

Sposób oceny rozkładu temperatury w produkcyjnym otworze geotermalnym przy dopływie mieszaniny solanki i dwutlenku węgla w zakresie warunków nadkrytycznych

Temperature distribution in the geothermal well when using the mixture of the brine and supercritical carbon dioxide as the working fluid

Tadeusz Szpunar, Marcin Majkrzak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono sposób oceny rozkładu temperatury w produkcyjnym otworze geotermalnym w sytuacji dopływu mieszaniny wody złożowej (solanki) oraz – planowanego jako główny nośnik energii cieplnej – dwutlenku węgla w zakresie nadkrytycznych parametrów ciśnienia i temperatury. We wstępie podkreślono znaczenie ograniczenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery, omówiono krótko charakterystykę przemian fazowych CO₂ oraz przedstawiono sposób jego alternatywnego zagospodarowania. Zyskującym w ostatnich latach na popularności sposobem ograniczenia szkodliwego oddziaływania dwutlenku węgla jest jego wykorzystanie jako medium roboczego przy pozyskiwaniu energii geotermalnej, tj. wprowadzenie go do obiegu w układzie otworów (zatlaczającego i produkcyjnego) do wyeksploatowanych złóż węglowodorów (ropy lub gazu). W pracy zobrazowano zasady pracy takich otworów, przedstawiono korzyści wykorzystania w systemach geotermalnych dwutlenku węgla jako płynu roboczego oraz określono warunki niezbędne do efektywnego działania omawianego układu. Jednym z elementów publikacji jest bilans wymiany ciepła pomiędzy płynem przemieszczającym się ze złoża na powierzchnię a górotworem. W ramach rozwiązania problemu zaprezentowano model bilansowy przyjętych i oddanych ilości ciepła przez mieszaninę solanki i dwutlenku węgla w otworze geotermalnym. Przedstawione zostały ponadto procedury określania parametrów CO₂ w funkcji ciśnienia i temperatury w odwiercie, w tym lepkość, gęstość i współczynnik przewodzenia ciepła w mieszaninie. Podano również sposób obliczania parametrów koniecznych do określenia współczynnika przejmowania ciepła pomiędzy cyrkulującym płynem a ścianą rury okładzinowej. Na potrzeby obliczeń założono, że temperatura na ścianie odwiertu zmienia się liniowo wraz z głębokością, tzn. zgodnie z tak zwanym gradientem geotermicznym. Podano też zależność umożliwiającą określenie ilości ciepła przekazywanego od górotworu do przepływającej mieszaniny solanki i CO₂. Jako element końcowy przedstawiono zależność wielkości temperatury płynu wypływającego z otworu od jego głębokości całkowitej, przyjętego natężenia przepływu i zmiennych proporcji CO₂ i solanki w składzie mieszaniny. Wszystkie obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem właściwości CO₂ w zakresie parametrów nadkrytycznych ciśnienia i temperatury, wzięto w nich również pod uwagę stopień izolacji cieplnej odwiertu. Przedstawiona została procedura obliczeń, a wyniki przykładowego obliczeniowego zestawiono w formie tabelarycznej i graficznej. Na ich podstawie podjęto próbę wskazania, który z rozpatrywanych parametrów wpływa najsilniej na końcową wielkość temperatury wypływającego z odwiertu płynu.

Słowa kluczowe: energia geotermalna, dwutlenek węgla, modelowanie matematyczne.

ABSTRACT: The article presents a method of evaluating temperature distribution in a production geothermal well in case of inflow of a mixture of formation water (brine) and supercritical carbon dioxide, as the main carrier of thermal energy. In introduction the problem of reducing the carbon dioxide emissions to atmosphere and characteristics of CO₂ phase transformations are briefly discussed. Provided are alternative methods of utilization of CO₂ including its sequestration by injection to the depleted oil and gas reservoirs using the injection and production wells working in tandem. As the main part of the article heat balance is constructed describing heat exchange between fluid flowing up from reservoir and the rock mass. The heat balance is used to find the relation between temperature of brine/CO₂ mixture which is out-flowing of the geothermal well. Procedures for determination of CO₂ parameters are provided (viscosity, density and thermal conductivity in the mixture) as function of pressure and temperature in the well. The method for calculation of these parameters is presented, which is used to determine heat transfer coefficient between circulating fluid and wall of casing. For the purposes of the calculations, it was assumed that the temperature on the borehole changes linearly with the depth, i.e. in accordance with geothermal gradient. Moreover, the dependence enabling determination of the amount of heat transferred from the rock mass to the flowing mixture of brine and CO₂ was given. Carbon dioxide is assumed to be in the supercritical range of temperature and

Autor do korespondencji: M. Majkrzak, e-mail: marcin.majkrzak@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 28.12.2022 r. Zatwierdzono do druku: 10.03.2023 r.

pressure. The results are presented as the relation between temperature of the mixture at various depths of well and for various flow rates and various compositions of the mixture. Due account is given to the impact of the wellbore thermal insulation on temperature and pressure-dependent parameters of carbon dioxide flow in the well. The parameters which govern temperature of brine and CO₂ mixture out-flowing of production well are specified. The results are also presented in a graphical and tabular form.

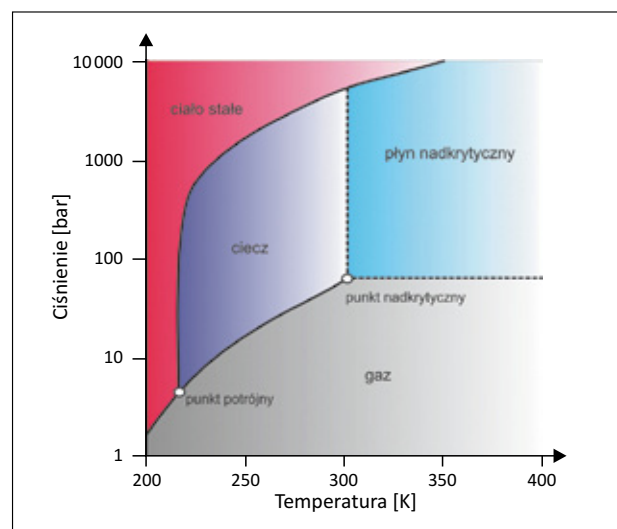
Key words: geothermal energy, carbon dioxide, mathematical modelling.

