

OZNACZANIE STĘŻENIA GAZÓW W WODACH PODZIEMNYCH W WARUNKACH STATYCZNYCH

DETERMINING GAS CONCENTRATION IN GROUNDWATER IN STATIC CONDITIONS

STANISŁAW ŻAK¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne oznaczania stężenia gazów w wodzie podziemnej na podstawie pomiarów parametrów gazu znajdującego się w otworze na poziomie głowicy. Pomiary prowadzi się w warunkach statycznych i odnoszą się one do nagazowanych wód podziemnych. Jako warunki statyczne przyjęto stan, w którym nie zachodzi wypływ wody z otworu, a położenia zwierciadła wody w otworze i warstwie wodonośnej nie zmieniają się w czasie. Zaprezentowana metoda obliczeń umożliwia również określenie ciśnienia nasycenia, wykładnika gazowego i głębokości położenia zwierciadła wody podziemnej w otworze.

W celu weryfikacji przedstawionej metody wykonano obliczenia dla dwóch otworów ujmujących nagazowane wody podziemne. Jeden z nich ujmował wody, w których rozpuszczony był tylko jeden gaz – dwutlenek węgla. Z kolei drugi otwór ujmował wody, w których rozpuszczone były trzy gazy: metan, azot i dwutlenek węgla. Uzyskane wyniki obliczeń dla warunków statycznych są zbliżone do wyników uzyskanych w warunkach dynamicznych, tzn. gdy skład gazowy wody podziemnej określa się na podstawie badań w warunkach wypływającej mieszaniny wodno-gazowej z otworu.

Słowa kluczowe: stężenie gazów, wykładnik gazowy, warunki statyczne, ciśnienie nasycenia, wody podziemne.

Abstract. The article discusses theoretical basis for determining gas concentrations in groundwater by measuring gas parameters in a well at head level. The measurements, performed in static conditions, apply to gas-rich groundwaters. The adopted static conditions refer to the state when water is not discharged from the well and the positions of water table in the well and the aquifer do not change in time. The described calculation method also enables determination of bubblepoint pressure, gas/water ratio and the depth of water table in the well.

In order to verify the method, the author performed calculations for two wells drawing gas-rich groundwaters. One of them drew waters containing only one dissolved gas – carbon dioxide. In the other one, water contained three dissolved gasses: methane, nitrogen and carbon dioxide. The results obtained for static conditions are comparable to those representing dynamic conditions, i.e. when gas composition of groundwater is established by conducting analyses in the conditions of water-gas mixture flowing out of the well.

Key words: gas concentrations, gas/water ratio, static conditions, bubblepoint pressure, groundwater.

WPROWADZENIE

Stężenie gazów w nagazowanych wodach podziemnych określa się zwykle w warunkach wypływu tych wód na powierzchnię (Krajča, 1977; Ropa, Duliński, 1999; Ciężkowski i in., 2002; Żak, 2005). Oznaczenie zawartości rozpuszczonego gazu w wodzie podziemnej wymaga wówczas określenia

ilości rozpuszczonego gazu w wodzie pojawiającej się na powierzchni terenu oraz gazu, który się z niej wydzielił. Z kolei, aby określić ilość gazów wydzieloną z wody, należy ustalić jaka część gazu towarzyszącego wypływającej wodzie będzie w niej rozpuszczona na głębokości warstwy wodonośnej.

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Zawartość gazów w wodach podziemnych można określić również dla warunków, w których wody podziemne nie są wydobywane z warstwy wodonośnej (dla warunków statycznych). Ma to miejsce w przypadku ujęć otworowych, gdy zawory na głowicy są zamknięte, a zwierciadło wody i ciśnienie w otworze są ustabilizowane. Oznaczenie zawartości gazów w wodzie podziemnej może być wówczas dokonane na podstawie pomiarów ciśnienia, temperatury i stęże-

nia gazów w powietrzu znajdującym się w otworze. Poniżej przedstawiono podstawy teoretyczne oznaczania składu gazowego wód podziemnych w takim przypadku. Zaprezentowano również wyniki obliczeń stężenia gazów w wodach podziemnych dla dwóch przykładów. Jeden przykład odnosi się do wód podziemnych, w których rozpuszczony jest praktycznie jeden gaz, a drugi do nagazowanych wód, w których rozpuszczone są różne gazy.

