż każdy z tych parametrów z osobna. Wartość ewentualnego błędu względnego iloczynu $\rho_w \cdot c_w$ względem punktu referencyjnego mieści się w zakresie od $-0,8\%$ do $10,9\%$ dla zakresu temperatur $20\text{--}180^\circ\text{C}$ oraz mineralizacji w przedziale $0\text{--}160 \text{ g/kg}$ (rys. 6b).



Rys. 6 a) wartość iloczynu $\rho_w \cdot c_w$ wody geotermalnej, b) wartość ewentualnego błędu względnego przyjmując do obliczeń wartość iloczynu $\rho_w \cdot c_w$ punktu referencyjnego (czarna kropka)

Fig. 6 a) value of the $\rho_w \cdot c_w$ product for geothermal waters, b) value of the possible relative error while using the $\rho_w \cdot c_w$ product of the reference point (black dot)

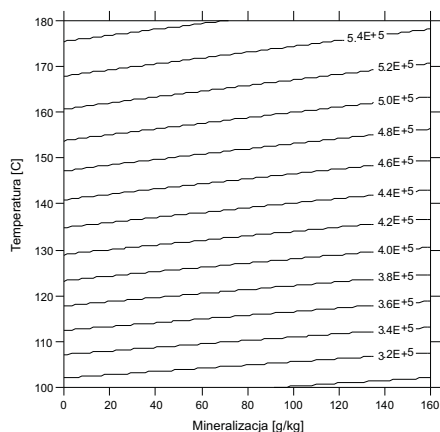
Iloczyn $\eta_{el} \cdot \rho_w \cdot c_w$ dla instalacji binarnych typu ORC

Zakładając dla uproszczenia stałą wartość temperatury zatłaczania wody termalnej do złoża, ilość energii jaką odda ona w poszczególnych wymiennikach ciepła instalacji binarnej typu ORC będzie w głównej mierze zależała od temperatury zasilania oraz strumienia masy czynnika roboczego, który odbiera energię od wody geotermalnej. Zachowując stałą wydajność eksploatowanej wody oraz stałą temperaturę powrotu wody do złoża, wyższa

temperatura zasilania układu *ORC* pozwoli na zwiększenie strumienia masy czynnika roboczego, który będzie pobierał ciepło, tym samym powodując wzrost sprawności konwersji energii cieplnej w elektryczną. Do przykładowych obliczeń przyjęto charakterystykę $\eta_{ORC}(T)$ dla benzenu (Nguyen i in. 2010), którą w zakresie temperatur 100–225°C można aproksymować równaniem 7:

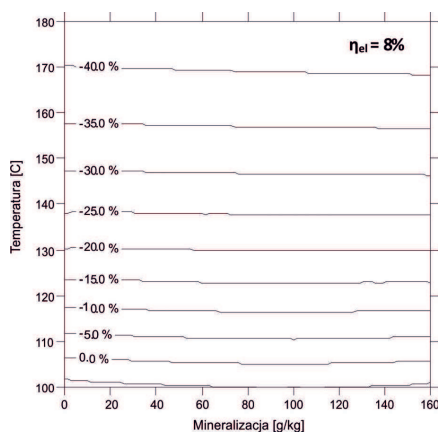
$$\eta_{ORC} = 4,46 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2,49 \cdot 10^{-3} \cdot T - 9,47 \cdot 10^{-2} \quad (7)$$

Uwzględniając $\eta_{el} \approx 0,7 \cdot \eta_{ORC}$, iloczyn $\eta_{el} \cdot \rho_w \cdot c_w$ jest przedstawiony na rysunku 7. Sprawność η_{ORC} opisana równaniem 7 jest sprawnością odniesienia (sprawnością rzeczywistą). Rysunki 8–10 przedstawiają błąd względny, wynikający z przyjęcia stałej wartości współczynnika konwersji energii cieplnej w elektryczną η_{el} , nie uwzględniając rzeczywistych temperatur i mineralizacji wód złożowych.