Wprowadzenie

W ostatnich latach w literaturze technicznej pojawiło się szereg artykułów analizujących możliwości wykorzystania dwutlenku węgla w geotermii. Wzrost liczby ludności oraz rozwój przemysłu przyczyniły się do zwiększenia „produkcji”, a tym samym koncentracji gazów cieplarnianych. W okresie ostatniego zlodowacenia zawartość CO₂ w atmosferze wynosiła 200 ppm, natomiast obecnie jest równa 400 ppm (Allam et al., 2017; Esteves et al., 2019). Dzisiejszy stan wynika głównie ze spalania paliw kopalnych, co prowadzi do niekorzystnych zmian klimatycznych. Wzrost zawartości CO₂ jest powodem zaburzenia równowagi termicznej, ponieważ wiąże się ze zmniejszeniem możliwości odprowadzania ciepła w przestrzeń kosmiczną przez ograniczenie promieniowania podczerwonego przez atmosferę, co skutkuje globalnym ociepleniem klimatu (Pruess, 2008; Bushbeck et al., 2017).

W normalnych warunkach ciśnienia i temperatury gęstość gazowego dwutlenku węgla wynosi 1,98 kg/m³. W przypadku ciśnień niższych od 0,517 MPa (5,17 bar) dwutlenek węgla występuje jedynie w fazie gazowej, a pod ciśnieniem 0,1 MPa (1 bar) i w temperaturze niższej od -78,46°C (194,68 K) przybiera postać ciała stałego. Powyżej tej temperatury następuje jego sublimacja do fazy gazowej. W przypadku ciśnień wyższych od 0,517 MPa (5,17 bar) CO₂ może występować w postaci cieczy, a parametry punktu potrójnego (gdzie dwutlenek węgla może występować w postaci ciała stałego, cieczy lub gazu) równe są: -56,56°C (216,59 K) i 0,518 MPa (5,18 bar). Z kolei parametry punktu krytycznego są następujące: 304,128 K (30,978°C) i 7,377 MPa (73,77 bar). W warunkach ciśnień i temperatur wyższych od wymienionych dla punktu krytycznego dwutlenek węgla występuje w stanie nadkrytycznym (National Institute of Standards and Technology). Przybiera wówczas postać pośrednią pomiędzy gazem a cieczą. Oznacza to, że wprowadzony do zamkniętego naczynia wypełnia całą jego objętość, tak jak gaz, natomiast jego gęstość zbliżona jest do gęstości cieczy (Brown, 2000). Dwutlenek węgla w stanie nadkrytycznym charakteryzuje się bardzo niską lepkością. Na poniższym diagramie (rysunek 1) przedstawiono w sposób poglądowy schemat przemian fazowych dwutlenku węgla w funkcji ciśnienia i temperatury.

Jednym z proponowanych sposobów ograniczenia szkodliwego oddziaływania CO₂ jest jego użycie jako medium



Rysunek 1. Schemat przemian fazowych CO₂ w funkcji ciśnienia i temperatury (National Institute of Standards and Technology)

Figure 1. Diagram of CO₂ phase transitions as a function of pressure and temperature (National Institute of Standards and Technology)

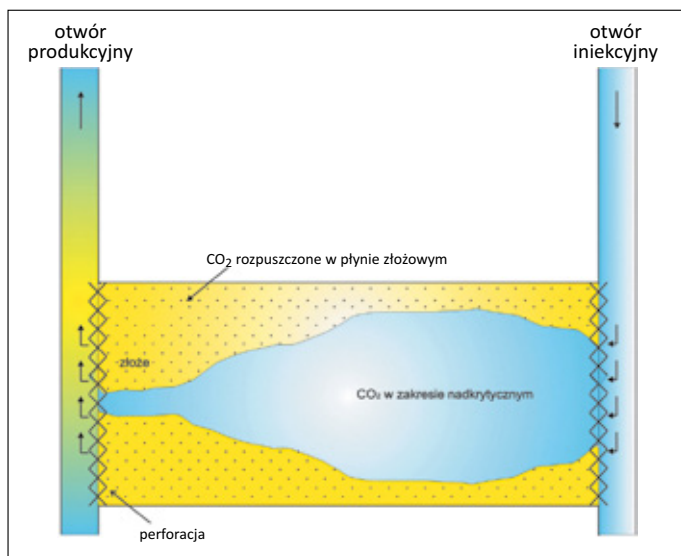
roboczego przy pozyskiwaniu energii geotermalnej, czyli przy eksploatacji złoża o odpowiednio wysokiej temperaturze medium złożowego i odbiorze energii cieplnej na powierzchni, oraz wykorzystaniu jej do wytwarzania energii elektrycznej lub do celów grzewczych (Aydin i Merey, 2021; Cui et al., 2021). W klasycznej geotermii czynnikiem roboczym jest na ogół woda złożowa. Najczęściej systemy pozyskiwania energii geotermalnej wykorzystują tzw. dublet otworów, na który składa się otwór produkcyjny i iniekcyjny. Tworzą one „pętle”, to znaczy płyn wydobyty z odwiertu produkcyjnego po oddaniu ciepła na powierzchni zatłaczany jest ponownie odwiertem iniekcyjnym do górotworu. Następnie po przepływie przez ośrodek porowaty nagrzewa się do temperatury złożowej, aby ponownie oddać nagromadzone ciepło na powierzchni (Barbier, 2002; Pruess, 2006).

Wśród korzyści zastosowania w systemach geotermalnych dwutlenku węgla jako płynu roboczego, który miałby zastąpić wodę złożową, wymienić należy (Heidarian et al., 2011; Cui et al., 2021):

- słabe oddziaływanie CO₂ na minerały zawarte w skałach;
- niską lepkość CO₂ w stanie nadkrytycznym, pozwalającą na uzyskanie szybszego poboru ciepła i szybszego przepływu dwutlenku węgla w złożu;

- większą ściśliwość i rozszerzalność CO₂ w stanie nadkrytycznym, co powoduje, że dwutlenek węgla zajmuje całą dostępną objętość przestrzeni porowej, podobnie jak gaz;
- możliwość ekologicznego zagospodarowania CO₂.

