

Obliczeniowy model analityczny przebiegu eksploatacji wybranego podziemnego magazynu gazu

Paweł Zyzański 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

Streszczenie: W artykule przedstawiono pracę podziemnego magazynu gazu (PMG) „X”, wykorzystując autorski model analityczny dla pięciu cykli zatłaczania i odbioru, oraz wykonano prognozę szóstego cyklu z dołączeniem nowego odwiertu poziomego. W modelu analitycznym eksploatacji PMG wykorzystano następujące równania/korelacje/formuły: równanie stanu Redlicha–Kwonga do obliczenia współczynnika ściśliwości z , korelację Lee–Gonzaleza–Eakina do obliczania współczynnika lepkości dynamicznej gazu, korelację Joshiego do obliczania ciśnienia dennego dynamicznego dla odwiertu poziomego, formułę dwuczłonową do obliczania ciśnienia dennego dynamicznego dla odwiertu pionowego, równania przepustowości odwiertu do obliczania zmian ciśnienia głowicowego dynamicznego dla odwiertu pionowego i poziomego. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie wykresów. W końcowej części artykułu podano wnioski oraz przeprowadzono analizę wyników.

Słowa kluczowe: PMG, odwiert poziomy, odwiert pionowy, cykle zatłaczania i odbioru, ciśnienia denne dynamiczne, ciśnienia głowicowe dynamiczne

COMPUTATIONAL ANALYTICAL MODEL OF THE EXPLOITATION COURSE OF A SELECTED UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY

Abstract: This paper presents operation of the underground gas storage facility (UGS) “X” using the author’s analytical model for five injection and with-drawal cycles and a prognosis of the sixth cycle with the addition of a new horizontal well was made. The following equations/correlations/formulas were used in the analytical model for the operation of the UGS facility: Redlich–Kwong equation of state to calculate the compressibility factor z , Lee–Gonzalez–Eakin correlation to calculate the dynamic viscosity coefficient of the gas, Joshi correlation for the calculation of the dynamic bottom pressure for a horizontal well, two-part formula for calculating dynamic bottom pressure for a vertical well, well flow equations for calculating dynamic head pressure variations for vertical and horizontal wells. The results of the calculations are presented in the form of graphs. In the final part of the article, conclusions are given with an analysis of the results.

Keywords: UGS, horizontal well, vertical well, injection and withdrawal cycles, dynamic bottom hole pressures, dynamic head pressures

1. Wstęp

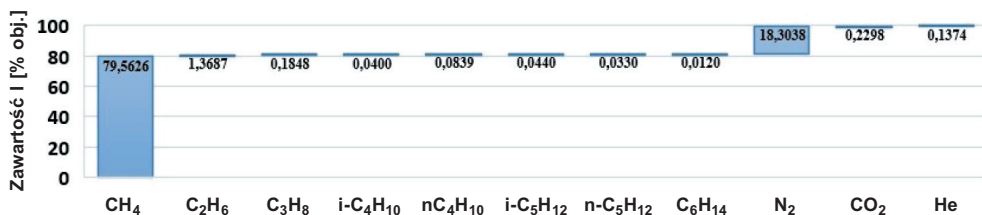
Magazynowanie gazu jest jednym z instrumentów zwiększających bezpieczeństwo energetyczne państwa dzięki utrzymywaniu zapasów obowiązkowych oraz zapasów handlowych. Łączna pojemność czynna magazynów gazu w naszym kraju wynosi obecnie 3,231 mld nm^3 , co wobec zużycia krajowego na poziomie około 20 mld nm^3 rocznie wystarczyłoby na mniej więcej dwa miesiące. Magazynowanie gazu ziemnego może być prowadzone w zlikwidowanych kopalniach, komorach skalnych czy też w zbiornikach naziemnych, jednakże najczęstszym sposobem magazynowania jest wykorzystanie podziemnych magazynów gazu (PMG) w częściowo wyeksploatowanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego, w warstwach wodonośnych lub w kawernach solnych. Biorąc pod uwagę udział poszczególnych magazynów w łącznej pojemności czynnej magazynów na świecie, można stwierdzić, że pierwsze miejsce zajmują wyeksploatowane złoża gazu ziemnego, w których zmagazynowane jest około 76% tego surowca. Wykorzystanie istniejących odwiertów i infrastruktury napowierzchniowej oraz istniejących już połączeń z głównymi gazociągami obniża znacząco koszty budowy tego typu magazynu. Koszty zredukowane są również dzięki wcześniej poniesionym nakładom na badania geofizyczne oraz dzięki istnieniu niewydobytych ilości gazu stanowiących pojemność buforową. Biorąc pod uwagę potrzebę podniesienia bezpieczeństwa energetycznego naszego kraju, można uznać, że magazyny w wyeksploatowanych złożach są jednym z rozsądnych rozwiązań, także ze względu na dostępność potencjalnych złóż pod ich budowę.

