

Władysław Duliński*, Czesława Ewa Ropa*

**DOBÓR PARAMETRÓW
DLA OTWOROWEJ EKSPLOATACJI CO₂
W ASPEKTCIE ZABEZPIECZENIA
PRZED TWORZENIEM SIĘ HYDRATÓW**

1. WSTĘP

Problem CO₂ w praktyce może być rozpatrywany w aspekcie eksploatacji i zagospodarowania naturalnego CO₂ i wytwarzanego w różnych procesach technologicznych oraz w aspekcie podziemnego składowania tego gazu. Możliwości zagospodarowania dwutlenku węgla są dość szerokie, między innymi znalazł on zastosowanie w przemyśle spożywczym, w lecznictwie, w procesie neutralizacji ścieków, a w ostatnim okresie także w produkcji biopaliwa z alg żywionych CO₂ [3]. Szerokie i nabierające coraz większego znaczenia zastosowanie naturalnego dwutlenku węgla w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym dyktuje potrzebę doskonalenia zagadnień dotyczących ujmowania i zagospodarowania tego gazu.

W Polsce naturalny dwutlenek węgla jest wydobywany na skalę przemysłową w uzdrowiskach Duszniki Zdrój i Krynica – Żegiestów, jako gaz towarzyszący eksploatowanym wodom mineralnym. Wielkości wydobywanego i zagospodarowywanego naturalnego dwutlenku węgla w Polsce (kilka ton na dobę) są nieporównywalne do eksploatacji i zagospodarowania tego gazu w krajach takich jak USA, Niemcy, Francja czy Włochy, gdzie wielkości te wynoszą dziesiątki ton CO₂ w ciągu doby.

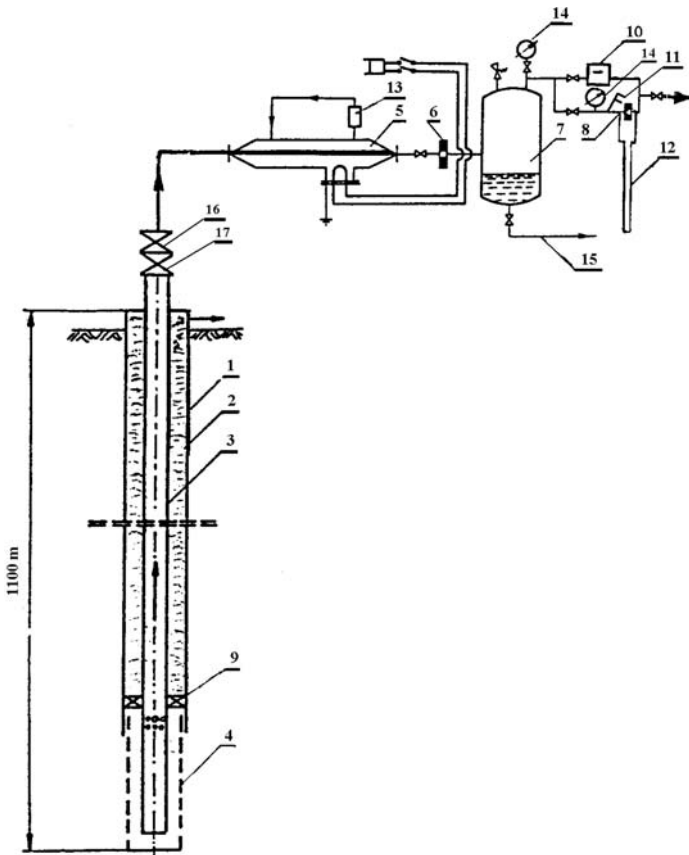
Mając na uwadze zwiększone zapotrzebowanie na naturalny CO₂, należy liczyć się z możliwością uzyskania odwiertów czysto gazowych z dwutlenkiem węgla, których do tej pory Polska nie posiada. Ponieważ parametry fizyczne i termodynamiczne CO₂ odbiegają znacznie od parametrów innych gazów i w czasie eksploatacji stwarzają pewne trudności, ustalenie odpowiednich warunków wydobycia i uzbrojenia wewnętrznego i zewnętrznego odwiertu ma istotne znaczenie [5, 7].