Ponieważ konieczne jest uzyskanie jak najwyższej temperatury na wypływie z otworu produkcyjnego, utrzymywane ciśnienie na zagłowiczeniu musi przekraczać 72,808 bar, a temperatura musi być wyższa od 31°C (diagram przemian fazowych CO₂ – rysunek 1). Parametry takie odpowiadają stanowi nadkrytycznemu dwutlenku węgla, gdyż zakładamy, że temperatura warstwy porowatej (złoża) jest wyższa od 31°C (w przeciwnym wypadku złożo nie nadawałoby się do pozyskiwania energii geotermalnej). Na rysunku 2 przedstawiono w sposób poglądowy schemat zestawu dwóch otworów – produkcyjnego i iniekcyjnego, udostępniających warstwę porowatą oraz poglądowy rozkład CO₂ i płynu złożowego w przestrzeni porowej złoża.



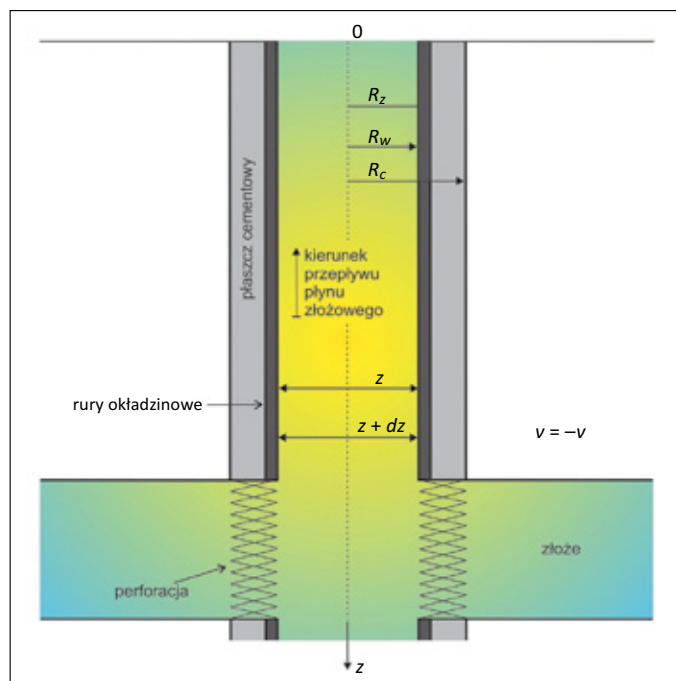
Rysunek 2. Poglądowy schemat dubletu otworów iniekcyjnego i produkcyjnego oraz rozkład objętości warstwy porowatej zajętej przez CO₂ i płyn złożowy przy wykorzystaniu tych odwiertów w geotermii

Figure 2. Diagram of injection and production wells and distribution of volume of porous zone occupied by CO₂ and brine using these wells in geothermal system

Sprawą o zasadniczym znaczeniu dla oceny efektywności odbioru ciepła jest znajomość temperatury CO₂ na wypływie z otworu geotermalnego, gdyż jej wielkość determinuje między innymi jego moc cieplną. Temperatura ta zależy od głębokości otworu, wydatku wypływu oraz temperatury złożowej. Innym czynnikiem wpływającym na temperaturę medium jest stopień izolacji cieplnej, czyli współczynniki przewodności cieplnej stali rur okładzinowych i płaszcza cementowego. Zagadnienia te zilustrowano w sposób praktyczny w przykładzie obliczeniowym i na wykresach zamieszczonych w dalszej części publikacji.

Bilans wymiany ciepła pomiędzy płynem przemieszczającym się ze złoża na powierzchnię a górotworem

W rozpatrywanym przypadku płyn złożowy, stanowiący mieszaninę dwutlenku węgla i wody złożowej, przemieszcza się przez kolumnę rur okładzinowych (o promieniu zewnętrznym R_z i wewnętrznym R_w) ze złoża na powierzchnię. Omawianą sytuację schematycznie przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Schemat przepływu płynu złożowego przez kolumnę rur okładzinowych

Figure 3. Scheme of formation fluid flow through casing pipe column

W opisie wymiany ciepła w otworze (Keller et al., 1973; Szarka i Bobok, 2012; Szpunar i Budak, 2013) założono, że ze względu na nieskończenie dużą pojemność cieplną górotworu (w porównaniu z ilością ciepła odbieranego w otworze) przez cały czas trwania wypływu na ścianie otworu panuje temperatura wynikająca z gradientu geotermicznego. Rozkład temperatury płynu w funkcji głębokości określono, rozpatrując ilość ciepła przyjmowane i oddawane przez elementarną płytkę płynu pomiędzy głębokością z , $z + dz$ oraz pomiędzy chwilą t , $t + dt$. Założono, że temperatura płynu w otworze jest funkcją głębokości z i czasu t .

Ilość ciepła przekazywaną pomiędzy elementarną płytką o grubości dz (pomiędzy chwilą t , $t + dt$) a górotworem można wyrazić wzorem (Hobler, 1971):

$$C(T_g - T(z,t)) dz dt \quad (1)$$

gdzie $C = 1/R$, a R wyraża się wzorem:

$$R = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\lambda_c \ln R_c/R_z} + \frac{1}{\lambda_s \ln R_z/R_w} + \frac{1}{\alpha_{rz} R_w} \right] \quad (2)$$

gdzie:

λ_c – współczynnik przewodności cieplnej płaszczki cementowego za rurami [W/m · stop],

λ_s – współczynnik przewodności cieplnej stali rur okładzinowych [W/m · stop],

α_{rz} – współczynnik przyjmowania ciepła przez płyn od wewnętrznej ścianki rury [W/m² · stop],

R_c – promień zewnętrzny płaszczki cementowego [m],

R_z – promień zewnętrzny rur okładzinowych [m],

R_w – promień wewnętrzny rur okładzinowych [m].