2. Charakterystyka geologiczna wybranego złoża gazu przeznaczzonego na PMG

Złoże gazu ziemnego „X” znajduje się w środkowej części monokliny przedsudectkiej na północnym skraju wyniesionego karbońskiego elementu tektonicznego (wał wolsztyński). Strukturę złoża „X” stanowi rafa w wapieniu cechsztyńskim wykształcona na paleowyniesieniu w podłożu cechsztynu (PGNiG 2006).

W rafie budującej złożo gazu ziemnego „X” stwierdzono w profilu 87,5 m wapien cechsztyński wykształcony w postaci przepuszczalnych i porowatych skał. Złoże „X” ma charakter masywowo-warstwowy z wolumetrycznym systemem energetycznym o powierzchni około 1,53 km^2 . Rafowe utwory węglanowe mają średnią porowatość efektywną 14,98%, przepuszczalność 22,84 mD, zawodnienie rzędu 14% oraz zailenienie 8,14%. Parametry wskazują na dobrą zdolność tego kompleksu do magazynowania gazu (PGNiG 2006, 2009a, 2009b, 2010).

Cały profil wapienia cechsztyńskiego jest nasycony gazem o zawartości węglodorów około 81,33%, bezgazolinowym o pewnej zawartości azotu bez zawartości siarkowodoru. Parametry energetyczne tego gazu to: ciepło spalania 33,11 MJ/nm³, wartość opałowa 29,89 MJ/nm³ i liczba Wobbego 41,25 MJ/nm³ (PGNiG 2006, 2009a, 2009b, Gąska i in. 2012). Na rysunku 1 przedstawiono objętościowy skład gazu.



Rys. 1. Skład chemiczny gazu ze złoża „X”

Źródło: opracowanie własne na podstawie PGNiG (2010)

3. Ilościowa charakterystyka eksploatacji złoża „X”

Na podstawie dokumentacji wynikowej odwiertów eksploatacyjnych – pionowego „V” i poziomego „H” – oraz dokumentacji geologicznej złoża gazu ziemnego „X” w kat. B określono całkowite zasoby złoża na około 1,11 mld nm³, z czego wydobyto 546,367 mln nm³, co stanowi 99,8% zatwierdzonych zasobów przemysłowych i 49,2% zasobów geologicznych gazu ziemnego. Natomiast 563,633 mln nm³ zostało wykorzystane jako gaz buforowy na potrzeby PMG. Początkowe ciśnienie złożowe wyniosło 18,3 MPa (PGNiG 2010).

4. Eksploatacja złoża „X” jako podziemnego magazynu gazu

Po zakończeniu eksploatacji gazu złożo „X” zostało przekształcone w podziemny magazyn gazu. Analizując pracę tego magazynu, autor wziął pod uwagę wyniki pięciu cykli zatłaczania i odbioru gazu. We wszystkich tych cyklach wykorzystywane były zazwyczaj dwa odwierty: jeden pionowy „V” oraz jeden poziomy „H”, natomiast w szóstym cyklu został dołączony jeszcze jeden odwiert poziomy, „H2”, o parametrach takich jak odwiert „H”. Podyktowane to było zwiększeniem pojemności czynnej magazynu z 200 mln nm³ do 330 mln nm³.