Rys. 7. Iloczyn $\eta_{el} \cdot \rho_w \cdot c_w$, uwzględniający rzeczywistą sprawność konwersji energii cieplnej w elektryczną

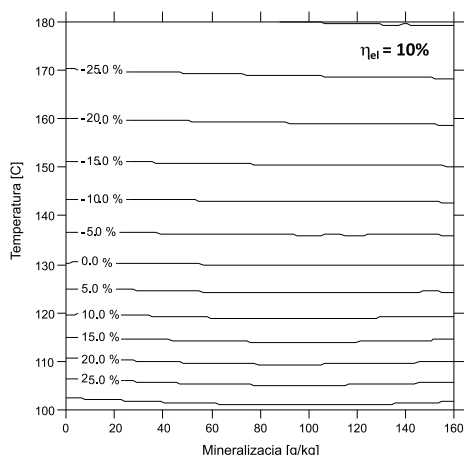
Fig. 7. The $\eta_{el} \cdot \rho_w \cdot c_w$ product adopting the real conversion efficiency of thermal energy into electricity



Rys. 8. Błąd względny oszacowania potencjału do wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach ORC wynikający z przyjęcia stałej wartości $\eta_{el} = 8\%$

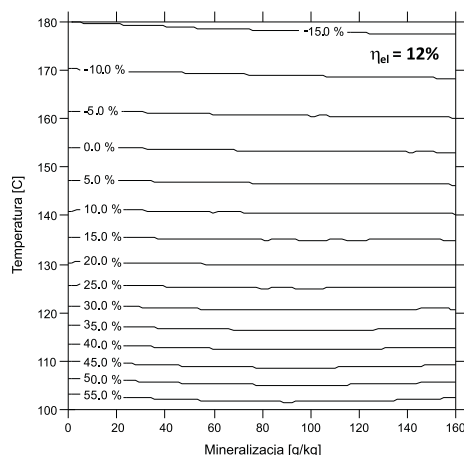
Fig. 8. Relative error in the estimation of the potential for electricity generation in ORC systems resulting from the adoption of a constant value $\eta_{el} = 8\%$

Wartość dodatnia błędu względnego oznacza przeszacowanie potencjału, jeżeli w miejsce rzeczywistej sprawności instalacji ORC przyjmujemy stałą wartość η_{el} z rysunków 8–10, natomiast wartość ujemna – potencjał jest niedoszacowany. Zakres możliwego błędu jest bardzo szeroki, od niedoszacowania sięgającego 40% dla temperatur rzędu 170°C (przy $\eta_{el} = 8\%$, rys. 8) do przeszacowania potencjału przekraczającego 60% dla temperatur rzędu 100°C (przy $\eta_{el} = 12\%$, rys. 10).



Rys. 9. Błąd względny oszacowania potencjału do wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach ORC wynikający z przyjęcia stałej wartości $\eta_{el} = 10\%$

Fig. 9. Relative error in the estimation of the potential for electricity generation in ORC systems resulting from the adoption of a constant value $\eta_{el} = 10\%$



Rys. 10. Błąd względny oszacowania potencjału do wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach ORC wynikający z przyjęcia stałej wartości $\eta_{el} = 12\%$

Fig. 10. Relative error in the estimation of the potential for electricity generation in ORC systems resulting from the adoption of a constant value $\eta_{el} = 12\%$

PODSUMOWANIE

W artykule skupiono się na wyznaczeniu błędu względnego oszacowania potencjału geotermalnego do wytwarzania prądu w elektrowniach binarnych typu ORC. Błąd ten wynika z przyjęcia stałych wartości gęstości oraz ciepła właściwego wody geotermalnej oraz orientacyjnej sprawności konwersji energii cieplnej w elektryczną w miejsce parametrów rzeczywistych, które istotnie zależą od warunków złożowych, tj. temperatury i mineralizacji wody geotermalnej. Szacując potencjał geotermalny w Polsce często za punkt odniesienia przyjmuje się gęstość i ciepło właściwe wody o temperaturze 20°C i zerowej mineralizacji. Założenie to jest jednak daleko idącym uproszczeniem obliczeń. W przypadku gęstości wody (solanki), względny błąd wynikający z tego założenia wynosi w skrajnych przypadkach od -13,0 do 10,4% w zakresie temperatur od 20 do 180°C oraz mineralizacji od 0 do 160 g/kg. W tym samym zakresie temperatur i mineralizacji, względny błąd w przypadku przyjęcia niewłaściwej wartości ciepła właściwego eksploatowanej cieczy może w skrajnych przypadkach wynieść od -4,5 do 17,3%. W zależności od tego, czy potencjał szacuje się z wykorzystaniem strumienia masowego, czy też strumienia objętościowego błąd można zminimalizować ze względu na odmienną charakterystykę funkcji gęstości oraz ciepła właściwego względem temperatury i mineralizacji. W tym przypadku błąd względny wyznaczenia iloczynu $\rho_w \cdot c_w$ wynosi w analizowanym przedziale temperatury i mineralizacji od -0,8% do 10,9%. Największe ryzyko popełnienia błędu stanowi jednak nieuwzględnienie

silnej zależności sprawności konwersji energii cieplnej w elektryczną od temperatury zasilania instalacji ORC. Sprawność ta w danej temperaturze zależy także od wyboru czynnika roboczego. Podsumowując każdy z trzech parametrów, tj. gęstość i ciepło właściwe eksploatowanej cieczy oraz sprawność układu ORC, możliwy błąd względny szacowania potencjału geotermalnego do wytwarzania energii elektrycznej może wynieść nawet kilkadziesiąt procent, zwłaszcza gdy analizuje się obszar o dużej zmienności warunków hydrogeotermalnych.