Ilość ciepła zatrzymana w elementarnej płytce o objętości $dV = \pi R^2 dz$ pomiędzy chwilą t , $t + dt$ równa jest:

$$\left[c\rho \left(T(t,z) + \frac{\partial T(t,z)}{\partial t} dt \right) - c\rho T(t,z) \right] dV = c\rho \pi R_w^2 \frac{\partial T(t,z)}{\partial t} dz dt \quad (3)$$

gdzie:

c – ciepło właściwe płynu przy ciśnieniu i temperaturze średniej w otworze [J/kg · stop],

ρ – średnia gęstość płynu w otworze [kg/m³] przy średnim ciśnieniu i średniej temperaturze w otworze.

Ciepło przekazywane w wyniku przewodzenia przez dolną powierzchnię elementarnej płytki w kierunku przepływu płynu pomiędzy chwilą t , $t + dt$ równe jest:

$$k\pi R_w^2 \left(\frac{\partial T(t,z)}{\partial z} \right)_{z+dz} dt \quad (4)$$

podobnie:

$$k\pi R_w^2 \left(\frac{\partial T(t,z)}{\partial z} \right)_z dt \quad (5)$$

określa ilość ciepła doprowadzoną do elementarnej płytki z kierunku przepływu płynu. Ilość ciepła zatrzymana w elementarnej płytce równa jest zatem różnicy wzorów (4) i (5):

$$k\pi R_w^2 \frac{\partial^2 T(t,z)}{\partial z} dz dt \quad (6)$$

gdzie:

k – współczynnik przewodności cieplnej płynu [W/m · stop].

Równanie bilansu cieplnego dla elementarnej płytki ma więc postać:

$$C(Tg - T(t,z)) dz dt + k\pi R_w^2 \frac{\partial^2 T(t,z)}{\partial z^2} dz dt = \pi R_w^2 c\rho \frac{\partial T(t,z)}{\partial t} dz dt \quad (7)$$

Jeżeli z zależy od t to $T(z,t)$ jest tylko funkcją t :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

i jeżeli, jak pokazano na rysunku 3, oś z głębokości otworu skierowana jest w dół, to $dz/dt = -v$, gdzie v to prędkość płynu.

W związku z tym ze wzoru (7) otrzymamy:

$$\pi R_w^2 c\rho \left(\frac{\partial T(z,t)}{\partial z} (-v) + \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} \right) = C(Tg - T(z,t)) + k\pi R_w^2 \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (9)$$

Rozpatrujemy stan ustalony, gdy $\partial T/\partial t = 0$, a trzecie z wyrażeń wzoru (9) pomijamy z uwagi na fakt, że współczynnik przewodzenia ciepła k dla cieczy i gazów jest bardzo mały. Mieści się on w zakresie – dla gazów: od 0,005 do 0,5 W/m · stop oraz dla cieczy: od 0,09 do 0,7 W/m · stop. W przypadku stwierdzenia spadku temperatury mieszaniny wypływającej ze złoża należy przyjąć nową wielkość temperatury złożowej, co odpowiadać będzie nowemu gradientowi geotermicznemu „a”, i kontynuować obliczenia. Współczynnik k pomijany jest w większości prac dotyczących rozkładu temperatury cieczy w otworze wiertniczym (Gambill, 1959; Pruess, 2008). Przy założeniu, że dla $z = H$, gdzie H jest głębokością otworu, temperatura płynu wypływającego ze złoża równa jest temperaturze złożowej, rozwiązaniem równania (9) jest bardzo prosta funkcja, którą po przekształceniach można przedstawić w poniższej postaci:

$$T(z)[^\circ\text{C}] = B[\text{m}] \frac{T_z[^\circ\text{C}]}{H[\text{m}]} \left(1 - e^{-\left(\frac{H-z}{B}\right)} \right) + az \quad (10)$$

W przypadku przepływu dwutlenku węgla w zakresie warunków nadkrytycznych wszystkie parametry CO₂ są funkcjami ciśnienia i temperatury w otworze, które zmieniają się z głębokością. Podawane w literaturze wielkości w zakresie warunków nadkrytycznych różnią się w zależności od źródła i metody badań (Gambill, 1959; Pruess, 2006). Wzór (10) może być zatem inżynierskim przybliżeniem wielkości rzeczywistych. Wszystkie parametry przepływu, takie jak wydatek (a zatem prędkość przepływu v), liczba Reynoldsa, liczba Prandtla, stopień izolacji cieplnej odwiertu, tj. współczynniki przewodności cieplnej stali rur okładzinowych i płaszczki cementowego, uwzględnione są w wielkości współczynnika B .

W początkowym okresie funkcjonowania zestawu odwiertów iniekcyjnego i eksploatacyjnego do odwiertu eksploatacyjnego dopływać będzie prawie wyłącznie płyn złożowy (solanka). W miarę kontynuowania zatłaczania CO₂ jego zawartość w zakresie warunków nadkrytycznych będzie rosła, aby po odpowiednio długim czasie stanowić niemalże 100% płynu dopływającego do odwiertu eksploatacyjnego. W celu wyznaczenia temperatury mieszaniny wypływającej na powierzchnię, korzystając z przedstawionego sposobu,

konieczne jest podanie jej parametrów. W przedstawionym poniżej schemacie obliczeń zastosowano empiryczne zależności do określenia lepkości mieszanin, takie jak wzór Gambilla (Gambill, 1959) dla mieszaniny dwuskładnikowej, który funkcjonuje przy założeniu, że pomiędzy składnikami nie zachodzą procesy fizykochemiczne.

Wzór ten ma postać:

$$\mu^{\frac{1}{3}} = x_a \mu_a^{\frac{1}{3}} + x_b \mu_b^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

gdzie:

μ – lepkość dynamiczna,

x – udział masowy danego składnika w mieszaninie.