WARUNKI STATYCZNE

W przypadku otworowego ujęcia nagazowanych wód podziemnych można przyjąć dwa rodzaje warunków statycznych. Jeden z nich ma miejsce wówczas, gdy położenie zwierciadła wody w otworze nie zmienia się, a z otworu nie wypływa ani woda, ani gaz. Oznacza to, że zawór na odpływie jest zamknięty (fig. 1A), a na głowicy obserwowane jest ciśnienie podwyższone względem ciśnienia atmosferycznego. W takim przypadku z nagazowanej wody gaz będzie dyfundował do przestrzeni ponad zwierciadłem wody. Tym samym w przestrzeni tej będzie zwiększało się ciśnienie. Wraz ze wzrostem ciśnienia w otworze poziom zwierciadła wody będzie się obniżał. Proces ten będzie trwał do momentu, w którym ciśnienie gazu w części ponad zwierciadłem wody osiągnie ciśnienie równowagi statycznej. Ciśnienie to będzie

jednocześnie **ciśnieniem nasycenia**. Wówczas ustali się również poziom zwierciadła wody w otworze i ciśnienie na głowicy wskazywane przez manometr P_g (fig. 1A).

W drugim przypadku (fig. 1B) osiągnięty może być stan quasi-statyczny. Będzie on miał miejsce wówczas, gdy z otworu nie będzie wypływała woda, natomiast będzie wypływał gaz, który dyfunduje poprzez słup wody w otworze. W takiej sytuacji wylot otworu jest otwarty, a ciśnienie w otworze przy powierzchni terenu będzie równe ciśnieniu atmosferycznemu (fig. 1B). Wówczas w otworze ukształtuje się zwierciadło wody, które będzie określane jako zwierciadło statyczne. W ogólnym przypadku zwierciadło to może być położone poniżej lub powyżej powierzchni terenu.

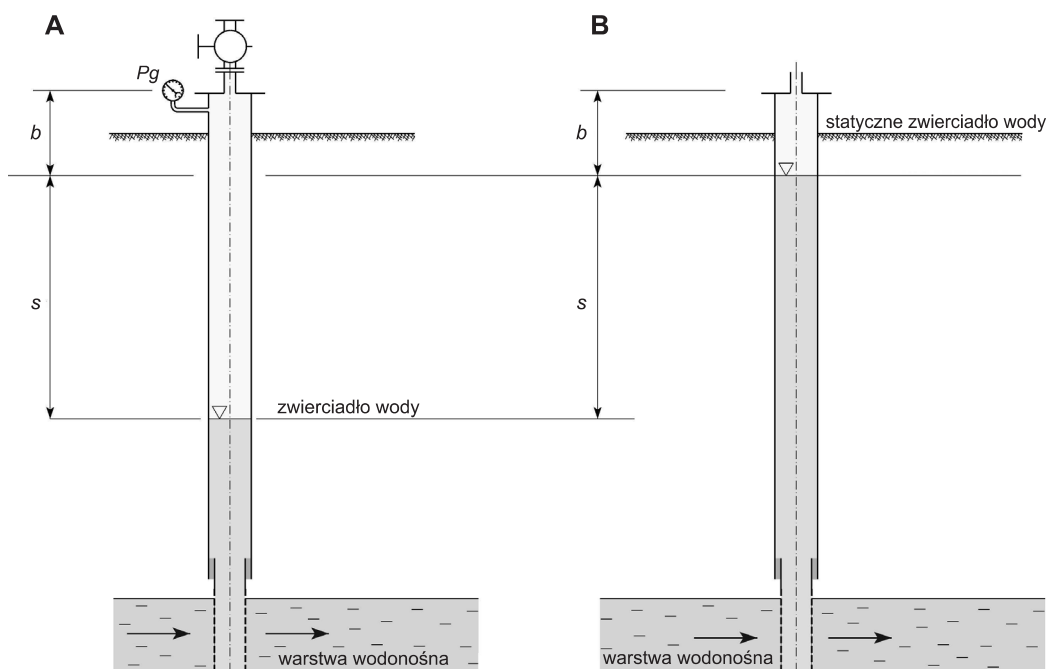


Fig. 1. Statyczne warunki położenia zwierciadła wody w otworze

Static conditions of water table position in the well

POŁOŻENIE ZWIERCIADŁA WODY W OTWORZE W WARUNKACH STATYCZNYCH

Oznaczenie składu gazowego wód podziemnych w warunkach statycznych (fig. 1A) wymaga znajomości położenia zwierciadła wody w otworze. Jeżeli konstrukcja głowicy otworu nie pozwala na wykonanie bezpośrednich pomiarów zwierciadła wody, to można go oszacować na podstawie innych parametrów oraz obliczeń. Przyjmijmy w tym celu, że ciśnienie na poziomie zwierciadła wody w warunkach zamkniętego odpływu na głowicy otworu (fig. 1A) jest takie, jak na tym samym poziomie dla warunków przedstawionych na figurze 1B. Powinna być więc spełniona równość

$$P_g^* + P_{(s+b)} = \rho_w g s + P_a + P_{(b)} \quad [1]$$

gdzie:

P_g^* – ciśnienie na głowicy otworu (ciśnienie wskazywane przez manometr powiększone o ciśnienie atmosferyczne $P_g^* = P_g + P_a$) dla warunków na figurze 1A [bar],

P_a – ciśnienie atmosferyczne [bar],

$P_{(s+b)}$ – ciśnienie słupa gazu o wysokości $(b+s)$ w warunkach, gdy na poziomie głowicy ciśnienie w otworze wynosi P_g^* [bar],

$P_{(b)}$ – ciśnienie gazu wywołane słupem gazu o wysokości b w warunkach, gdy na powierzchni terenu ciśnienie w otworze wynosi P_a [bar],

ρ_w – gęstość wody w otworze [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

s – obniżenie zwierciadła wody w otworze spowodowane wydzielaniem się gazów z wody podziemnej [m].

Zgodnie z prawem Daltona mamy:

$$\begin{aligned} P_g^* &= P_{\text{H}_2\text{O}} + \sum_i P_{gi}^*, \\ P_{(s+b)} &= \sum_i P_{(s+b)i}, \\ P_a &= P_{\text{H}_2\text{O}} + \sum_i P_{ai}, \\ P_{(b)} &= \sum_i P_{(b)i} \end{aligned} \quad [2]$$

gdzie:

P_{gi}^* – ciśnienie cząstkowe i gazu na głowicy otworu [bar],

P_{ai} – ciśnienie cząstkowe i gazu w otworze na poziomie głowicy [bar],

$P_{\text{H}_2\text{O}}$ – ciśnienie pary wodnej [bar],

$P_{(s+b)i}$ – ciśnienie cząstkowe i gazu wywołane słupem gazu o wysokości $(b+s)$ w warunkach, gdy na poziomie głowicy ciśnienie w otworze wynosi [bar],

$P_{(b)i}$ – ciśnienie cząstkowe i gazu wywołane słupem gazu o wysokości b w warunkach, gdy na powierzchni terenu ciśnienie w otworze wynosi P_a [bar].

Ciśnienie cząstkowe i gazu na poziomie głowicy otworu wyraża się wzorem:

$$P_{gi}^* = \frac{c_{gi}}{100} (P_g^* - P_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [3]$$

gdzie:

c_{gi} – stężenie objętościowe i gazu w otworze na głowicy [%].

Z kolei ciśnienie cząstkowe i gazu na poziomie głowicy dla warunków jak na figurze 1B można wyrazić w postaci:

$$P_{ai} = \frac{c_{ai}}{100} (P_a - P_{\text{H}_2\text{O}}) \quad [4]$$

gdzie:

c_{ai} – stężenie i gazu w otworze (dla ciśnienia atmosferycznego).

W tym miejscu należy zaznaczyć, że wartości stężeń c_{gi} i c_{ai} są różne. Jest to wynikiem różnego stopnia wydzielania się gazów w zależności od ciśnienia (Żak, 2009).

Ciśnienie cząstkowe i gazu wywołane słupem gazu o wysokości $(s+b)$ wynosi

$$\begin{aligned} P_{(s+b)i} &= P_{gi}^* \exp \left[\frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right] - P_{gi}^* = \\ &= \frac{c_{gi}}{100} (P_g^* - P_{\text{H}_2\text{O}}) \left\{ \exp \left[\frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right] - 1 \right\} \end{aligned} \quad [5]$$

natomiast ciśnienie cząstkowe wywołane słupem i gazu o wysokości b dla warunków jak na figurze 1B:

$$P_{(b)i} = \frac{c_{ai}}{100} (P_a - P_{\text{H}_2\text{O}}) \left\{ \exp \left[\frac{M_i g}{RTZ_i} b \right] - 1 \right\} \quad [6]$$

gdzie:

P_{ai} – ciśnienie parcjale i gazu w otworze przy powierzchni terenu [bar],

c_{ai} – stężenie objętościowe i gazu w otworze przy powierzchni terenu [% obj.].

