

Władysław Duliński*, Czesława Ewa Ropa*

ANALIZA I USTALENIE PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH DLA ODWIERTÓW WÓD MINERALNYCH W ZALEŻNOŚCI OD WIELKOŚCI WYKŁADNIKA GAZOWEGO

1. WSTĘP

Wody mineralne nagazowane dwutlenkiem węgla, ujmowane otworami, charakteryzują się bardzo dużym zróżnicowaniem w zakresie mineralizacji, wydajności wody i gazu oraz warunków energetycznych. W związku z powyższym każdy obiekt należy traktować indywidualnie w aspekcie możliwości eksploatacyjnych oraz przeznaczenia wody i ewentualnego wykorzystania wydobywanego wraz z wodą dwutlenku węgla [1].

O możliwości wydobycia samoczynnego z danego odwiertu decyduje głównie wielkość wykładnika gazowego i poziom dynamiczny wody w odwiercie. Ponieważ proces wydobycia wody i gazu zaczyna się już w złożu istotnym jest, czy przez ośrodek porowaty przepływa płyn nieściśliwy, czy też ciecz i gaz.

W odwiertach o małych i średnich wykładnikach gazowych, do których należy rozpatrywany odwiert X, ciśnienie nasycenia posiada małą wartość, zwykle mniejszą od ciśnienia złożowego. W takim przypadku mamy do czynienia z przepływem, zarówno w złożu, jak i dopływem do odwiertu, płynu nieściśliwego.

2. CHARAKTERYSTYKA EKSPLOATACYJNA ODWIERTU X Z WODĄ MINERALNĄ

Przykładowy otwór X, o średnim wykładniku gazowym, posiada głębokość 152 m, w którym maksymalne ciśnienie głowicowe statyczne wynosi $P_{gs} = 3,7$ bara. Poziom wody w odwiercie w czasie próbnych pompowań, przy wydobyciu $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ wody, wyniósł 16,0 m od głowicy odwiertu.

Wodę z odwiertu scharakteryzowano jako 0,38% szczawę wodorowęglanowo-wapniowo-magnezowo-żelazistą. Wraz z wodą mineralną wydobywany jest dwutlenek węgla

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

rozpuszczony w wodzie w ilości $2,350 \text{ g/dm}^3$ przy temperaturze wody $+10^\circ\text{C}$ oraz dwutlenek węgla określony wykładnikiem gazowym $WG = 4,6 \div 4,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

2.1. Określenie ciśnienia nasycenia

Dla wyznaczenia ciśnienia nasycenia w odwiercie konieczne jest przeprowadzenie podstawowych pomiarów hydrodynamicznych, a w szczególności pomiaru ilości wydobywanej wody i gazu, statycznego i dynamicznego poziomu wody w odwiercie, statycznego i dynamicznego ciśnienia głowicowego, temperatury wody i gazu oraz pomiaru zawartości rozpuszczonego w wodzie dwutlenku węgla.

W odwiertach o małych wykładnikach gazowych celowe jest zainstalowanie przewodu gazowego, równoległe z przewodem wydobywczym, ułatwiającego uruchomienie eksploatacji.

Przyjmując wielkość wykładnika gazowego $WG = 4,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ oraz ilość rozpuszczonego w wodzie CO_2 , przy temperaturze $+10^\circ\text{C}$ i ciśnieniu atmosferycznym, równą $2,350 \text{ g/dm}^3$, obliczono sumaryczną ilość dwutlenku węgla wydobywanego wraz z wodą z odwiertu X:

$$a = a_1 + a_2 \quad (1)$$

gdzie:

- a – sumaryczna ilość CO_2 , g/dm^3 ,
- a_1 – ilość rozpuszczonego w wodzie CO_2 , g/dm^3 ,
- a_2 – ilość CO_2 w stanie wolnym, g/dm^3 .

Wartość a_2 obliczono mnożąc wykładnik gazowy przez gęstość dwutlenku węgla w warunkach normalnych $\rho = 1,976 \text{ g/dm}^3$. Zatem sumaryczna ilość CO_2 wydobywanego z omawianego odwiertu X wynosi $a = 11,83 \text{ g/dm}^3$.