LITERATURA

- ANEKE M., AGNEW B., UNDERWOOD C., 2011 — Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering* 31, s. 1825–1832.
- HAYASHI K., WILLIS-RICHARDS J., HOPKIRK J. R., NIIBORI Y., 1999 — Numerical models of HDR geothermal reservoirs – a review of current thinking and progress. *Geothermics* 28, s. 507–518.
- GÓRECKI W. (red. nauk.) i in., 2006a — Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. ZSE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.) i in., 2006b — Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. ZSE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.) i in., 2011 — Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. ZSE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.) i in., 2012 — Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. ZSE AGH, Kraków.
- HEBERLE F., BRUGGEMANN D., 2010 — Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation. *Applied Thermal Engineering* 30, s. 1326–1332.
- JAMIESON D.T., TUDHOPE J.S., MORRIS R., CARTWRIGHT G., 1969 — Physical properties of sea water solutions: heat capacity. *Desalination* 7, s. 23–30.
- KACZMAREK R., 2011 — Zastosowanie układu z bezpośrednim odparowaniem czynnika roboczego do zasilania elektrowni geotermicznych. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1–2 (50), s. 189–198.
- KĘPIŃSKA B., 2010 — Geothermal Energy Country Update Report from Poland, 2005–2009. *World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonezja, 25–29.04.2010*, s. 1–8.
- KĘPIŃSKA B., 2011 — Energia geotermalna w Polsce – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1–2 (50), s. 7–18.
- MIECZNIK M., PAJĄK L., 2012 — Przegląd procesów zachodzących w systemach HDR w kontekście modelowania numerycznego efektów ich pracy. *Biuletyn PIG 448/1*, s. 247–250.
- MOON H., ZARROUK S.J., 2012 — Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review. *New Zealand Geothermal Workshop 2012 Proceedings, 19–21.11.2012 Auckland, Nowa Zelandia*.
- NGUYEN T.Q., SLAWNWHITE J.D., GONI BOULAMA K., 2010 — *Energy Conversion and Management* 51, s. 2220–2229.
- Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (*Hot Dry Rocks*) w Polsce – Raport końcowy. Praca zbiorowa PIG-PIB, AGH, IGSMiE PAN, PBG na zlecenie Ministerstwa Środowiska. Koordynator A. Wójcicki (PIG-PIB). Warszawa/Kraków 2013, s. 988 – Archiwum IGSMiE PAN.

- SHARQAWY M.H., LIENHARD V.J.H., ZUBAIR S.M., 2010 — Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, s. 354–380.
- SKRZYPCZAK R., 2011 — Przegląd pozasudeckich masywów krystalicznych w Polsce (w poszukiwaniu struktur dla technologii gorących suchych skał – HDR). *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1–2 (50), s. 91–98.
- SZARGUT J., 1991 — *Termodynamika techniczna*. PWN, Warszawa.

ERROR IN THE ESTIMATION OF THE POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION IN A BINARY ORC SYSTEMS ASSOCIATED WITH VARIATION OF THERMODYNAMIC PARAMETERS OF GEOTHERMAL WATER

ABSTRACT

The article presents methodology to estimate the geothermal potential for electricity generation in binary power systems using organic Rankine cycle (ORC). The proposed methodology recommend to carry out the calculations using density and specific heat dependence on temperature and mineralization. The potential estimate takes also into account the relationship between the efficiency of heat into electricity conversion and the temperature of the heat source. Calculations were performed to determine the resulting error in estimation of the potential due to assumption of constant values of brine parameters and power conversion efficiency, which in reality are significantly dependent on the temperature and mineralization. In the temperature range from 100 to 180°C and mineralization from 0 to 160 g/kg relative error in the estimation of the potential to generate electricity in ORC installations in extreme cases may exceed 50%.

KEY WORDS

Geothermal potential, ORC efficiency, water density, specific heat of water