Wstawiając zależności [2], [5] i [6] do równania [1] i uwzględniając, że $P_g^* = P_g + P_a$, otrzymujemy:

$$P_g = \frac{\rho_w g s + (P_a - P_{\text{H}_2\text{O}}) \sum_i \left[\frac{c_{ai}}{100} \exp \left(\frac{M_i g}{RTZ_i} b \right) \right]}{\sum_i \left\{ \frac{c_{gi}}{100} \exp \left(\frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right) \right\}} - P_a + P_{\text{H}_2\text{O}} \quad [7]$$

Dla małych wartości b powyższą zależność możemy zapisać jako:

$$P_g = \frac{\rho_w g s + P_a - P_{H_2O}}{\sum_i \left[\frac{c_{gi}}{100} \exp\left(\frac{M_i g}{RTZ_i} s\right) \right]} - P_a + P_{H_2O} \quad [8]$$

Na podstawie równań [7] lub [8] można obliczyć wielkość obniżenia się zwierciadła s w otworze. W tym celu musimy znać ciśnienie wskazywane przez manometr na głowicy P_g , ciśnienie atmosferyczne P_a , temperaturę w otworze T oraz stężenia objętościowe gazów w mieszaninie pobranej

z głowicy otworu c_{gi} . W przypadku dużych wartości b , należy również określić stężenia w otworze c_{ai} na poziomie głowicy dla warunków quasi-statycznych, przedstawionych na [figurze 1b](#).

Wielkość obniżenia zwierciadła wody s można oszacować z uproszczonego równania:

$$s = \frac{P_g}{\rho_w g} \quad [9]$$

Jeżeli wartość P_g nie przekracza kilkudziesięciu barów, to dokładność obliczenia wartości s powinna mieścić się w przedziale od kilku do 10%.

STĘŻENIA GAZÓW W OTWORZE W FUNKCJI GŁĘBOKOŚCI

Siła grawitacji i zróżnicowanie cząsteczek gazu powodują, że stężenie poszczególnych gazów w mieszaninie zmienia się z wysokością. W związku z tym stężenia poszczególnych gazów na poziomie głowicy będą inne niż przy powierzchni zwierciadła wody w otworze. Wartość stężenia i gazu c_{zi} na głębokości z można określić z zależności:

$$c_{(z)i} = \frac{P_{gi}^* + P_{(z)i}}{\sum_i (P_{gi}^* + P_{(z)i})} = \frac{c_{gi} (P_g + P_a - P_{H_2O}) + P_{(z)i}}{\sum_i [c_{gi} (P_g + P_a - P_{H_2O}) + P_{(z)i}]} = \frac{C_{gi} \exp\left[\frac{M_i g}{RTZ_i} z\right]}{\sum_i \left\{ C_{gi} \exp\left[\frac{M_i g}{RTZ_i} z\right] \right\}} \quad [10]$$

gdzie:

P_{gi}^* – ciśnienie i gazu na głowicy,

$P_{(z)i}$ – ciśnienie słupa i gazu w otworze na głębokości z ,

z – głębokość położenie względem głowicy.

Wyniki przykładowych obliczeń dla otworu, w którym na głowicy ciśnienie wynosiło 99 bar, temperatura $T = 28^\circ\text{C}$, położenie statycznego zwierciadła wody na głębokości 9 m ponad powierzchnią terenu przedstawiono w [tabeli 1](#).

Wskazują one, że zmiany stężeń poszczególnych gazów w funkcji głębokości w otworach o głębokości dochodzącej nawet do 1000 m są niewielkie.

Tabela 1

Stężenie gazu w otworze na poziomie głowicy (0 m p.p.t.) i 1044 m p.p.t.

Gas concentration in the well at head level (0 m b.g.l.) and 1044 m b.g.l.

