

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak

Institut Nafty i Gazu

Uproszczony ilościowy opis procesu wymiany ciepła w otworze wiertniczym pomiędzy cyrkulującą płuczką a górotworem

W artykule podano opis modelu matematycznego wymiany ciepła pomiędzy cyrkulującą w otworze wiertniczym płuczką a górotworem dla ustalonego stanu tego procesu. Równania modelu wyprowadzono, układając bilans przyjmowanych i oddawanych ilości ciepła przez elementarny pierścień przestrzeni pierścieniowej oraz płytkę przewodu wiertniczego o grubości dz pomiędzy chwilą t a $t + dt$. Założono, że temperatura górotworu na ścianie otworu wiertniczego równa jest temperaturze wynikającej z gradientu geotermicznego, znane są temperatury płuczki wpływającej i wypływającej z otworu oraz natężenie przepływu, ciepło właściwe i szereg innych parametrów płuczki. Skonstruowano program obliczeniowy pozwalający na określenie rozkładu temperatur płuczki w przewodzie i w przestrzeni pierścieniowej w funkcji głębokości, a w celu weryfikacji poprawności modelu wykonano obliczenia dla jednego z otworów wierconych na Niżu Polskim. Stwierdzono zadowalającą zgodność temperatur pomierzonych z obliczonymi.

Słowa kluczowe: bilans cieplny, współczynnik przenikania ciepła, ciepło właściwe, przewodność cieplna.

A simplified quantitative approach to the problem of stationary heat exchange in boreholes

The paper presents a simple mathematical model of the heat exchange process between wellbore rocks and mud circulating in drill pipe and annulus. The equations of the model were derived by considering the amount of heat accepted and transferred from the elementary ring element of mud in annulus and the elementary plate of mud in the drill pipe, having thickness dz , between moment t , $t + dt$. It was assumed that:

- wellbore wall temperature is the linear function of depth and remains constant,
- temperatures of mud entering and leaving the wellbore are known,
- mud flow rate and other mud parameters are also known.

A computer program based on the presented model was used to check the viability of the presented approach. The calculation results for one of the wells drilled in the Polish Lowland area indicated acceptable compatibility between calculated and measured temperatures of mud circulating in the well.

Key words: heat balance, heat transmission coefficient, specific heat value, thermal conductivity.

Wstęp

Wiercenie głębokich otworów, zwłaszcza w rejonach o wysokim gradiencie geotermicznym, wymaga użycia sprzętu, płuczek wiertniczych oraz zaczynów cementowych odpornych na oddziaływanie wysokich temperatur [1]. Oddziaływanie takie szczególnie silnie może odbić się na funkcjonowaniu części niemetalicznych wyposażenia wglębnego, takich jak

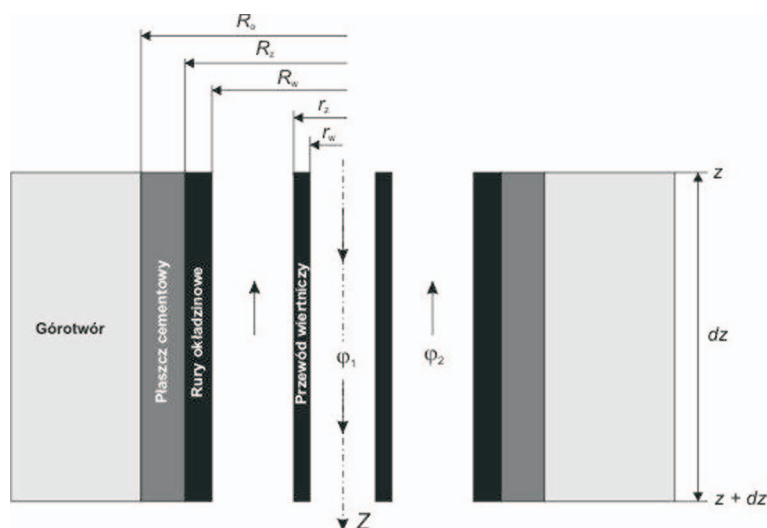
uszczelnienia, elementy gumowe pakerów i tym podobne. Znajomość temperatury, na którą mogą być narażone takie elementy, jest konieczna dla ich właściwego doboru.