Korzystając następnie z wykresu zależności rozpuszczalności CO_2 w wodzie od ciśnienia i temperatury, odczytano wartość ciśnienia nasycenia $P_{ns} = 5,13 \text{ bara}$ [4].

2.2. Obliczenie ciśnienia dennego ruchowego

Ciśnienie denne ruchowe dla zadanej wydajności równej $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ i depresji $16,0 \text{ m}$ oraz ciśnieniu głowicowym w przestrzeni pierścieniowej odwiertu $P_{gr} = 3,7 \text{ bara}$ obliczono z zależności [7]:

$$P_{dr} = P_{gr} + \gamma_w H_1 + \gamma_g H_2 \quad (2)$$

gdzie:

- P_{dr} – ciśnienie denne ruchowe, Pa,
- P_{gr} – ciśnienie głowicowe ruchowe, Pa,
- H_1 – wysokość słupa wody w odwiercie, m,
- H_2 – wysokość słupa gazu w odwiercie, m,
- γ_w – ciężar właściwy wody, N/m^3 ,
- γ_g – ciężar właściwy gazu, N/m^3 .

Obliczone za pomocą równania (2) ciśnienie denne ruchowe wynosi $P_{dr} = 17,35 \text{ bara}$, zatem jest znacznie większe od ciśnienia nasycenia ($P_{ns} = 5,13 \text{ bara}$), co dowodzi, że odwiertu ze złoża dopływa płyn nieściśliwy.

2.3. Obliczenie spadku ciśnienia w złożu

Spadek ciśnienia złożowego w strefie przyodwiertowej na dopływie do odwiertu obliczono z równania:

$$P_{zl} - P_w = \frac{Q_w \cdot \mu \cdot B}{2\pi \cdot k \cdot h} \left[\ln \frac{r_e}{r_w} - 3/4 + S \right] \quad (3)$$

gdzie:

P_{zl} – ciśnienie złożowe, Pa,

P_w – ciśnienie wypływu do odwiertu, Pa,

Q_w – dopływ wody do odwiertu, m³/s,

μ – lepkość dynamiczna wody, Pa·s,

k – przepuszczalność złoża, m²,

h – miąższość złoża, m,

β – współczynnik objętościowy, bez wym.,

r_e – promień zasięgu odwiertu, m,

r_w – promień odwiertu, m,

S – skin efekt, bez wym. (przy braku uszkodzenia strefy przyodwiertowej można przyjąć $S = 0$).

Obliczenia przeprowadzono dla następujących danych: $P_{zl} = 14,4$ bara, $Q_w = 1; 2; 3$ m³/h, $\mu = 0,001194$ Pa·s, $B = 1$, $k = 50 \cdot 10^{-15}; 75 \cdot 10^{-15}; 100 \cdot 10^{-15}$ m², $h = 58$ m, $r_e = 34$ m, $r_w = 0,15$ m, $S = 0$. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Z zestawienia danych wynika, że największy spadek ciśnienia w strefie przyodwiertowej wynosi 3,098 bara dla przepuszczalności złoża $k = 50 \cdot 10^{-15}$ m² i wydajności odwiertu $Q_w = 3,0$ m³/h. W przypadku mniejszych wydatków i większych przepuszczalności spadki te są mniejsze. Ogólnie, nie są to spadki decydujące o warunkach eksploatacji odwiertu o małym lub średnim wykładniku gazowym

Tabela 1

Zestawienie wyników obliczeń spadków ciśnienia w strefie przyodwiertowej

Q_w [m ³ /h]	$P_{zl} - P_w$ [bar]	P_w [bar]	$P_{zl} - P_w$ [bar]	P_w [bar]	$P_{zl} - P_w$ [bar]	P_w [bar]
	$k = 50 \cdot 10^{-15}$ m ²		$k = 75 \cdot 10^{-15}$ m ²		$k = 100 \cdot 10^{-15}$ m ²	
1	1,033	13,367	0,688	13,712	0,516	13,884
2	2,065	12,335	1,377	13,023	1,033	13,367
3	3,098	11,302	2,065	12,335	1,549	12,851

Dla odwiertów o wysokich wykładnikach gazowych, przy dużych spadkach ciśnienia w strefie przyodwiertowej, ciśnienie wypływu P_w odgrywa istotną rolę, gdyż stanowi podstawę do obliczeń spadku ciśnienia w przewodzie wydobywczym ($P_w = P_1$ w równaniu (4) na obliczenie wysokości podnoszenia mieszaniny wodno-gazowej).