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

W artykule przedstawiono, na przykładzie odwiertu gazowego z CO₂, uproszczony schemat wewnętrznego i powierzchniowego uzbrojenia odwiertu oraz obliczenia spadku ciśnienia i temperatury w strefie przyodwiertowej złoża, a także w rurach wydobywczych.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA ODWIERTU „X”

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1 [8], odwiert o głębokości 1100 m zarzucono do stropu piaskowca gazonośnego rurami okładzinowymi (ze stali zwykłej) o średnicy wewnętrznej 224,4 mm (1). W dalszej części, do buta rur, zapuszczono tracony filtr z rur kwasoodpornych o średnicy 168,3 mm (4). Przewód wydobywczy (3) o średnicy wewnętrznej 62,0 mm zapuszczono do spodu odwiertu z uwagi na możliwość ciągłego wynoszenia wody złożowej.



Rys. 1. Schemat odwiertu gazowego z dwutlenkiem węgla: 1 – rury okładzinowe, 2 – płyn antykorozyjny, 3 – rury wydobywcze, 4 – filtr, 5 – podgrzewacz płaszczowy, 6 – zwężka ograniczająca, 7 – separator, 8 – zwężka pomiarowa, 9 – paker, 10 – gazomierz, 11 – termometr, 12 – manometr różnicowy, 13 – regulator temperatury, 14 – manometr, 15 – odpływ wody złożowej, 16 – zasuwa zamykająca, 17 – zasuwa rezerwowa

W dolnej części rur okładzinowych znajduje się paker (9), który jest zapięty na rurach wydobywczych (3). Z uwagi na korozyjne środowisko przestrzeń między rurami okładzinowymi (1) a przewodem wydobywczym wypełniona jest płynem antykorozyjnym (2). Wewnętrzna konstrukcja odwiertu może być wykonana bez pakera, jednak nie ma wtedy zabezpieczenia antykorozyjnego rur okładzinowych i wydobywczych, natomiast łatwa jest wymiana rur wydobywczych, na których zamontowane są zasuwki zamykająca (16) i rezerwowa (17). Zamknięcie odwiertu stanowi głowica wysokociśnieniowa [10].

Z uwagi na duży spadek temperatury, przy spadku ciśnienia na zwężce ograniczającej (6), na rurociągu doprowadzającym gaz do separatora (7) zainstalowany jest podgrzewacz płaszczowy gazu (5). Regulator (13) zabezpiecza utrzymanie temperatury gazu za zwężką ograniczającą na takim poziomie, aby nie zachodziło niebezpieczeństwo powstawania hydratów i blokowania odpływu gazu. W separatorze (7) następuje wydzielanie z gazu wody w stanie ciekłym, która następnie odprowadzona jest rurociągiem (15).

Ilościowy pomiar gazu dokonuje się w odcinku pomiarowym, w którym na jednym odgałęzieniu zamontowana jest zwężka pomiarowa (8), termometr (11) oraz manometry do pomiaru ciśnienia statycznego (14) przed zwężką i ciśnienia różnicowego (12). W drugim odgałęzieniu odcinka pomiarowego przewidziana jest możliwość zainstalowania gazomierza (10).

3. ZAŁOŻENIA DO PRZEPROWADZENIA OBLICZEŃ I ANALIZY PRZEBIEGU EKSPLOATACJI

Do obliczeń spadku ciśnienia w strefie przyodwiertowej zastosowano równanie [4]

$$P_{ds}^2 - P_{dd}^2 = \frac{Q_n \cdot \mu \cdot z \cdot P_n \cdot T_x}{\pi \cdot k \cdot h \cdot T_n} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_e + D \cdot Q_n \right) \quad (1)$$

gdzie:

- P_{ds} – ciśnienie denne statyczne [Pa],
- P_{dd} – ciśnienie denne dynamiczne [Pa],
- P_n – ciśnienie normalne 101325 Pa,
- Q_n – wydatek gazu [m_n^3/s],
- T_x – temperatura gazu przy ciśnieniu P_{ds} [K],
- T_n – temperatura normalna 273,15 K,
- μ – lepkość dynamiczna gazu przy temperaturze T_x i ciśnieniu P_{ds} [Pa·s],
- z – współczynnik ściśliwości gazu [1],
- k – współczynnik przepuszczalności gazu [m^2],
- h – miąższość poziomu gazonośnego [m],
- r_e – promień strefy zasięgu odwiertu [m],
- r_w – promień odwiertu [m],
- S_e – skin efekt [1],
- D – współczynnik turbulencji [s/m_n^3].

W celu ustalenia optymalnych warunków eksploatacji przyjęto następujące parametry: $P_{ds} = 92 \cdot 10^5$ Pa; $Q_n = 500 \div 2000$ m³/h; $T_x = 309,15$ K; $r_e = 200$ m; $r_w = 0,1588$ m; $h = 25$ m; $k = (25; 50; 75; 100) \cdot 10^{-15}$ m²; $S_e = 0,5$; $D = 13,33 \cdot 10^{-6}$ s/m³; $z = 0,65$; $\mu = 21,78 \cdot 10^{-6}$ Pa·s.

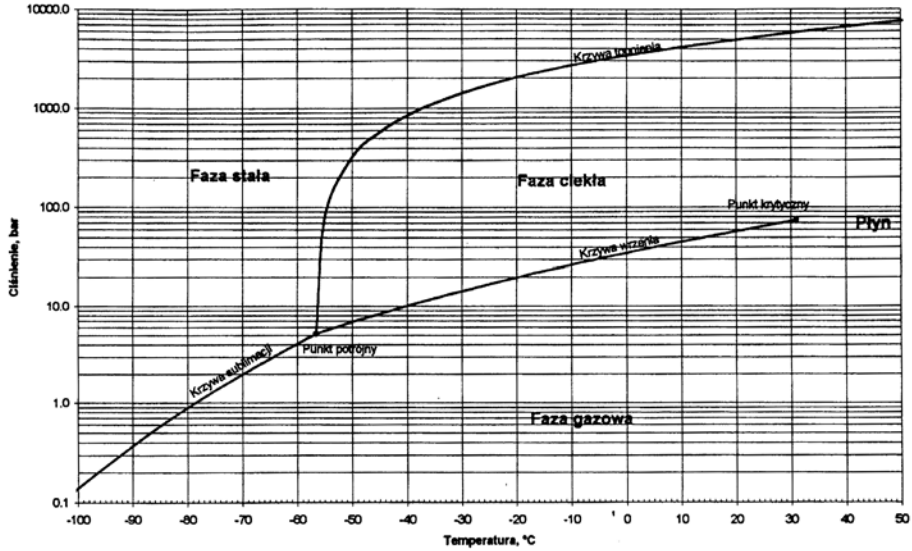
Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1. Z danych tych wynika, że spadek ciśnienia w strefie przyodwiertowej, w zakresie założonych wydajności i współczynnika przepuszczalności skały złożowej, jest niewielki. Dla przyjętej najmniejszej wartości przepuszczalności złoża i największej wydajności spadek ten wynosi $1,73 \cdot 10^5$ Pa. Uwzględniając współczynnik Joule'a–Thomsona, który w zakresie ciśnień i temperatur panujących na spodzie odwiertu w czasie eksploatacji wynosi $3,47^\circ\text{C}/\text{MPa}$, spadek temperatury wyniesie $0,6^\circ\text{C}$ [5]. Temperatura w stanie statycznym na dnie odwiertu wynosi 36°C , zatem temperatura CO₂ w strefie dopływu do odwiertu wynosić będzie $35,4^\circ\text{C}$. Ponieważ temperatura krytyczna CO₂ wynosi $31,4^\circ\text{C}$, dopływ dwutlenku węgla do odwiertu odbywa się w fazie gazowej.