Drugą z metod oceny lepkości mieszaniny wieloskładnikowej jest sposób podany przez firmę Chevron (Maples, 2000). Zgodnie z procedurą wyznaczono wielkość VBN (*viscosity blending number* – stopień wpływu danego składnika na lepkość mieszaniny) dla każdego i -tego składnika mieszaniny:

$$VBN_i = 14,534x \ln(\ln \mu_i + 0,8) + 10,975 \quad (12)$$

następnie obliczono VBN dla całości mieszaniny:

$$VBN_{mix} = \sum_{i=0}^n x_i (VBN)_i \quad (13)$$

w kolejnym etapie obliczono lepkość mieszaniny z wzoru:

$$\mu_{mix} = \exp \left(\exp \left(\frac{VBN_{mix} - 10,975}{14,534} \right) \right) - 0,8 \quad (14)$$

gdzie:

μ_i – lepkość dynamiczna i -tego składnika mieszaniny,

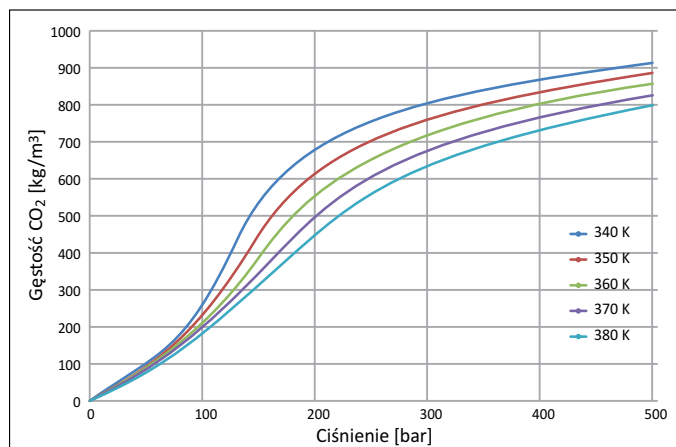
N – liczba składników mieszaniny,

x_i – udział i -tego składnika w mieszaninie.

Procedura obliczeń rozkładu temperatury w otworze podczas wypływu mieszaniny solanki i CO₂ w zakresie nadkrytycznych parametrów temperatury i ciśnienia

1. Wyznaczamy prędkość przepływu mieszaniny w otworze.
2. Odczytujemy gęstość CO₂ w funkcji ciśnienia średniego i temperatury średniej (rysunek 4).
3. Obliczamy gęstość średnią mieszaniny jako średnią ważoną według udziałów objętościowych składników mieszaniny.
4. Wyznaczamy lepkość CO₂ w zakresie parametrów nadkrytycznych w funkcji temperatury średniej (K) i ciśnienia średniego (bary) (Heidarian et al., 2011):

$$\mu_{CO_2} (cP) = \frac{A_1 + A_2 p + A_3 p^2 + A_4 \ln T + A_5 (\ln T)^2 + A_6 (\ln T)^3}{1 + A_7 p + A_8 \ln T + A_9 (\ln T)^2} \quad (15)$$



Rysunek 4. Zależność gęstości CO₂ od temperatury i ciśnienia (National Institute of Standards and Technology)

Figure 4. Dependence of CO₂ density on temperature and pressure (National Institute of Standards and Technology)

gdzie:

$$A_1 = -1,146067 \cdot (10^{-1}),$$

$$A_2 = 6,978380 \cdot (10^{-7}),$$

$$A_3 = 3,976765 \cdot (10^{-10}),$$

$$A_4 = 6,336120 \cdot (10^{-2}),$$

$$A_5 = -1,166119 \cdot (10^{-2}),$$

$$A_6 = 7,142596 \cdot (10^{-6}),$$

$$A_7 = 6,519333 \cdot (10^{-6}),$$

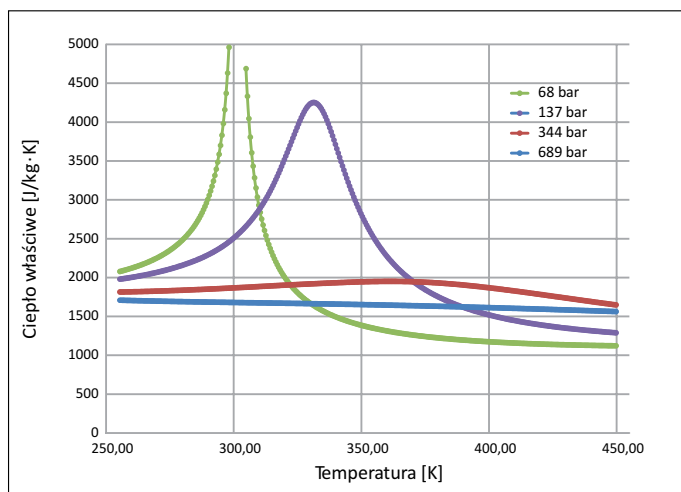
$$A_8 = -3,567559 \cdot (10^{-1}),$$

$$A_9 = 3,180473 \cdot (10^{-2}).$$

Przeliczamy centypaazy na kg/m · s (1 cP = 0,001 kg/m · s).

5. Obliczamy uśrednioną lepkość płynu dwuskładnikowego (solanka/dwutlenek węgla) w zakresie parametrów nadkrytycznych.
6. Obliczamy masowy wydatek przepływu mieszaniny w otworze.
7. Wyznaczamy liczbę Reynoldsa.
8. Odczytujemy wartość ciepła właściwego CO₂ w zakresie nadkrytycznym w funkcji średniego ciśnienia i temperatury (rysunek 5).
9. Obliczamy ciepło właściwe mieszaniny solanki i CO₂ w zakresie nadkrytycznym jako wielkość średnioważoną według udziałów masowych;
10. Obliczamy współczynnik przewodności cieplnej CO₂ w stanie nadkrytycznym w funkcji przyjętej temperatury średniej w otworze T_{sr} [K] i obliczonej gęstości średniej płynu $\bar{\rho}$ (kg/m³) (Gambill, 1959):

$$\lambda_{CO_2} \left[\frac{W}{m \cdot stop} \right] = 10^{-3} \frac{A_1 + A_2 \bar{\rho} + A_3 \bar{\rho}^2 + A_4 \bar{\rho}^3 T^3 + A_5 \bar{\rho}^4 + A_6 T + A_7 T^2}{\sqrt{T_{sr}}} \quad (16)$$



Rysunek 5. Zależność wartości ciepła właściwego CO₂ od temperatury i ciśnienia (National Institute of Standards and Technology)