3. OKREŚLENIE WYSOKOŚCI PODNOŻENIA MIESZANINY WODNO-GAZOWEJ W PRZEWODZIE WYDOBYWCZYM

Z uwagi na uciążliwość prac pomiarowych, dla doboru średnicy rur wydobywczych przy zastosowaniu przynajmniej trzech przewodów o różnych średnicach, przeprowadzono obliczenia teoretyczne według równania (4), których wyniki zestawiono w tabeli 2.

$$\begin{aligned}
 H_m = & \frac{1}{\gamma_w} \left[(P_1 - P_b) - \alpha(P_1 - P_b) + \alpha P_{ns} \ln \frac{P_1}{P_b} \right] - \frac{0,0827\lambda Q_w^2}{D_w^5 \gamma_w} \times \\
 & \times \left[\frac{1}{2} \alpha^3 P_{ns}^3 \left(\frac{1}{P_b^2} - \frac{1}{P_1^2} \right) + 3\alpha^2 P_{ns}^2 (1-\alpha) \left(\frac{1}{P_b} - \frac{1}{P_1} \right) + 3\alpha P_{ns} (1-\alpha)^2 \ln \frac{P}{P_b} + (1-\alpha)^3 (P_1 - P_b) \right] - \\
 & + \frac{0,785 D_w^2 w_{sr} \alpha}{Q_w \gamma_w (1-\alpha)} \left[\frac{P_{ns}}{1-\alpha} \ln \frac{(1-\alpha)P_1 + P_{ns}\alpha}{(1-\alpha)P_b + P_{ns}\alpha} - (P_1 - P_b) \right] - \frac{Q_w^2 \alpha^2 P_{ns}^2}{48,36 D_w^4} \left(\frac{2}{\alpha P_{ns}} - \frac{2}{P_{ns}} + \frac{2}{P_1} \right)^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

- H_m – wysokość podnoszenia mieszaniny wodno-gazowej w rurach wydobywczych, m,
- P_1 – ciśnienie w rozpatrywanym przekroju rury wydobywczej, MPa,
- P_{ns} – ciśnienie nasycenia, MPa,
- P_b – ciśnienie barometryczne, MPa,
- γ_w – ciężar właściwy wody, MN/m³,
- α – współczynnik absorpcji Bunsena dla CO₂ w wodzie, m_n³/m³,
- λ – liczba oporu przepływu w rurze wydobywczej, bez wym.,
- Q_w – objętościowy wydatek wody, m³/s,
- D_w – wewnętrzna średnica rury wydobywczej, m,
- w_{sr} – średnia prędkość względna gazu, m/s.

Obliczenia przeprowadzono dla danych: $P_1 = 0,98$ bara; $P_{ns} = 5,13$ bara; $P_b = 0,96$ bara; $\gamma_w = 0,01$ MN/m³; $\alpha = 1,238$ m_n³/m³ – przy temperaturze +10°C; $Q_w = 1; 2; 3$ m³/h; $D_w = 0,025; 0,032; 0,040$ m, wartości w_{sr} oraz λ dla zadanych wydatków i średnic rur wydobywczych zestawiono w tabeli 3. Liczbę oporu przepływu λ oraz średnią prędkość przepływu mieszaniny wodno-gazowej w_{sr} obliczono dla warunków przepływu płynu w przewodzie wydobywczym na odcinku poziom ciśnienia nasycenia – separator [2, 3].