Tabela 1

Obliczone wartości ciśnienia dennego dynamicznego w strefie przyodwiertowej w funkcji wydatku gazu i przepuszczalności złoża

k	$25 \cdot 10^{-15}$ m ²		$50 \cdot 10^{-15}$ m ²		$75 \cdot 10^{-15}$ m ²		$100 \cdot 10^{-15}$ m ²	
	$P_{ds}^2 - P_{dd}^2$	P_{dd}	$P_{ds}^2 - P_{dd}^2$	P_{dd}	$P_{ds}^2 - P_{dd}^2$	P_{dd}	$P_{ds}^2 - P_{dd}^2$	P_{dd}
Q_n								
[m ³ /h]	10^{12} [Pa] ²	10^5 [Pa]	10^{11} [Pa] ²	10^5 [Pa]	10^{11} [Pa] ²	10^5 [Pa]	10^{11} [Pa] ²	10^5 [Pa]
500	0,79	91,57	3,95	91,78	2,63	91,86	1,98	91,89
600	0,95	91,40	4,74	91,74	3,16	91,83	2,37	91,87
700	1,11	91,40	5,53	91,70	3,69	91,80	2,77	91,85
800	1,26	91,31	6,32	91,66	4,22	91,77	3,16	91,83
900	1,42	91,22	7,11	91,61	4,74	91,74	3,56	91,81
1000	1,58	91,14	7,90	91,57	5,27	91,71	3,95	91,78
1100	1,74	91,05	8,69	91,52	5,79	91,68	4,36	91,76
1200	1,90	90,96	9,48	91,48	6,32	91,66	4,74	91,74
1500	2,37	90,70	11,90	90,70	7,90	91,57	5,93	91,68
2000	3,16	90,27	15,80	90,27	10,50	91,43	7,90	91,57

Proces eksploatacji na dnie odwiertu będzie przebiegał w obszarze nadkrytycznym w pobliżu punktu krytycznego, co pokazano na rysunku 2 [3, 6].



Rys. 2. Diagram fazowy $P - T$ dla dwutlenku węgla [3]

Dla uzyskania optymalnych warunków eksploatacji oraz doboru średnicy rur przewodu wydobywczego i średnicy zwężki ograniczającej koniecznym jest wykonanie obliczeń spadku ciśnienia w przewodzie wydobywczym. W tym celu, dla wartości ciśnienia dennego dynamicznego (tab. 1) i przyjętych wewnętrznych średnic przewodu wydobywczego 0,05; 0,075; 0,1 m oraz wydajności 500; 1000; 1500 i 2000 m^3/h , po przekształceniu równania (2), obliczono ciśnienie głowicowe dynamiczne [4]

$$P_{dd}^2 = P_{gd}^2 \cdot e^{\frac{2gH}{zRT_x}} + \frac{8 \cdot \lambda \cdot Q_n^2 \cdot P_n^2 \cdot Z^2 \cdot T_x^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \left(e^{\frac{2gH}{zRT_x}} - 1 \right) \quad (2)$$

gdzie:

- P_{dd} – ciśnienie dennie dynamiczne [Pa],
- P_{gd} – ciśnienie głowicowe dynamiczne [Pa],
- e – podstawa logarytmu naturalnego, $e = 2,71$ [1],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- H – głębokość odwiertu [m],
- Z – współczynnik ściśliwości gazu [1],
- R – indywidualna stała gazowa [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$],
- Q_n – wydatek gazu [m^3/s],
- P_n – ciśnienie normalne [Pa],
- D – wewnętrzna średnica przewodu wydobywczego [m],
- T_n – temperatura normalna [K],
- T_x – temperatura gazu przy ciśnieniu P_{ds} [K],
- λ – liczba oporu przepływu liniowego [1].

W celu przeprowadzenia obliczeń P_{gd} niezbędna jest znajomość indywidualnej stałej gazowej dla CO_2 , którą wyznaczono z zależności [11]

$$R = \frac{RM}{M} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] = 188,95 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

RM – uniwersalna stała gazowa wynosząca $8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$,

M – masa molowa CO_2 równa $44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$.