Figure 5. Dependence of CO₂ specific heat value on temperature and pressure (National Institute of Standards and Technology)

gdzie:

$$A_1 = -105,161 \cdot (10^0),$$

$$A_2 = 0,9007 \cdot (10^0),$$

$$A_3 = 0,0007 \cdot (10^0),$$

$$A_4 = 3,50 \cdot (10^{-15}),$$

$$A_5 = 3,76 \cdot (10^{-10}),$$

$$A_6 = 0,7500 \cdot (10^0),$$

$$A_7 = 0,0017 \cdot (10^0).$$

11. Wyznaczamy uśredniony współczynnik przewodności cieplnej solanki i CO₂ w stanie nadkrytycznym jako wielkość średnioważoną według udziału tych składników w mieszaninie.
12. Obliczamy liczbę Prandtla dla mieszaniny solanki i CO₂ w zakresie parametrów nadkrytycznych.
13. Obliczamy współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy mieszaniną a wewnętrzną ścianką rury okładzinowej.
14. Obliczamy wielkość C .
15. Wyznaczamy wielkość współczynnika B :

$$B[\text{m}] = \frac{\pi R_w^2[\text{m}^2] \bar{c}[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{stop})] \bar{\rho}[\text{kg}/\text{m}^3] v[\text{m}/\text{s}]}{C[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{stop})]} \quad (17)$$

gdzie:

\bar{c} – średnie ciepło właściwe mieszaniny solanki i CO₂ w stanie nadkrytycznym,

$\bar{\rho}$ – średnia gęstość ww. mieszaniny.

Przykład obliczeniowy

W przykładzie obliczeniowym przedstawiono procedurę obliczeń dla wyznaczenia rozkładu temperatury w otworze

podczas wypływu mieszaniny solanki i CO₂ w zakresie nadkrytycznych parametrów temperatury i ciśnienia. Założono, że otwór zarurowany jest jedną kolumną rur okładzinowych o jednakowej średnicy. W przypadku większej liczby kolumn, rur cementowanych „na zakładkę” czy zmiany średnicy otworu – wielkości współczynnika B będą się różnić (zmienia się liczba Reynoldsa i wielkość współczynnika C). Rozkład temperatury mieszaniny przy wypływie zależeć zatem będzie od konstrukcji otworu i użytych materiałów oraz przede wszystkim od wydatku wypływu ze złoża i udziału poszczególnych składników w mieszaninie. Wielkości współczynnika przejmowania ciepła, które wpływają na przebiegi temperatury, zależą od szeregu czynników, których wielkość nie jest znana lub jest znana w przybliżeniu.

Należą do nich:

- średnica otworu (w procesie wiercenia dochodzi do ob-sypywania się materiału skalnego ze ścian oraz tworzenia kawern);
- stopień wypełnienia przestrzeni pierścieniowej przez zaczyn cementowy (mogą występować interwały, w których brak jest cementu lub wypełnienie jest słabe);
- korozja rur okładzinowych (otworami produkcyjnymi są na ogół otwory już eksploatowane);
- gradient geotermiczny (wartość gradientu nie jest na ogół liniową funkcją głębokości i różni się pomiędzy rejonami geologicznymi lub pomiędzy otworami na tym samym złożu).

Każda zmiana średnicy otworu wpływa na przebieg temperatury, ponieważ zmienia się prędkość przepływu, a zatem wartość liczby Reynoldsa i Prandtla. Dokładność obliczeń przebiegu temperatury w otworze byłaby znacznie większa, gdyby można było podać wymienione parametry dla poszczególnych interwałów głębokości otworu. Do obliczeń przyjęto małe wydatki przepływu w celu podkreślenia wpływu poszczególnych wielkości na przebiegi temperatury. Parametry wejściowe niezbędne do przeprowadzenia obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Korzystając z opracowanego algorytmu, wyznaczono dla wybranych proporcji zawartości solanki i dwutlenku węgla wartości temperatury mieszaniny wypływającej z otworu w funkcji głębokości. Zmienną w zaprezentowanych obliczeniach było również natężenie przepływu mieszaniny przez kolumnę rur okładzinowych. Wyniki zestawiono w tabeli 2 oraz na rysunkach 6–8.

Jak wynika z analizy wyników wpływ natężenia przepływu i składu mieszaniny na wielkość oraz zmienność temperatury mieszaniny wypływającej na powierzchnię otworem produkcyjnym jest dość znaczny. W przykładzie obliczeniowym w celu pełniejszego przedstawienia różnic w uzyskanych wynikach uwzględniono natężenie przepływu w zakresie od 200 l/min do

Tabela 1. Dane wejściowe dla przykładu obliczeniowego

Table 1. Input data for a calculation example

Symbol	Opis [jednostka]	Wartość
H	Głębokość otworu [m]	3000
R_z	Promień zewnętrzny rur okładzinowych [m]	0,089
R_w	Promień wewnętrzny rur okładzinowych [m]	0,079
R_c	Promień otworu lub promień zewnętrzny płaszczu cementowego [m]	0,108
λ_c	Współczynnik przewodności cieplnej płaszczu cementowego [W/m · stop]	0,5
λ_s	Współczynnik przewodności cieplnej stali rur okładzinowych [W/m · stop]	16,5
$P_{złoż}$	Ciśnienie złożowe [bar]	300
$T_{złoż}$	Temperatura złożowa [°C]	105
T_{sr}^*	Średnia temperatura w otworze [°C] $T_{sr} = T_{złoż}$	105
P_{sr}^{**}	Ciśnienie średnie w otworze [bar] $P_{sr} = \frac{1}{2}(P_{gl} + P_{złoż})$	187,5
P_{gl}	Ciśnienie głowicowe podczas wypływu [bar]	75
a	Gradient geotermiczny [stop/m]	0,033
ρ_{sol}	Gęstość solanki [kg/m ³]	1050
C_{sol}	Ciepło właściwe solanki (o nasyceniu 26% wagowych) [J/kg · stop]	3260
λ_{sol}	Współczynnik przewodności cieplnej solanki w temperaturze 360 K (W/m · stop)	0,68
μ_{sol}	Lepkość solanki (cP)	1,28
Parametry zmienne		
Q	Wydatek mieszaniny wypływającej z otworu [l/min]	
%sol	Udział objętościowy solanki w mieszaninie [%]	
%CO ₂	Udział objętościowy CO ₂ w zakresie nadkrytycznym w mieszaninie [%]	
<p>*T_{sr} – średnią temperaturę w otworze przyjmujemy początkowo jako równą połowie temperatury złożowej, ponieważ przyjęta temperatura służy jedynie do początkowej oceny parametrów solanki i CO₂ i nie jest bezpośrednio wykorzystywana w obliczeniach. Po pierwszym cyklu obliczeń przyjmujemy nową temperaturę średnią i ponawiamy obliczenia aż do uzyskania dobrej zbieżności temperatury średniej przyjętej do obliczeń z temperaturą średnią obliczoną.</p> <p>**P_{sr} – ciśnienie średnie w odwiercie przyjmujemy jako $P_{sr} = \frac{1}{2}(P_{gl} + P_{dr})$, przy czym ciśnienie P_{dr} (ciśnienie denne ruchowe) obliczane jest z uwzględnieniem natężenia przepływu, oporów przepływu i wielkości ciśnienia głowicowego. Również ono nie bierze bezpośredniego udziału w obliczeniach, a jedynie służy do początkowej oceny parametrów solanki i CO₂ w zakresie warunków nadkrytycznych.</p>		