Płuczka zatłaczana przez pompy do otworu nagrzewa się podczas ruchu w dół w przewodzie wiertniczym, przejmując ciepło od płuczki o wyższej temperaturze w przestrzeni pier-

ścieniowej. Przekazywanie ciepła odbywa się przez ściankę przewodu wiertniczego, a ilość przekazywanego ciepła zależy od współczynnika przejmowania ciepła, czyli od przewodności cieplnej stali, charakteru przepływu w przestrzeni pierścieniowej i przewodzie oraz parametrów płuczki i natężenia przepływu. Wpływając do przestrzeni, płuczka nadal ogrzewa się, przejmując ciepło od nieorurowanego górotworu lub poprzez płaszcz cementowy i rury okładzinowe. Podobnie jak w przypadku płuczki w przewodzie – ilość przekazywanego ciepła zależy od różnicy temperatur pomiędzy płuczka a górotworem na danej głębokości, od charakteru przepływu płuczki oraz od jej parametrów. Płuczka o podwyższonej temperaturze, płynąc w górę przestrzeni pierścieniowej, cały czas oddaje ciepło do płuczki w przewodzie, pobierając je równocześnie od górotworu, a na pewnej głębokości napotyka na warstwy górotworu o temperaturze niższej od swojej i zaczyna przekazywać ciepło do górotworu, czyli zmienia się kierunek przepływu ciepła. Tak więc w stanie ustalonym wymiany ciepła płuczka osiąga najwyższą temperaturę w przestrzeni pierścieniowej na pewnej głębokości ponad dnem otworu.

Sposób określania temperatury płuczki w otworze w funkcji głębokości, gradientu geotermicznego, konstrukcji otworu oraz natężenia przepływu w warunkach stanu ustalonego wymiany ciepła

Celem niniejszego artykułu jest podanie prostego sposobu wyznaczania temperatury płuczki na określonej głębokości podczas jej cyrkulacji w otworze. W tym celu rozpatrujemy sytuację przedstawioną poglądowo na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat elementarnego odcinka otworu

Płuczka zatłaczana do przewodu wiertniczego płynie w dół, a następnie wpływa do przestrzeni pierścieniowej, gdzie zmienia kierunek przepływu i wypływa z otworu. Przez cały czas przebywania w otworze wymienia ona

Opracowanie metody określania wielkości zmian temperatury płuczki w otworze w funkcji głębokości, gradientu geotermicznego oraz natężenia przepływu płuczki, podobnie jak określenie czasu, po jakim temperatura w otworze rośnie do wielkości, jaką można tolerować, ma zasadnicze znaczenie przy doborze określonej receptury płuczki do wiercenia danego otworu, szczególnie w przypadku, gdy temperatura wynikająca z gradientu geotermicznego jest zbyt wysoka do utrzymania stabilności parametrów tej płuczki. Uwaga ta dotyczy szczególnie sytuacji, gdy temperatura płuczki cyrkulującej w otworze nie powoduje zmiany jej parametrów reologicznych w stanie ustalonym wymiany ciepła, natomiast zaprzestanie cyrkulacji powoduje, po pewnym czasie, podniesienie się jej temperatury – w wyniku wymiany ciepła z górotworem – do poziomu, w którym występuje żelowanie oraz utrata stabilności, w wyniku których płuczka przestaje spełniać swoje zadania. Zmiana parametrów reologicznych na skutek oddziaływania wysokich temperatur może spowodować wypadanie materiału obciążającego, niemożność wnoszenia urobku i w konsekwencji poważne awarie wiertnicze.

ciepło z otoczeniem. Wymiana ciepła ma miejsce zarówno pomiędzy płuczka a górotworem, jak i pomiędzy płuczka w przestrzeni pierścieniowej i płuczka w przewodzie wiertniczym.

Temperaturę płuczki podczas cyrkulacji można określić, rozpatrując ilości ciepła przyjmowane i oddawane do elementarnej płytki pomiędzy głębokością z i $z + dz$ oraz pomiędzy chwilą t i $t + dt$ (rysunek 1). Zakładamy, że ze względu na nieskończoną dużą pojemność cieplną górotworu **na ścianie otworu poza rurami panuje niezaburzona temperatura wynikająca z gradientu geotermicznego $T_{gor}(z) = az + T_0$ lub rozkład tej temperatury jest znany i można go aproksymować znaną funkcją**, na przykład wielomianem. Zakładamy również, że temperatury płuczki w przestrzeni pierścieniowej φ_2 oraz w przewodzie φ_1 są funkcjami głębokości z i czasu t .