Głębokość [m p.p.t.]	Stężenie objętościowe gazu [% obj.]		
	CH ₄	N ₂	CO ₂
0	89,0	10,9	0,1
1044	88,5	11,4	0,1

STĘŻENIE GAZÓW W WODZIE PODZIEMNEJ

Stężenie gazów w wodach podziemnych można określić na podstawie ciśnienia nasycenia. W warunkach statycznych ([fig. 1A](#)) występuje stan równowagi termodynamicznej między gazem rozpuszczonym w wodzie i gazem znajdującym się ponad zwierciadłem wody w otworze. Oznacza to, że tyle samo gazu rozpuszcza się w wodzie, ile się z niej uwalnia. Wówczas wartość ciśnienia ponad zwierciadłem wody stanowi jednocześnie ciśnienie nasycenia P_{ns} . Jeśli w wodzie rozpuszczone są różne gazy, to:

$$P_{ns} = P_{H_2O} + \sum_{i=1}^n P_{nsi} \quad [11]$$

gdzie:

P_{H_2O} – ciśnienie pary wodnej,

P_{nsi} – ciśnienie nasycenia i gazu.

Ciśnienie nasycenia i gazu możemy wyrazić w postaci:

$$P_{nsi} = P_{gi}^* + P_{(s+b)i} \quad [12]$$

gdzie:

P_{gi}^* – ciśnienie cząstkowe i gazu w otworze na poziomie głowicy,

$P_{(s+b)i}$ – ciśnienie cząstkowe i gazu w otworze wywołane słupem gazu o wysokości $(s + b)$.

Zakładając, że na poziomie zwierciadła wody stężenie objętościowe poszczególnych gazów jest takie same, jak na poziomie głowicy, to wstawiając do wzoru [12] odpowiednie wielkości z [3] i [5] otrzymujemy:

$$P_{nsi} = \frac{c_{gi}}{100} (P_g + P_a - P_{H_2O}) \exp \left[\frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right] \quad [13]$$

Stąd:

$$P_{ns} = P_{H_2O} + (P_g + P_a - P_{H_2O}) \sum_i \frac{c_{gi}}{100} \left[\exp \frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right] \quad [14]$$

Znając wartości ciśnienia nasycenia poszczególnych gazów P_{nsi} , ich stężenie w wodzie podziemnej c_{pi} można wyrazić jako:

$$c_{pi} = \alpha_i \rho_{ni} \frac{P_{nsi}}{P_n} = \frac{\alpha_i \rho_{ni} c_{gi}}{100 P_n} (P_g + P_a - P_{H_2O}) \exp \left[\frac{M_i g}{RTZ_i} (s+b) \right] \quad [15]$$

gdzie:

- α_i – współczynnik absorpcji Bunsena i gazu dla temperatury w otworze na poziomie zwierciadła wody,
- ρ_{ni} – gęstość i gazu odniesiona do warunków normalnych.

Tak więc, aby określić stężenie danego gazu w wodzie podziemnej w warunkach statycznych musimy zmierzyć:

- stężenie objętościowe danego gazu w otworze na poziomie głowicy c_{gi} ,
- ciśnienie gazów na głowicy wskazywane przez manometr P_g ,
- ciśnienie atmosferyczne P_a ,
- temperaturę w otworze T .

Ponadto należy znać położenie zwierciadła wody w warunkach quasi-statycznych. Przy dużych głębokościach położenia statycznego zwierciadła wody należy również, dla tych warunków, znać głębokość obniżenia zwierciadła wody s lub ją obliczyć na podstawie stężenia gazów w otworze przy powierzchni terenu.

Łatwo zauważyć, że wartość wyrażenia $\frac{M_i g}{RTZ_i}$ jest bardzo mała, rzędu $0,0002 \text{ m}^{-1}$. Dlatego też, dla otworów o głębo-

kości do kilkuset metrów, które nie ujmują wód termalnych ($P_{H_2O} \ll P_a$), ciśnienie nasycenia można określić z uproszczonego wzoru:

$$P_{ns} = P_g + P_a \quad [16]$$

Wówczas stężenie i gazu wyraża się w postaci:

$$c_{pi} = \frac{\alpha_i \rho_{ni} c_{gi}}{100 P_n} (P_g + P_a) \quad [17]$$

Znając stężenia poszczególnych gazów w wodzie podziemnej, można także, na podstawie warunków statycznych, określić wykładnik gazowy W_g jako stosunek wydatku gazu Q_g do wydatku wody Q_w mierzonych w warunkach temperatury T_s i ciśnienia P_s występujących na wypływie.