Tabela 2. Wartości temperatury mieszaniny solanki i dwutlenku węgla w zależności od składu mieszaniny i natężenia przepływu w otworze

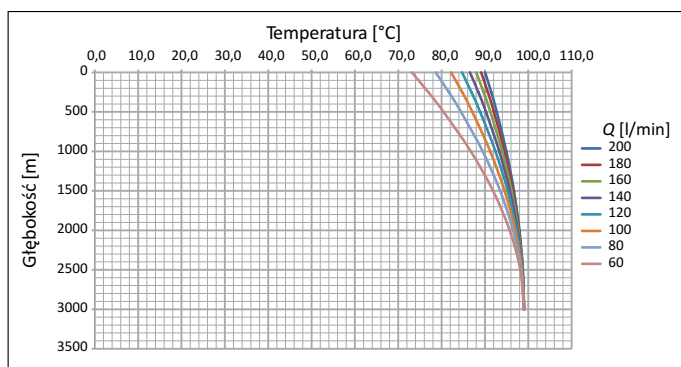
Table 2. The temperature values of the brine and carbon dioxide mixture, depending on the composition of the mixture and the flow rate in the well

Skład mieszaniny [%]		Głębokość [m]	Natężenie przepływu [l/min]								
solanka	CO ₂		200	180	160	140	120	100	80	60	
80	20	0	90,1	89,1	88,0	86,6	84,7	82,2	78,6	73,1	Temperatura na głowicy [°C]
50	50		86,8	85,6	84,1	82,2	79,8	76,6	72,2	65,5	
10	90		78,7	76,8	74,5	71,7	68,3	63,8	57,9	49,7	
		3000	99,0								Temperatura na dnie otworu [°C]

60 l/min oraz skład mieszaniny w trzech przypadkach: I – 80% solanki, 20% CO₂, II – 50% solanki i 50% CO₂, III – 10% solanki i 90% CO₂.

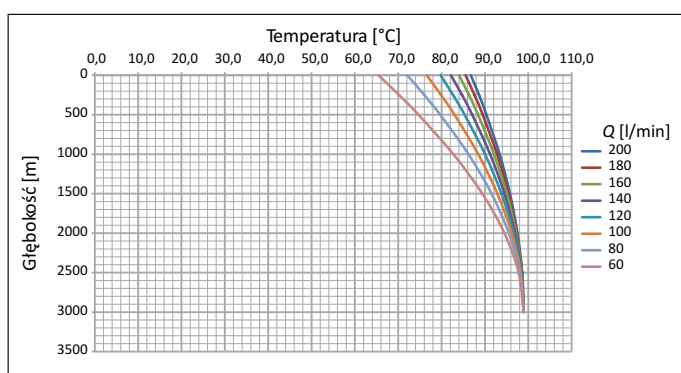
Zgodnie z przewidywaniami najwyższą temperaturę mieszaniny na wypływie z odwiertu, niezależnie od jej składu, otrzymano przy najwyższym natężeniu przepływu (odpowiednio dla przypadku: I – 90,1°C, II – 86,8°C, III – 78,7°C).

Obniżenie prędkości przemieszczania się mieszaniny kolumną rur okładzinowych skutkuje spadkiem temperatury uzyskanej na powierzchni, kolejno: I – 73,1°C, II – 65,5°C, III – 49,7°C. Otrzymanie temperatury mieszaniny poniżej 50°C przy przepływie równym 60 l/min dla mieszaniny 10% solanki i 90% CO₂ sugeruje rozważenie ekonomicznego sensu prowadzenia eksploatacji.



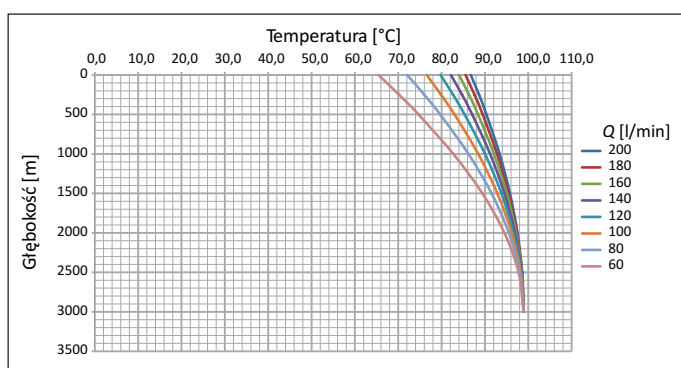
Rysunek 6. Rozkład temperatur mieszanki (80% solanki, 20% CO₂) w otworze w funkcji głębokości i natężenia przepływu

Figure 6. Temperature distribution of mixture (80% brine, 20% CO₂) in well as a function of depth and flow rate



Rysunek 7. Rozkład temperatur mieszanki (50% solanki, 50% CO₂) w otworze w funkcji głębokości i natężenia przepływu

Figure 7. Temperature distribution of mixture (50% brine, 50% CO₂) in well as a function of depth and flow rate



Rysunek 8. Rozkład temperatur mieszanki (10% solanki, 90% CO₂) w otworze w funkcji głębokości i natężenia przepływu

Figure 8. Temperature distribution of mixture (10% brine, 90% CO₂) in well as a function of depth and flow rate

W rozpatrywanych przypadkach wpływająca odwiertem produkcyjnym mieszanką najwyższą temperaturę osiągnęła, niezależnie od przyjętego natężenia przepływu, dla 80% zawartości wody złożowej i 20% dwutlenku węgla. Zmiana udziału każdego ze składników, wzrost zawartości CO₂ do maksymalnej 90%, skutkowałą obniżeniem temperatury. Jest to zgodne

z właściwościami dwutlenku węgla znajdującego się w zakresie nadkrytycznych parametrów temperatury i ciśnienia, zgodnie z którymi jego ciepło właściwe jest zdecydowanie niższe od ciepła właściwego wody złożowej. W takim wypadku oczywiście jest, że im większy udział nadkrytycznego CO₂ w składzie mieszanki, tym spadek jej temperatury na „zagłowiczeniu” odwiertu (względem dna) będzie wyższy.