Bilans przyjętych i oddawanych ilości ciepła dla elementarnego pierścienia przestrzeni pierścieniowej oraz elementarnej płytki płuczki w przewodzie pomiędzy głębokością z i $z + dz$ oraz chwilą t i $t + dt$ można sformułować następująco:

Ilość ciepła przekazywana od górotworu do elementarnej płytki płuczki w przestrzeni pierścieniowej otworu o grubości dz pomiędzy chwilą t a $t + dt$ równa jest:

$$C_1 [T_{gor}(z) - \varphi_2(z,t)] dz dt \quad (1)$$

gdzie: C_1 wyraża się wzorem $C_1 = \frac{1}{R_1}$, a R_1 równe jest:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\lambda_c \ln \frac{R_o}{R_z}} + \frac{1}{\lambda_s \ln \frac{R_z}{R_w}} + \frac{1}{\alpha_{Rw} R_w} \right) \quad (2)$$

gdzie:

λ_c – współczynnik przewodności płaszczka cementowego [W/m·stopień],

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

α_{Rw} – współczynnik przenikalności cieplnej od wewnętrznej ścianki rury [W/m²·stopień],

R_o – promień otworu lub promień zewnętrzny płaszczka cementowego [m],

R_z – promień zewnętrzny kolumny rur okładzinowych [m],

R_w – promień wewnętrzny kolumny rur okładzinowych [m].

Ilość ciepła zmagazynowaną w elementarnym pierścieniu o objętości $dv = \pi(R_w^2 - r_z^2) dz$ pomiędzy chwilą t a $t + dt$ można wyrazić wzorem:

$$\left[c\rho \left(\varphi_2 + \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} dt \right) - c\rho \varphi_2 \right] dv = \pi(R_w^2 - r_z^2) c\rho \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} dz dt \quad (3)$$

Jeżeli z jest funkcją t , to $\varphi_2(z,t)$ zależy tylko od z :

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \quad (4)$$

c – ciepło właściwe płuczki,

ρ – gęstość płuczki,

a $\frac{\partial \varphi_2}{\partial t}$ jest to prędkość przyrostu temperatury w pierścieniu płynu o grubości dz podczas ruchu płynu ze średnią prędkością v .

Ilość ciepła doprowadzana w wyniku przewodzenia do elementarnego pierścienia płynu przez jego podstawę w kierunku ruchu płuczki w czasie dt równa jest:

$$K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right)_{z+dz} dt \quad (5)$$

gdzie K – współczynnik przewodności cieplnej w płuczce.

Podobnie wyrażenie:

$$K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \right)_z dt \quad (6)$$

równe jest ilości ciepła odprowadzanego przez górną po-

wierzchnię pierścienia w kierunku ruchu płuczki w czasie dt . Możemy zatem przyjąć, że w pierścieniu zostaje zatrzymane ciepło równe różnicy (5) i (6) czyli:

$$K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} \right) dz dt \quad (7)$$

Ilość ciepła przekazywaną od elementu pierścieniowego $dV = \pi(R_w^2 - r_z^2) dz$ płuczki do elementarnej płytki w przewodzie wiertniczym pomiędzy chwilą t a $t + dt$ można wyrazić wzorem:

$$C_2(\varphi_2 - \varphi_1) dz dt \quad (8)$$

gdzie $C_2 = 1/R_2$,

$$R_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{rz} r_z} + \frac{1}{\lambda_s \ln \frac{r_z}{r_w}} + \frac{1}{\alpha_{rw} r_w} \right) \quad (9)$$

gdzie:

α_{rz} – współczynnik przenikania ciepła od zewnętrznej ścianki rur okładzinowych [W/m²·stopień],

r_z – promień zewnętrzny rur płuczkowych [m],

r_w – promień wewnętrzny rur płuczkowych [m],

α_{rw} – współczynnik przenikania ciepła od wewnętrznej ścianki rury [W/m²·stopień].