Określenie wykładnika gazowego wymaga przyjęcia wartości ciśnienia atmosferycznego P_a , ciśnienia w separatorze P_s i temperatury T_s na wypływie. Przyjmując, że temperatura w separatorze T_s jest równa temperaturze wody w otworze T , wykładnik gazowy wyrazi się w postaci:

$$W_g = \frac{100 (P_g + P_a - P_s) T P_s}{(P_s - P_{H_2O})^2 T_n \sum_i \frac{c_{si}}{\alpha_i Z_i}} \quad [18]$$

Należy zaznaczyć, że występujące we wzorze [18] stężenia objętościowe poszczególnych gazów w separatorze c_{si} (w % obj.) są inne niż na głowicy w otworze. Wartości c_{si} można określić na podstawie stężeń na głowicy c_{gi} (Żak, 2009).

Jeżeli przyjmimy, że ciśnienie w separatorze jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, ujmowane wody nie są termalnymi, a gazy zachowują się jak gazy doskonałe, to wielkość wykładnika gazowego W_g można oszacować z uproszczonego równania

$$W_g = \frac{100 P_g T}{P_s T_n \sum_i \frac{c_{si}}{\alpha_i}} \quad [19]$$

Z powyższego wzoru wynika, że wykładnik gazowy jest wprost proporcjonalny do wartości ciśnienia głowicowego. Drugim bardzo istotnym czynnikiem, mającym wpływ na wielkość wykładnika gazowego, jest współczynnik absorpcji Bunsena. Oznacza to, że w istotny sposób zależy on od rodzaju gazów, które są rozpuszczone w wodzie.

PRZYKŁADY OBLICZEŃ

W celu weryfikacji przedstawionego sposobu oznaczenia stężenia gazów w wodach podziemnych, przeprowadzono obliczenia dla dwóch przykładów. Jeden z nich dotyczył otworu ujmującego szczawę, w której rozpuszczony jest praktycznie tylko jeden gaz – dwutlenek węgla. W drugim

przedstawiono oznaczenia stężenia trzech gazów rozpuszczonych w wodzie.

Pierwszy przykład bazuje na danych opublikowanych przez Dulińskiego i Ropę (2008). Opisany otwór ma głębokość 152 m i ujmuje szczawę. Ciśnienie głowicowe

statyczne P_g wynosi 3,7 bar. Ciśnienie złożowe natomiast wynosi 14,4 bar, co oznacza, że statyczne zwierciadło wody względem powierzchni terenu (głowicy) znajduje się na głębokości b ok. 5,2 m p.p.t. Przeprowadzone badania w warunkach dynamicznych pozwoliły na określenie wykładnika gazowego, który wahał się między wartościami 4,6 i 4,8 przy temperaturze T na wypływie równej 10°C i ciśnieniu atmosferycznym $P_a = 0,960$ bar.

Dla przedstawionych powyżej danych obliczono najpierw, na podstawie wzoru [7], obniżenie zwierciadła wody w otworze s względem statycznego zwierciadła wody. Wynosi ono 38,1 m. Następnie obliczono ciśnienie nasycenia ze wzoru [14], zawartość dwutlenku węgla w wodzie podziemnej ze wzoru [15] i wykładnik gazowy ze wzoru [18]. Obliczone ciśnienie nasycenia wyniosło 4,7 bar, zawartość rozpuszczonego, wolnego CO_2 w wodzie $10,69 \text{ g/dm}^3$, a wykładnik gazowy 4,80. Dla porównania, określone w warunkach dynamicznych analogiczne wielkości ciśnienia nasycenia i zawartości CO_2 w wodzie w pracy Dulińskiego i Ropy (2008) wynosiły 5,13 bar i $11,83 \text{ g/dm}^3$. Wartość wykładnika gazowego jest natomiast dokładnie taka sama, jaką przyjęto do obliczeń we wspomnianej pracy. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń można również stwierdzić, że cały gaz towarzyszący wypływającej wodzie podziemnej jest w niej rozpuszczony (na głębokości zalegania warstwy wodonośnej).

W drugim przykładzie rozważano otwór o głębokości 1215 m ujmujący wody podziemne, w których rozpuszczone są trzy gazy metan, azot i dwutlenek węgla. Stężenie tych gazów określono na głowicy otworu oraz podczas eksploatacji wody z ujęcia w separatorze. Zmierzone stężenia przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Stężenie gazów na głowicy otworu i w separatorze

Gas concentrations at well head level and in the separator

Miejsce oznaczenia	Stężenie objętościowe gazu [% obj.]		
	CH_4	N_2	CO_2
Głowica	89,0	10,9	0,1
Separator	86,9	10,6	2,5

Ponadto dla otworu określone zostały:

- ciśnienie głowicowe statyczne (wartość ciśnienia na manometrze) $P_g = 99$ bar,
- temperatura na wypływie $T = 28^\circ\text{C}$,
- ciśnienie atmosferyczne $P_a = 0,945$ bar,

Przyjęto też, że statyczne zwierciadło wody kształtuje się 9 m ponad powierzchnią terenu.