Liczbę oporu liniowego λ obliczono z równania [2]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{4,158}{\text{Re}} \lg \frac{\text{Re}}{7} + \frac{k}{3,71D} \right) \quad (4)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa [1],

k – chropowatość bezwzględna [m],

D – wewnętrzna średnica przewodu wydobywczego [m].

Do obliczeń przyjęto chropowatość bezwzględną dla rur stalowych nowych $k = 2 \cdot 10^{-5}$ m [2], natomiast liczbę Reynoldsa wyznaczono z zależności [11]

$$\text{Re} = \frac{w \cdot D \cdot \rho_x}{\mu} \quad (5)$$

gdzie:

w – prędkość gazu w przewodzie wydobywczym [m/s],

D – wewnętrzna średnica przewodu wydobywczego [m],

ρ_x – gęstość gazu przy parametrach P_x i T_x [kg/m^3],

μ – lepkość dynamiczna gazu [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

Ponieważ dwutlenek węgla w złożu znajduje się w kontakcie z wodą złożową, a zatem posiada wilgotność odpowiadającą ciśnieniu i temperaturze panującym w odwiercie, do obliczenia gęstości gazu wilgotnego zastosowano równanie [1]

$$\rho_x = \rho_n \frac{(P_x - \psi \cdot P_p) T_n}{P_n \cdot T_x \cdot Z} + \psi \cdot \rho'' \quad (6)$$

gdzie:

- ρ_x – gęstość gazu w warunkach P_x i T_x [kg/m^3],
- ρ_n – gęstość CO_2 w warunkach normalnych [kg/m_n^3],
- P_x – ciśnienie gazu [Pa],
- Ψ – wilgotność względna gazu [1],
- P_p – ciśnienie pary wodnej nasyconej w temperaturze T_x [Pa],
- P_n – ciśnienie normalne [Pa],
- T_n – temperatura normalna [K],
- T_x – temperatura gazu [K],
- Z – współczynnik ściśliwości gazu [1],
- ρ'' – gęstość pary wodnej nasyconej w temperaturze T_x [kg/m^3].

Obliczenia przeprowadzono dla warunków ciśnienia i temperatury panujących na dnie odwiertu oraz przyjętych wartości $Z = 0,65$; $\Psi = 0,944$; $\rho'' = 0,042 \text{ kg}/\text{m}^3$. Uwzględniając powyższe dane, obliczona z równania (6) gęstość gazu wilgotnego wynosi $\rho_x = 210,35 \text{ kg}/\text{m}^3$. Wstawiając tą wartość gęstości oraz lepkość dynamiczną gazu $\mu = 21,78 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ do równania (5) wyznaczono wielkości liczby Reynoldsa (Re), a następnie obliczono liczby oporu liniowego (λ), które zestawiono w tabeli 2.

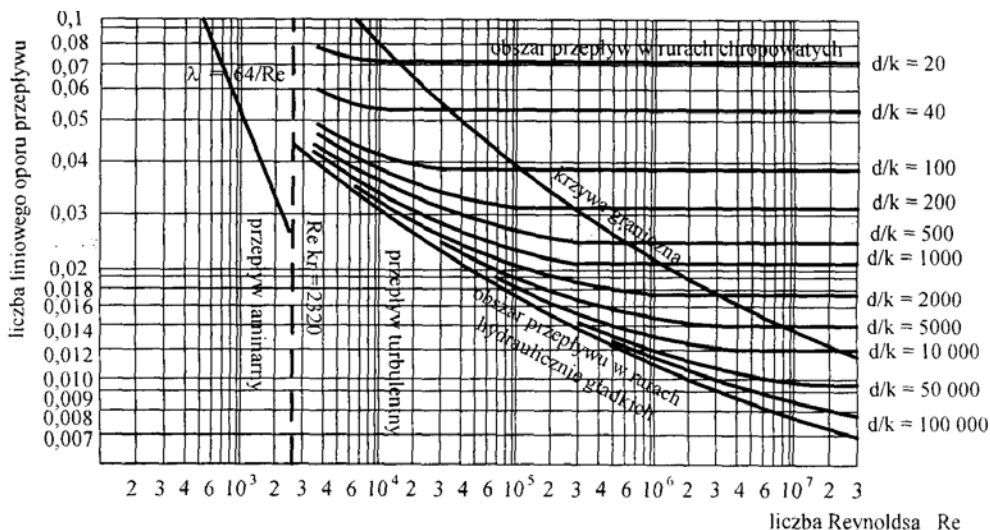
Tabela 2

Obliczone wartości prędkości, liczby Reynoldsa i liczby oporu liniowego w funkcji wydatku i średnicy przewodu wydobywczego