Równanie bilansu ciepła doprowadzonego do i odprowadzanego z elementarnego pierścienia w przestrzeni pierścieniowej otworu pomiędzy z a $z + dz$ oraz pomiędzy chwilą t i $t + dt$ można sformułować następująco:

Ciepło przekazywane lub oddawane przez górotwór do elementarnego pierścienia płuczki w przestrzeni pierścieniowej minus ciepło odprowadzone w wyniku przewodzenia równe jest ciepłu zatrzymanemu w pierścieniu plus ciepłu odprowadzonemu z tego pierścienia, co można zapisać:

$$C_1 [T_{gor}(z) - \varphi_2(z,t)] dz dt + K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} \right) dz dt = \pi(R_w^2 - r_z^2) c\rho \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \right) dz dt + C_2(\varphi_2 - \varphi_1) dz dt \quad (10)$$

Uwzględniając wzór (4) oraz przyjmując, że dla cząsteczki płuczki poruszającej się ku górze zachodzi:

$$\frac{dz}{dt} = -v_2 \quad (11)$$

otrzymamy z (10):

$$C_1 [T_{gor}(z) - \varphi_2(z,t)] + K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} \right) = \pi(R_w^2 - r_z^2) c\rho (-v_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial t}) + C_2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (12)$$

Podobnie można skonstruować bilans przyjętych i oddanych ilości ciepła dla elementarnej płytki o grubości dz w przewodzie wiertniczym pomiędzy chwilą t i $t + dt$. Ilość ciepła zatrzymana w elemencie $dV = \pi r_w^2 dz$ pomiędzy chwilą t i $t + dt$ jest równa:

$$\left[c\rho\left(\varphi_1 + \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} dt\right) - c\rho\varphi_1 \right] dv = \pi r_w^2 c\rho \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} dt dz \quad (13)$$

Ilość ciepła, która przeniknęła pomiędzy chwilą t a $t + dt$ od płuczki w przestrzeni do płytki w przewodzie wiertniczym, jest równa:

$$C_2(\varphi_2 - \varphi_1) dz dt \quad (14)$$

gdzie:

$$C_2 = \frac{1}{R_2}; R_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{rz} r_z} + \frac{1}{\lambda_s \ln \frac{r_z}{r_w}} + \frac{1}{\alpha_{rw} r_w} \right) \quad (15)$$

Ilość ciepła odprowadzona w wyniku przewodzenia przez górną powierzchnię płytki pomiędzy t a $t + dt$ jest równa:

$$-K \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \right)_z \pi r_w^2 dt \quad (16)$$

Podobnie wyrażenie:

$$-K \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \right)_{z+dz} \pi r_w^2 dt \quad (17)$$

określa ilość ciepła przenikającego przez podstawę elementarnej płytki w kierunku przepływu płuczki pomiędzy czasem t a $t + dt$, a zatem ciepło zatrzymane w płytce można wyrazić wzorem:

$$K \left(\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2} \right) \pi r_w^2 dt \quad (18)$$

jako różnicę (16) i (17).

Równanie bilansu cieplnego dla elementarnej płytki ma zatem postać:

$$\pi r_w^2 c\rho \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} dz dt = C(\varphi_2 - \varphi_1) dz dt + K \left(\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2} \right) \pi r_w^2 dz dt \quad (19)$$

Jeżeli z jest funkcją t , to $\varphi_1 = \varphi_1(z, t)$ jest tylko funkcją t i słuszny jest wzór:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} \quad (20)$$

Dla cząsteczki płuczki poruszającej się w dół obowiązuje zależność:

$$\frac{dz}{dt} = v_1 \quad (21)$$

a więc podstawiając (21) do (20) i do (19), otrzymamy:

$$\pi r_w^2 c\rho \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} v_1 + \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} \right) = C_2(\varphi_2 - \varphi_1) + K\pi r_w^2 \left(\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2} \right) \quad (22)$$

Równanie (22) dla stanu ustalonego wymiany ciepła ma zatem postać:

$$\pi r_w^2 c\rho v_1 \left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \right) = C_2(\varphi_2 - \varphi_1) + K\pi r_w^2 \left(\frac{\partial^2\varphi_1}{\partial z^2} \right) \quad (23)$$