Mając powyższe dane, obliczono najpierw ze wzoru [7] wartość obniżenia zwierciadła wody względem statycznego zwierciadła wody w otworze s . Wyniosła ona 1044 m. Następnie obliczono ciśnienie nasycenia, stężenia poszczególnych gazów w wodzie podziemnej i wykładnik gazowy. Obliczenia te wykonano zarówno dla warunków dynamicznych, jak i statycznych. Wykładnik gazowy określono na podstawie warunków statycznych przy założeniu, że w separatorze ciśnienie wynosi 0,945 bar, a temperatura 28°C .

Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabelach 3 i 4. Należy zaznaczyć, że dane odnoszące się do warunków dynamicznych dotyczą eksploatacji tylko jedną zwięźką, dla której czas próbnej eksploatacji był najdłuższy i najbardziej

Tabela 3

Wyniki obliczeń ciśnienia nasycenia

Bubblepoint pressure calculations

Warunki badania	Ciśnienie nasycenia poszczególnych gazów P_{nsi} [bar]			Ciśnienie pary wodnej $P_{\text{H}_2\text{O}}$ [bar]	Ciśnienie nasycenia P_{ns} [bar]
	CH_4	N_2	CO_2		
Dynamiczne	61,240	15,891	0,096	0,037	77,264
Statyczne	79,205	20,585	0,118	0,037	99,945

Tabela 4

Wyniki obliczeń stężenia gazów w wodzie i wykładnika gazowego

Calculations of gas concentration in water and gas/water ratio

Warunki badania	Zawartość gazu w wodzie [mg dm^{-3}]				Wykładnik gazowy
	CH_4	N_2	CO_2	sumaryczna wszystkich gazów	
Dynamiczne	1095	231	112	1439	2,22
Statyczne	1417	300	138	1854	2,88

zbliżony do ustalonego. Dla zwięźki tej wyniki były najbardziej zbliżone do wyników w warunkach statycznych.

Uzyskane w tym przykładzie wyniki wskazują, że głębokość położenia zwierciadła wody w otworze w warunkach statycznych jest mniejsza niż położenie stropu ujmowanej warstwy wodonośnej, który znajduje się na głębokości 1194 m p.p.t. Oznacza to, że cały gaz, który pojawi się na powierzchni podczas eksploatacji otworu jest wcześniej rozpuszczony w wodzie podziemnej.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że występują istotne różnice między składem gazowym wody oznaczanym

w warunkach dynamicznych i statycznych. Należy sądzić, że nie są one wynikiem błędów oznaczeń, lecz są związane z mieszaniem się wód podziemnych. W warunkach dynamicznych istnieje możliwość zwiększonego dopływu do ujmowanej warstwy wód z innych warstw, o innym stopniu nasycenia gazem. W badaniach prowadzonych w warunkach statycznych efekt mieszania się wód jest zminimalizowany. Można więc uznać, że badania w warunkach statycznych lepiej odzwierciedlają skład gazowy wody w ujmowanej warstwie wodonośnej.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione podstawy teoretyczne dla otworów ujmujących nagazowane wody podziemne wskazują, że na podstawie znajomości parametrów w otworze w warunkach statycznych możliwe jest określanie:

- obniżenia zwierciadła wody w otworze, spowodowanego wydzielaniem się gazów z wody podziemnej [7 lub 8],
- wartości ciśnienia nasycenia [14],
- stężenia gazów w wodach podziemnych [15].

Przyjmując hipotetyczne wartości ciśnienia i temperatury na wypływie w separatorze można również określić wykładnik gazowy [18].

Analiza uzyskanych wzorów oraz właściwości gazów pozwalają również stwierdzić, że w przypadku, gdy ciśnienie głowicowe w otworze nie przekracza kilkudziesięciu barów oraz ujmowane wody nie są termalnymi, to powszechnie można stosować uproszczone wzory. Na ich podstawie można również określać wartość obniżenia zwierciadła wody w otworze [9], ciśnienie nasycenia [16], stężenie gazów w wodzie podziemnej [17] i wykładnik gazowy [19]. Dokładność oznaczeń za pomocą uproszczonych wzorów jest mniejsza, lecz powinna zawierać się w przedziale od kilku do 10%.