D [m]	0,05			0,075			0,1		
	w [m/s]	Re	λ	w [m/s]	Re	λ	w [m/s]	Re	λ
Q_n [m_n^3/h]									
500	0,90	504049	0,0287	0,40	336033	0,0259	0,23	252024	0,0243
1000	1,80	1008099	0,0286	0,80	672066	0,0256	0,45	504049	0,0239
1500	2,73	1528950	0,0285	1,22	1020700	0,0255	0,68	761674	0,0236
2000	3,69	2066603	0,0286	1,64	1377735	0,0255	0,92	1030501	0,0237

Wartości liczby oporu liniowego λ można wyznaczyć orientacyjnie z nomogramu przedstawionego na rysunku 3 jeżeli znana jest liczba Reynoldsa oraz chropowatość względna przewodu (stosunek średnicy przewodu wydobywczego D do jego chropowatości bezwzględnej k) [2, 12].

Mając wyznaczone oraz przyjęte wartości danych występujących we wzorze (2), obliczono wielkość ciśnienia głowicowego dynamicznego oraz spadek ciśnienia dla różnych średnic przewodu wydobywczego i różnych wydajności odwiertu. Obliczenia przeprowadzono dla następujących danych: P_{dd} – wartości z tabeli 1; $e = 2,71$; $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$; $H = 1100 \text{ m}$; $R = 188,95 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$; Q_n , D i λ – wartości z tabeli 2; $T_x = 309,15 \text{ K}$; $T_n = 273,15 \text{ K}$; $P_n = 101325 \text{ Pa}$.



Rys. 3. Współczynnik oporu przepływu dla rur hydraulicznie gładkich i chropowatych dla przepływów laminarnych i turbulentnych

Tabela 3

Zestawienie obliczeń wartości ciśnienia głowicowego dynamicznego i spadku ciśnienia w przewodzie wydobywczym

Q_n	$D = 0,05 \text{ m}$			$D = 0,075 \text{ m}$			$D = 0,1 \text{ m}$		
	P_{dd}	P_{gd}	$P_{dd}-P_{gd}$	P_{dd}	P_{gd}	$P_{dd}-P_{gd}$	P_{dd}	P_{gd}	$P_{dd}-P_{gd}$
$[\text{m}_n^3/\text{h}]$	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]	10^5 [Pa]
500	91,78	68,82	22,96	91,86	69,10	22,76	91,89	69,15	22,74
1000	91,57	67,89	23,68	91,71	68,90	22,81	91,78	69,05	22,73
1500	91,35	66,42	24,93	91,57	68,65	22,92	91,68	68,94	22,74
2000	91,14	64,36	26,78	91,43	68,33	23,10	91,57	68,81	22,76

Z danych liczbowych zestawionych w tabeli 3 wynika, że spadki ciśnienia w przewodzie wydobywczym, wywołane oporami tarcia i ciężarem ruchomego słupa gazu, przy zmierzających ciśnieniach dennych dynamicznych (tab. 1), wynoszą średnio $(22,82 \div 24,21)10^5 \text{ Pa}$. Ponieważ spadki ciśnienia są znaczne, a współczynnik Joule'a–Thomsona przy ciśnieniach panujących w odwiercie (średnio od $68 \cdot 10^5$ do $91 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), posiada wartość około $9^\circ\text{C}/\text{MPa}$, należy liczyć się z możliwością przejścia fazowego dwutlenku węgla w przewodzie wydobywczym [6, 9].