Równania (22) i (12) stanowią matematyczny opis procesu ustalonej wymiany ciepła pomiędzy płuczką w przestrzeni a górotworem oraz pomiędzy płuczką w przestrzeni a płuczką w przewodzie. Ponieważ rozpatrujemy stan ustalony, zatem $\frac{\partial\varphi_1}{\partial t} = \frac{\partial\varphi_2}{\partial t} = 0$. Zakładamy również, że ilości ciepła zatrzymane w elementarnej płytce w przewodzie i elementarnym pierścieniu w przestrzeni pierścieniowej otworu w wyniku przewodzenia w kierunku ruchu płuczki są pomijalnie małe,

jak przyjęto np. w [6], a zatem wielkości $K\pi r_w^2 \left(\frac{d^2\varphi_1}{dz^2} \right)$ oraz $K\pi(R_w^2 - r_z^2) \left(\frac{d^2\varphi_2}{dz^2} \right)$ można pominąć i równania (23) i (12) uproszczą się do postaci:

$$C_1[T_{gor}(z) - \varphi_2(z)] = C_2(\varphi_2 - \varphi_1) - \pi(R_w^2 - r_z^2)c\rho v_2 \left(\frac{d\varphi_2}{dz} \right) \quad (24)$$

$$\pi r_w^2 c\rho v_1 \left(\frac{d\varphi_1}{dz} \right) = C_2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (25)$$

Przyjmujemy, że rozkład temperatury na ścianie otworu pod płaszczem cementowym i rurami okładzinowymi jest liniowy i można go aproksymować wzorem:

$$T_{gor} = az + T_0 \quad (26)$$

gdzie:

a – gradient geotermiczny [K/m],

T_0 – temperatura wierzchnich warstw górotworu [K].

Słuszna jest również zależność:

$$\pi(R_w^2 - r_z^2)v_2 = \pi r_w^2 v_1 = Q \quad (27)$$

Obliczając $\varphi_2(z)$ z równania (25) i podstawiając do (24), otrzymamy, uwzględniając (27), proste równanie różniczkowe:

$$\frac{E^2}{C_1 C_2} \left(\frac{d^2\varphi_1}{dz^2} \right) - \frac{E}{C_2} \left(\frac{d\varphi_1}{dz} \right) - \varphi_1(z) = -az - T_0 \quad (28)$$

którego rozwiązaniem jest:

$$\varphi_1(z) = D_1 e^{r_1 z} + D_2 e^{r_2 z} + az + T_0 - \frac{E}{C_2} a \quad (29)$$

gdzie:

$$r_1 = \frac{\frac{E}{C_2} + \sqrt{\left(\frac{E}{C_2}\right)^2 + 4\left(\frac{E^2}{C_1 C_2}\right)}}{2\left(\frac{E^2}{C_1 C_2}\right)} \quad (30)$$

$$r_2 = \frac{\frac{E}{C_2} - \sqrt{\left(\frac{E}{C_2}\right)^2 + 4\left(\frac{E^2}{C_1 C_2}\right)}}{2\left(\frac{E^2}{C_1 C_2}\right)} \quad (31)$$

a $E = C \left[\frac{J}{kg \cdot stopien} \right] \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$, gdzie $J = W \cdot s$, natomiast zgodnie z (25):

$$\varphi_2(z) = D_1 e^{r_1 z} \left(1 + \frac{E}{C_2} r_1 \right) + D_2 e^{r_2 z} \left(1 + \frac{E}{C_2} r_2 \right) + az + T_0 \quad (32)$$

Stałe D_1 i D_2 wyznaczamy, zakładając, że (A):

temperatura płuczki wpływającej do otworu jest znana:

$$\varphi_1(z=0) = T_{in} (^{\circ}K) \quad (33)$$

na spodzie otworu temperatury płuczki w przewodzie i przestrzeni są sobie równe z racji kontaktu:

$$\varphi_1(H) = \varphi_2(H) \quad (34)$$

gdzie:

H [m] – głębokość otworu.