Rozważania teoretyczne potwierdzają przedstawione przykładowe wyniki obliczeń. Obliczenia wykonano na pod-

stawie danych występujących w warunkach statycznych dla dwóch otworów. Uzyskane w ten sposób wyniki porównano następnie z wynikami określonymi standardową metodą, tj. dla warunków dynamicznych. W pierwszym przykładzie, w którym w wodzie podziemnej rozpuszczony był tylko jeden gaz, obliczone wartości stężeń i wykładnika gazowego dla warunków statycznych i dynamicznych różniły się maksymalnie o 10%. W drugim przypadku, w którym w wodzie rozpuszczone były trzy gazy, uzyskano również zadawające wyniki.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że z teoretycznego punktu widzenia, wyniki dla warunków statycznych powinny lepiej charakteryzować wody w ujmowanej warstwie wodonośnej, niż w przypadku ich oceny w warunkach dynamicznych. Wynika to z faktu, że w warunkach dynamicznych istnieje zwiększona możliwość dopływu do ujmowanej warstwy wodonośnej wód z innych warstw wodonośnych, o innym stopniu nasycenia gazem. Podkreślić też należy, że oznaczenie stężenia gazów w warunkach statycznych jest znacznie tańsze, nie trzeba bowiem przeprowadzać długotrwałego i kosztownego pompowania wody z otworu.

Trzeba też wyraźnie stwierdzić, że w dokumentacji otworów ujmujących wody nagazowane powinna być zawsze podawana wartość ciśnienia głowicowego statycznego, które jest podstawą określania składu gazowego wód podziemnych.

LITERATURA

- CIEŻKOWSKI W., DULIŃSKI W., JÓZEFKO I., KIELCZAWA B., LIBER-MADZIARZ E., WITCZAK S., ZUBER A., ŻAK S., 2002 — Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce. Wrocław. Tow. Nauk., Wrocław.
- DULIŃSKI W., ROPA Cz., 2008 — Analiza i ustalenie parametrów eksploatacyjnych dla odwiertów wód mineralnych w zależności od wykładnika gazowego. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, **25**, 2: 243–249.
- KRAJČA J., 1977 — Płyiny v podzemnych vodch. SNTL, ALFA, Praha.
- ROPA Cz.E., DULIŃSKI W., 1999 — Ocena możliwości samoczynnego wydobywania i zagospodarowania nagazowanej wody mineralnej z odwiertu K-4a w Krynicy. *Inż. Środ.*, **4**, 1: 95–102.
- ŻAK S., 2005 — Modelowanie samowypływu szczaw z odwiertów. *Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Toruń: 749–754.
- ŻAK S., 2009 — Wydzielanie się gazów z wód podziemnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **436**, 2: 583–588.

SUMMARY

The article discusses a method of determining gas concentrations in groundwater under static conditions. The static conditions referred to the state when water is not drawn from the aquifer and water table position remains at a stable level. The described method is based exclusively on examining gases in a well extracting gas-rich groundwater. The performed analyses included measurements of static head pressure, atmospheric pressure, temperature and concentrations of particular gases flowing out of the well. The described theoretical basis also enables calculation of bubblepoint pressure, gas/water ratio and the depth of groundwater table in the well.

The presented determination method was used for calculating gas concentrations for two wells drawing gas-rich groundwaters. One of them extracted waters containing only carbon dioxide, while the other one drew waters with dissolved methane, nitrogen and carbon dioxide. The obtained calculation results, referring to static conditions, were compared with results obtained with the standard method based

on examining the amount and the properties of water-gas mixture flowing out of the well. In the former case, when water contained only one dissolved gas, the calculated concentration and gas/water ratio values for static and dynamic condition differed by no more than 10%. In the latter case, when three gases were dissolved in water, the results were also satisfactory.

The authors concluded that, from theoretical point of view, the obtained results should characterize the gas composition of water in the extracted aquifer better in static conditions than when they are assessed in dynamic conditions. This results from the fact that in dynamic conditions there is a bigger possibility that the extracted aquifer will be recharged by waters from other aquifers, with a different degree of saturation with gas.

Finally, the author emphasised that determining gas concentration is much cheaper in static than in dynamic conditions, as it does not require performing long and costly water pumping tests.