4. STWIERDZENIA I WNIOSKI

- 1) Z uwagi na parametry fizyczne i termodynamiczne dwutlenku węgla, dla ustalenia optymalnych warunków eksploatacji, każdy odwiert z tym gazem należy rozpatrywać indywidualnie.
- 2) Niewielkie spadki ciśnienia w strefie przyodwiertowej (tab. 1) i mała wartość współczynnika Joule'a–Thomsona w zakresie wysokich ciśnień sprawiają, że spadek temperatury jest niewielki i do odwiertu dopływa CO₂ w postaci gazu.
- 3) Spadki ciśnienia w przewodach wydobywczych o różnych średnicach (tab. 3), przy małych prędkościach przepływu (tab. 2), wynikają głównie z członu statycznego równania (2), tj. z ciśnienia wywołanego ciężarem ruchomego słupa gazu w tych przewodach.
- 4) Ponieważ w czasie eksploatacji spadek temperatury na zwężce ograniczającej będzie duży, dla zabezpieczenia przed tworzeniem się hydratów lub korków lodowych, w odcinku pomiarowym przed zwężką ograniczającą wydobywanie gazu należy zainstalować podgrzewacz płaszczowy.
- 5) Zwężka krytyczna może pełnić rolę zwężki ograniczającej i pomiarowej, zatem zainstalowanie jej w miejsce zwężki ograniczającej uzbrojenia napowierzchniowego odwiertu, z możliwością pomiaru temperatury i ciśnienia przed tą zwężką, pozwoli na bieżącą kontrolę eksploatacji z równoczesnym pomiarem objętości wydobywanego gazu.
- 6) Przedstawione schematycznie na rysunku 1 wglębne i napowierzchniowe wyposażenie odwiertu gazowego z CO₂ zabezpiecza przed korozją rury okładzinowej i wydobywczycy z zewnątrz, natomiast nie daje możliwości eksploatacji gazu z przestrzeni pierścieniowej odwiertu i utrudnia wymianę przewodu wydobywczego.
- 7) W celu uzyskania danych dla określenia optymalnych warunków eksploatacji odwiertu gazowego z CO₂, oprócz parametrów złożowych i wielkości obliczeniowych, konieczne jest wykonanie symulacji komputerowej i badań hydrodynamicznych, w tym między innymi pomiaru rozkładu ciśnienia, temperatury i gęstości płynu w przewodzie wydobywczym przy zmiennym wydobywaniu gazu.

LITERATURA

- [1] Campbell J.M.: *Gas Conditioning and Processing*. Edited by Robert A. Hubbard 2001
- [2] Cerbe G.: *Grundlagen der Gastechnik*. Carl Hanser Verlag 1998
- [3] Ciężkowski W. et al.: *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*. Wrocław, Wrocławskie Towarzystwo Naukowe 2002
- [4] Dake L.P.: *The Practice of Reservoir Engineering*. Amsterdam, Elsevier 1994
- [5] Duliński W., Ropa C.E.: *Problemy otworowej eksploatacji dwutlenku węgla*. Zeszyty Naukowe AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 6, 1989
- [6] Duliński W., Ropa C.E.: *Eksploatacja, własności i zagospodarowanie naturalnego dwutlenku węgla*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, 3, 1994
- [7] Duliński W., Ropa C.E.: *Badania hydrodynamiczne w odwiertach Zuber II i Zuber IV*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, 4, 1994

- [8] Duliński W., Ropa C.E.: *Analiza techniczno-energetyczna zagospodarowania dwutlenku węgla w Uzdrowisku Krynica Zdrój*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 22/2, 2005
- [9] Vukalovich M.P., Altunin V.V.: *Thermophysical Properties of Carbon Dioxide*. London 1968
- [10] Wilk Z.: *Eksploatacja złóż płynnych surowców*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1964
- [11] Wilk Z.: *Gaz ziemny*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1964
- [12] *Eigenschaften der Kohlensäure*. Koblenz, Kohlensäurewerke Rommenhöller GmbH Bad Driburg-Herste 1984