Dla takich warunków brzegowych stałe D_1 i D_2 równe są:

$$D_1 = T_{in} - T_0 - D_2 + \frac{E}{C_2} a \quad (35)$$

$$D_2 = \frac{\left(T_{in} - T_0 + \frac{E}{C_2} a \right) r_1 e^{r_1 H} + a}{r_1 e^{r_1 H} - r_2 e^{r_2 H}} \quad (36)$$

Jeżeli natomiast założymy, że (B):

temperatury płuczki wpływającej i wypływającej z otworu są znane z pomiarów, czyli:

$$\varphi_1(z=0) = T_{in} \quad (37)$$

$$\varphi_2(z=0) = T_{out} \quad (38)$$

to dla takiego przypadku stałe D_1 i D_2 równe będą:

$$D_1 = T_{in} - T_0 - D_2 + \frac{E}{C_2} a \quad (39)$$

$$D_2 = \frac{T_{out} - T_0 - \left(T_{in} - T_0 + \frac{E}{C_2} a \right) \left(1 + \frac{E}{C_2} r_1 \right)}{\frac{E}{C_2} (r_2 - r_1)} \quad (40)$$

Sensowne byłyby również założenia, że (C):

znana jest temperatura płuczki wypływającej z otworu:

$$\varphi_2(0) = T_{out} \quad (41)$$

na spodzie otworu temperatury płuczki w przewodzie i przestrzeni są sobie równe:

$$\varphi_1(H) = \varphi_2(H) \quad (42)$$

w takim przypadku stałe D_1 i D_2 wyrażają się wzorami:

$$D_2 = \frac{a \left(1 + \frac{E}{C_2} r_1 \right) + (T_{out} - T_0) r_1 e^{r_1 H}}{r_1 e^{r_1 H} \left(1 + \frac{E}{C_2} r_2 \right) - r_2 e^{r_2 H} \left(1 + \frac{E}{C_2} r_1 \right)} \quad (43)$$

oraz

$$D_1 = \frac{T_{out} - T_0 - D_2 \left(1 + \frac{E}{C_2} r_2 \right)}{\left(1 + \frac{E}{C_2} r_1 \right)} \quad (44)$$

Uwagi dotyczące wyników obliczeń rozkładu temperatur w otworze

W tabelicy 1 podano podstawowe dane dotyczące temperatur pomierzonych na spodzie jednego z otworów wierconych na Niżu Polskim w interwale 4145÷4891 m, wraz z odpowiadającymi im temperaturami płuczki wpływającej i wypływającej z otworu dla podanego natężenia przepływu płuczki. Na rysunku 2 pokazano przykładowo wykres przebiegu temperatury w funkcji głębokości w stanie ustalonym wymiany, obliczony na podstawie prezentowanego modelu, gdy głębokość otworu wynosiła 4436 m. Obliczenia

wykonano za pomocą programu komputerowego TemProg, skonstruowanego na bazie podanego w artykule modelu.

Zdaniem autorów obliczone zmiany temperatur płuczki w przestrzeni pierścieniowej i przewodzie w funkcji głębokości, pokazane na rysunku 2, należy uznać za sensowne i w przybliżeniu zgodne z wynikami pomiarów.

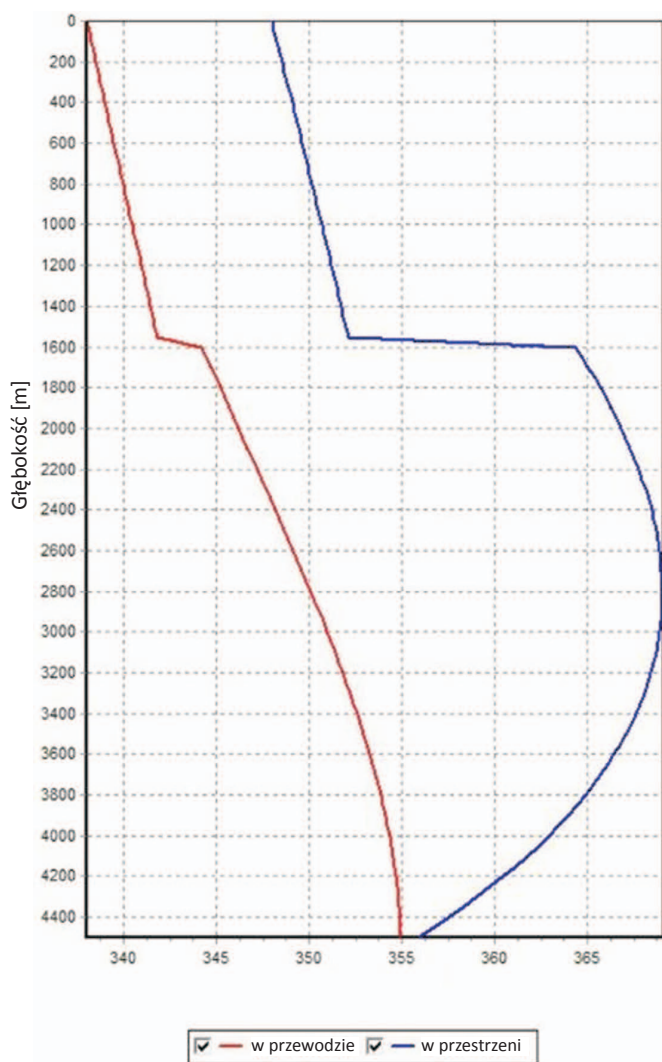
Istotnie – płuczka o znanej pomierzonej temperaturze T_{in} wpływa do przewodu wiertniczego i ogrzewa się podczas ruchu w dół, pobierając przez ściankę przewodu ciepło od