Wnioski

Wykorzystanie dwutlenku węgla w zakresie nadkrytycznych parametrów ciśnienia i temperatury jako nośnika energii geotermalnej jest interesującym sposobem zagospodarowania i ograniczenia szkodliwego oddziaływania CO₂. Przedstawiony w pracy sposób oceny rozkładu temperatury w produkcyjnym otworze geotermalnym jest istotny dla efektywnej „eksploatacji” ciepła geotermalnego. Na podstawie analizy wyników prac przedstawionych w artykule wysunąć można następujące wnioski:

1. Parametrami, które najsilniej wpływają na wartość temperatury mieszanki na powierzchni, są:
 - natężenie przepływu – od którego zależy czas przebiewania porcji płynu w odwiercie;
 - skład mieszanki – od którego zależy jej pojemność cieplna.
2. Z uwagi na fakt, że ciepło właściwe dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym jest niższe od ciepła właściwego solanki (równe około 1/3 ciepła właściwego wody), moc cieplna produkcyjnego otworu geotermalnego eksploatującego sam dwutlenek węgla w stanie nadkrytycznym jest odpowiednio niższa.
3. Czynniki niewątpliwie mający wpływ na wielkość temperatury, ale niepoddany głębszej analizie w powyższym przykładzie obliczeniowym jest stopień izolacji cieplnej odwiertu oraz jego konstrukcja. Próba uwzględnienia bardziej złożonej konstrukcji odwiertu wymaga modyfikacji, rozbudowania algorytmu obliczeniowego.
4. W przypadku wykorzystania dwutlenku węgla jako medium roboczego przy pozyskiwaniu energii geotermalnej ze szcerpanych złóż węglowodorów możliwe jest uzyskanie dodatkowych objętości gazu (metanu) czy ropy naftowej jako efektu ubocznego zatłaczania CO₂ do przestrzeni porowej złoża. W przedstawionym sposobie określania temperatury mieszanki odbieranej z otworów geotermalnych możliwe jest uwzględnienie innego (rozszerzonego) jej składu.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie metodyki oceny rozkładu temperatury w produkcyjnym otworze geotermalnym*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0060/SI/2022, nr archiwalny: DK-4100-0048/2022.

Literatura

- Allam R., Scott M., Forrest B., Fetvedt J., Lu X., Freed D., Brown B., Sasaki T., Itoh M., Manning J., 2017. Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. *Energy Procedia*, 114: 5948–5966. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1731.
- Aydin H., Meray S., 2021. Potential of geothermal energy production from depleted gas fields: A case study of Dodan Field, Turkey. *Renewable Energy*, 164: 1076–1088. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.057.
- Barbier E., 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2): 3–65. DOI: 10.1016/S1364-0321(02)00002-3.
- Brown D.W., 2000. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water. *Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 24–26, 2000*. SGP-TR-165.
- Bushbeck T.A., Bielicki J.M., Randolph J.B., 2017. CO₂ Earth Storage: Enhanced geothermal energy and water recovery and energy storage. *Energy Procedia*, 114: 6870–6879. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1615.
- Cui G., Ren S., Dou B., Ning F., 2021. Geothermal energy exploitation from depleted high-temperature gas reservoirs by recycling CO₂: The superiority and existing problems. *Geoscience Frontiers*, 12(6): 101078. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.08.014.
- Esteves A.F., Santos F.M., Pires J.C.M., 2019. Carbon dioxide as geothermal working fluid: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114: 109331. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109331.
- Gambill W.R., 1959. How to estimate mixtures viscosities. *Chemical Engineering*, 66: 151–152.
- Heidarian E., Hatami T., Rahimi M., Moghadasi J., 2011. Viscosity of pure carbon dioxide at supercritical region: Measurements and correlation approach. *The Journal of Supercritical Fluids*, 56(2): 144–151. DOI: 10.1016/j.supflu.2010.12.006.
- Hobler T., 1971. Ruch ciepła i wymienniki. *Wydawnictwo Nauk Technicznych, Warszawa*.
- Keller H.H., Coach E.J., Berry P.M., 1973. Temperature distribution in circulating mud columns. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 13: 23–30. DOI: 10.2118/3605-PA.
- Maples R.E., 2000. Petroleum Refinery Process Economics. *Penn Well*. ISBN 9780878147793.
- National Institute of Standards and Technology. <<https://webbook.nist.gov/>> (dostęp: 10.07.2022).
- Pruess K., 2006. Enhanced geothermal systems using CO₂ as working fluid – a novel approach for generating renewable energy with simulation sequestration of carbon. *Geothermics*, 35(4): 351–367. DOI: 10.1016/j.geothermics.2006.08.002.
- Pruess K., 2008. On production behavior of enhanced geothermal systems with CO₂ as working fluid. *Energy Conversion and Management*, 49(6): 1446–1454. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.12.029.
- Szarka Z., Bobok E., 2012. Determination of the temperature distribution in circulating drilling fluid. *Geoscience and Engineering*, 1: 37–47.
- Szpunar T., Budak P., 2013. Uproszczony ilościowy opis procesu wymiany ciepła w otworze wiertniczym pomiędzy cyrkulującą płuczką a górotworem. *Nafta-Gaz*, 69(11): 814–820.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR
Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.szpunar@inig.pl



Mgr inż. Marcin MAJKRZAK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Inżynierii Naftowej
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.majkrzak@inig.pl