Na podstawie analizy danych z obliczeń zestawionych w tabeli 2 wynika, że do ciągłej eksploatacji samoczynnej w rozpatrywanym obiekcie należy zastosować przewód wydobywczy polietylenowy o średnicy wewnętrznej $D_w = 40$ mm. Przy mniejszych średnicach przewodu wydobywczego drugi człon równania (4), wyrażający opory przepływu, posiada zbyt dużą wartość.

Tabela 2

Wyniki obliczeń wysokości podnoszenia mieszaniny wodno-gazowej w rurach wydobywczych odwiertu X o średnim wykładniku gazowym

D [m]	Q [m ³ /h]	1,0	2,0	3,0
	H [m]			
0,025		6,7	-31,7	-145
0,032		35	38,4	12,2
0,040		29,3	58,1	54,5

Tabela 3

Obliczone wartości w_{sr} oraz λ dla zadanych wydatków i średnic rur wydobywczych w odwiercie X

D [m]	0,025			0,032			0,040		
Q_w [m ³ /h]	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0
w_{sr} [m/s]	2,15	2,43	3,84	1,14	1,48	1,83	0,84	0,94	1,17
λ [-]	0,0255	0,0251	0,0237	0,0262	0,0253	0,0245	0,0263	0,0257	0,0248

4. USTALENIE GŁĘBOKOŚCI ZAPUSZCZENIA LEJA PRODUKCYJNEGO

W przypadku wydobywania samoczynnego, przy wykorzystaniu energii rozprężającego się gazu w wodzie, lej produkcyjny winien być zapuszczony do głębokości ponad panującym ciśnieniem nasycenia, jednak nie głębiej, niż zaczyna się perforacja rur. Dla rozpatrywanego odwiertu przy wydajności $Q_w = 2,4$ m³/h wody, depresji 16,0 m i założeniu, że ciśnienie głowicowe ruchowe w przestrzeni pierścieniowej odwiertu równe jest ciśnieniu atmosferycznemu, przewód wydobywczy winien być zapuszczony do głębokości około 60 m od głowicy odwiertu. Dokładne wyznaczenie głębokości zapuszczenia leja pod poziom dynamiczny wody w odwiercie wymaga znajomości wymienionego wyżej ciśnienia w przestrzeni międzyrurowej oraz obliczenia średniego ciężaru właściwego mieszaniny wodno-gazowej w przedziale poziomu ciśnienia nasycenia – poziom dynamiczny wody w odwiercie.

W praktyce, dla wstępnej oceny możliwości uzyskania z danego odwiertu eksploatacji samoczynnej wody nagazowanej dwutlenkiem węgla, przy określonym wstępnie wykładniku gazowym i znanej różnicy ciśnień między ciśnieniem nasycenia a ciśnieniem na wypływie oraz średnim ciężarem właściwym mieszaniny wodno-gazowej, wysokość podnoszenia oblicza się ze wzoru [5, 6]:

$$H_m = \frac{P_{ns} - P_w}{\gamma_{mś}} \quad (5)$$

gdzie:

- H_m – wysokość podnoszenia bez uwzględnienia oporów przepływu, m,
- P_{ns} – ciśnienie nasycenia ustalone dla warunków ruchowych, Pa,
- P_w – ciśnienie na wypływie (w separatorze), Pa,
- $\gamma_{mś}$ – średni ciężar właściwy mieszaniny wodno-gazowej w rurach wydobywczych, N/m^3 .

Jak zaznaczono wyżej, obliczona na podstawie równania (5) wysokość podnoszenia mieszaniny wodno-gazowej stanowi wskaźnik orientacyjny, gdyż w czasie eksploatacji wysokość ta jest pomniejszona o straty ciśnienia wywołane oporami przepływu [2]. Dla obliczenia średniego ciężaru właściwego mieszaniny wodno-gazowej na długości rury wydobywczej od poziomu ciśnienia nasycenia do wypływu służy następujące równanie:

$$\gamma_{mś} = \frac{1}{(P_1 - P_2)(1 - \alpha)} \left\{ (\gamma_w - \gamma_g \alpha) \left[(P_1 - P_2) + \frac{P_{ns} \alpha}{(1 - \alpha)} \ln \frac{(1 - \alpha) P_2 + P_{ns} \alpha}{(1 - \alpha) P_1 + P_{ns} \alpha} \right] + \frac{P_{ns} \alpha \gamma_g}{(1 - \alpha)} \ln \frac{(1 - \alpha) P_1 + P_{ns} \alpha}{(1 - \alpha) P_2 + P_{ns} \alpha} \right\} \quad (6)$$

gdzie:

- $\gamma_{mś}$ – średni ciężar właściwy mieszaniny wodno-gazowej, MN/m^3 ,
- P_1 – ciśnienie w rozpatrywanym przekroju rur wydobywczych, MPa,
- P_2 – ciśnienie w separatorze ($P_2 = P_s = 0,1$ MPa), MPa,
- P_{ns} – ciśnienie nasycenia, MPa,
- γ_w – ciężar właściwy wody, MN/m^3 ,
- γ_g – ciężar właściwy gazu, MN/m^3 ,
- α – współczynnik absorpcji Bunsena dla CO_2 w wodzie, m_n^3/m^3 .

Obliczony za pomocą równania (6) średni ciężar właściwy mieszaniny wodno-gazowej w przedziale ciśnienie nasycenia – separator, przy wydajności odwiertu $Q_w = 2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ i wykładnika gazowego $WG = 4,8 \text{ m}_n^3/\text{m}^3$, wynosi $\gamma_{mśr} = 0,0054 \text{ MN/m}^3$. Wstawiając tę wartość do równania (5) otrzymano wysokość podnoszenia mieszaniny wodno-gazowej $H_m = 76,85 \text{ m}$.

Przy założeniu ciśnienia atmosferycznego w przestrzeni pierścieniowej w czasie eksploatacji, dla zadanej wydajności odwiertu $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ i przy depresji $16,0 \text{ m}$, ciśnienie nasycenia znajduje się na głębokości $67,1 \text{ m}$ od głowicy odwiertu. Jeżeli ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej będzie wyższe od ciśnienia atmosferycznego, o tą wielkość pomniejszona zostanie głębokość, na której znajduje się ciśnienie nasycenia wody dwutlenkiem węgla.

5. WNIOSKI

- 1) Zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami istnieje możliwość uzyskania ciągłej eksploatacji samoczynnej z rozpatrywanego odwiertu X, przy czym dla zapewnienia bezawaryjnej pracy odwiertu należy przyjąć wydobycie wody nie większe niż $2 \text{ m}^3/\text{h}$.

- 2) Do ciągłej eksploatacji w odwiercie X należy zastosować przewód wydobywczy polietylenowy o średnicy wewnętrznej $D_w = 40$ mm.
- 3) W odwiertach o małym wykładniku gazowym lej produkcyjny winien być zapuszczony na rurach wydobywczych do głębokości nieco powyżej poziomu, w którym panuje ciśnienie nasycenia.

LITERATURA

- [1] Ciężkowski W. i in.: *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*. Wrocław, Wrocławskie Towarzystwo Naukowe 2002
- [2] Duliński W., Ropa C.E.: *Opory przepływu mieszaniny wodno-gazowej w rurach wydobywczych*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, z. 3, 1983
- [3] Duliński W., Ropa C.E.: *Dwutlenek węgla jako czynnik energetyczny w eksploatacji wód mineralnych*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, z. 1, 1985
- [4] Duliński W., Ropa C.E.: *Eksploatacja, własności i zagospodarowanie dwutlenku węgla*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, z. 3, 1994
- [5] Ropa C.E., Duliński W.: *Ustalenie parametrów dla uzyskania eksploatacji ciągłej w odwiercie Zuber III w Krynicy*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 18, z. 1, 2001
- [6] Ropa C.E., Duliński W.: *Wpływ wodno-gazowej struktury na proces eksploatacji wód mineralnych nasyconych CO_2* . Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 19, z. 2, 2002
- [7] Wilk Z.: *Eksploatacja złóż płynnych surowców mineralnych*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1969