Tablica 1. Dane dotyczące temperatur płuczki

Głębokość	Natężenie przepływu płuczki	Obliczona temperatura płuczki		Gęstość płuczki	Maksymalna zmierzona temperatura w otworze
		wpływającej	wypływającej		
[m]	[l/min]	[°K]	[°K]	[kg/m ³]	[°K]
4145	40,4	336,2	343,0	1450	368
4196	40,9	334,0	343,9	1450	371
4208	40,9	333,2	342,9	1450	367
4234	42,2	334,6	345,3	1450	367
4262	42,2	335,4	344,4	1450	372
4349	40,3	336,2	344,8	1450	370
4379	40,6	338,1	347,6	1450	374
4408	40,8	337,6	347,9	1450	375
4436	40,6	335,6	346,6	1440	377
4465	40,6	336,0	348,8	1450	379
4494	40,3	336,7	347,0	1450	375
4523	40,8	337,5	348,9	1450	374
4701	38,1	343,9	350,2	1450	368
4762	37,1	344,7	351,0	1470	367
4816	36,7	347,5	352,5	1490	371
4843	36,9	347,7	352,6	1490	371
4853	37,1	346,1	350,9	1480	371
4863	37,1	347,5	352,2	1490	373
4870	37,1	348,2	352,4	1480	371
4883	38,1	347,0	351,6	1490	371
4891	38,1	347,2	352,7	1490	372

gorącej płuczki w przestrzeni pierścieniowej. Intensywność poboru ciepła zależy od przewodności stali przewodu, która jest wysoka, oraz od liczby Reynoldsa, a zatem natężenia przepływu i lepkości, od liczby Prandtla, średnicy przewodu itp. Każda zmiana średnicy przewodu zmienia zatem wielkość współczynnika przejmowania ciepła przez płuczkę w przewodzie i wpływa na jej temperaturę. Spadek temperatury płuczki na głębokości 1600 metrów wynika ze zmiany współczynnika przejmowania ciepła, co związane jest ze zmianą średnicy otworu, a zatem liczby Reynoldsa, Prandtla itp. Podczas ruchu w dół płuczka w przewodzie cały czas ogrzewa się, pobierając ciepło od płuczki w przestrzeni przez ściankę przewodu wiertniczego. Po dopłynięciu do spodu otworu płuczka wpływa do przestrzeni pierścieniowej – na ogół do niezarurowanego odcinka otworu – gdzie jej temperatura nadal podnosi się w miarę przemieszczania się ku górze w wyniku wymiany ciepła z nieosłoniętym górotworem. Generalnie intensywność wymiany ciepła, czyli nagrzewania się płuczki, jest najwyższa w przypadku niezarurowanego górotworu. Przemieszczając się dalej ku górze, płuczka, nagrzana w głębokich warstwach, napotyka

na mniejszych głębokościach na warstwy o temperaturze niższej od swojej, co powoduje, że oddaje ciepło zarówno do górotworu, jak i do płuczki w przewodzie, w wyniku czego jej temperatura zaczyna się obniżać. Wynika stąd, że na ogół płuczka w przestrzeni pierścieniowej osiąga najwyższą temperaturę w pewnej głębokości ponad spodem otworu (w tym przypadku do 2600 metrów), która zależy od szeregu czynników omówionych w opracowaniu. W momencie wpływu płuczki do przestrzeni pierścieniowej na odcinku zarurowanym obserwowany jest szybki spadek temperatury płuczki, gdyż dopływ ciepła z górotworu zostaje drastycznie zmniejszony w wyniku spadku współczynnika przejmowania ciepła spowodowanego wzrostem średnicy otworu, a zatem spadkiem liczby Reynoldsa, oraz odizolowaniem górotworu przez rury i płaszcz cementowy. Płuczka w przestrzeni pierścieniowej zarurowanego otworu praktycznie nie pobiera ciepła od górotworu, natomiast intensywnie oddaje ciepło do płuczki w przewodzie wiertniczym na skutek drastycznego wzrostu współczynnika przenikania ciepła, spowodowanego wzrostem liczby Reynoldsa, Prandtla itp., w wyniku czego jej temperatura gwałtownie spada. W momencie wpływu na



Rys. 2. Temperatura płuczki w otworze w funkcji głębokości

Literatura

[1] Debinska E.: *Ocena działania dodatków opóźniających czas wiązania zaczynów cementowych na podstawie badań laboratoryjnych*. Nafta-Gaz 2012, nr 4, s. 225–232.

[2] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*. Warszawa, PWN, 1968.

[3] Kabir C. S., Hasan A. R. i in.: *Determining circulating fluid temperature in drilling, workover and well-control operations*. SPE Drilling & Completion 1996, vol. 11, no. 2.

[4] Keller H. H., Couch E. J i in.: *Temperature distribution in circulating mud column*. SPE Journal 1973, vol. 13, no. 1.

[5] Raymond L. R.: *Temperature distribution in a circulating drilling fluid*. Journal of Petroleum Technology 1969, vol. 21, no. 3.

[6] Szarka Z., Bobak E.: *Determination of the temperature distribution in a circulating drilling fluid*. Geoscience and Engineering 2012, vol. 1, no. 1, s. 37–47.

[7] Szpunar T.: *Analityczne ujęcie problemu ustalonej wymiany ciepła w otworach wiertniczych*. Archiwum Górnictwa 1979, t. 24, z. 2.

[8] Tragesser A. F., Crawford P. B. i in.: *A method for calculating circulating temperatures*. Journal of Petroleum Technology 1967, vol. 19, no. 11.



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



Mgr inż. Paweł BUDAK
 Starszy specjalista naukowo-badawczy, kierownik
 Zakładu Inżynierii Naftowej.
 Instytut Nafty i Gazu
 ul. Lubicz 25A
 31-503 Kraków
 E-mail: budak@inig.pl

powierzchnię temperatura płuczki wypływającej z przestrzeni pierścieniowej jest o kilka do nawet kilkudziesięciu stopni wyższa od temperatury płuczki włączanej do przewodu. Wielkość tego wzrostu temperatury zależy od szeregu czynników omówionych w artykule oraz od wielkości gradientu geotermicznego.

Obliczone na podstawie prezentowanego modelu temperatury są o kilkanaście stopni niższe od pomierzonych (tablica 1), co można wyjaśnić w sposób następujący:

- przed pomiarem temperatury podciągano przewód na odcinku około 50 metrów oraz zapuszczano termometr, czyli pomiar temperatury wykonywany był po pewnym czasie, co powodowało dodatkowe nagrzewanie się płuczki; brak jest danych na temat czasu, przez jaki płuczka pozostawała w otworze bez cyrkulacji,
- w obliczeniach przyjęto ciepło właściwe dla wody, które jest wysokie; przyjęcie niższej wartości ciepła właściwego sprawi, że obliczone temperatury będą wyższe.

Model matematyczny wymiany ciepła oparto na modelu opisanym w pracy [7], do którego wprowadzono szereg modyfikacji oraz przyjęto odmienne założenia.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2013, nr 10, s. 814–820

Artykuł powstał na podstawie zlec. 631/SI/12; nr arch. DK-4100-129/12, finansowanego przez MNiSW.