Istotne w pracy podziemnego magazynu gazu są dwa czynniki: pojemność magazynu i maksymalna dopuszczalna zdolność odbioru gazu. W przypadku PMG „X” wydatek dozwolony dla odwiertu pionowego „V” ustalono na poziomie 330 nm³/min, a dla odwiertów poziomych „H” i „H2” – na poziomie 788,4 nm³/min.

5. Metodyka obliczeń pracy podziemnego magazynu gazu

Uproszczony algorytm analitycznego obliczania pracy PMG składa się z etapów przedstawionych w podrozdziałach 5.1–5.5¹.

5.1. Obliczenie zasobów początkowych gazu w złożu

Zasoby początkowe gazu w złożu zostały wyliczone metodą objętościową:

$$G = \frac{A_{zl} \cdot h_{sr} \cdot \phi \cdot (1 - S_w)}{B_g(P_i)} \quad (1)$$

Współczynnik objętościowy gazu B_g został wyznaczony z zależności termodynamicznej:

$$B_g = P_n \cdot z \cdot \frac{T_{zl}}{T_n \cdot P} \quad (2)$$

Współczynnik ściśliwości z został obliczony przy użyciu równania Redlicha–Kwonga:

$$z = \text{root} \left(z - \left(\frac{z}{z - B} - \frac{A}{z + B} \right), z \right) \quad (3)$$

$$A = n \cdot \frac{P}{R^2 \cdot T_{sr}^{2,5}} \quad (4)$$

$$B = m \cdot \frac{P}{R \cdot T_{sr}} \quad (5)$$

$$n = \frac{R^2 \cdot T_{pkr}^{2,5}}{2,3393 \cdot P_{pkr}} \quad (6)$$

$$m = \frac{R \cdot T_{pkr}}{11,5420 \cdot P_{pkr}} \quad (7)$$

¹ Spis oznaczeń zamieszczono na końcu artykułu.

5.2. Obliczenie współczynnika lepkości dynamicznej

W celu obliczenia współczynnika lepkości dynamicznej autor wykorzystał korelację Lee–Gonzaleza–Eakina:

$$\mu = U \cdot e^{\left(X_i \left(\frac{P}{1000} \right)^{Y_i} \right)} \cdot 10^{-7} \quad (8)$$

Gęstość eksploatowanego gazu została wyznaczona z równania stanu:

$$\rho = \frac{P}{z \cdot R_i \cdot T_{sr}} \quad (9)$$

Parametr U został wyznaczony za pomocą zależności:

$$U = \frac{(9,4 + 0,02 \cdot M_{sr}) \cdot (T_{sr})^{1,5}}{209 + 19 \cdot M_{sr} + T_{sr}} \quad (10)$$

Wartości parametrów X_i oraz Y_i zostały obliczone z wykorzystaniem zależności:

$$X_i = 3,5 + \frac{986}{T_{sr}} + 0,01 \cdot M_{sr} \quad (11)$$

$$Y_i = 2,4 - 0,2 \cdot X \quad (12)$$

5.3. Obliczenie bieżącego ciśnienia złożowego

Bieżące ciśnienie złożowe obliczano za pomocą równania bilansu masowego:

$$P_z(G_p) := \text{root} \left(\frac{P}{z(P)} - \frac{P_i}{z_i} \cdot \left(1 - \frac{G_p}{G} \right), P \right) \quad (13)$$

5.4. Obliczenia ilości zatłoczonego gazu

Ilość zatłoczonego gazu określana jest za pomocą zależności:

$$G_{z1} = i_V \cdot t_{zatV} \cdot q_{zatV} + i_H \cdot t_{zatH} \cdot q_{zatH} \quad (14)$$

5.5. Obliczenia ilości odebranego gazu

Ilość odebranego gazu obliczana jest z wykorzystaniem zależności:

$$G_{o1} = i_V \cdot t_{odbV} \cdot q_{odbV} + i_H \cdot t_{odbH} \cdot q_{odbH} \quad (15)$$

5.6. Obliczenia ciśnienia dennego dynamicznego oraz ciśnienia głowicowego dynamicznego podczas cyklu zatłaczania i cyklu odbioru

W celu obliczenia zmian ciśnienia dennego dynamicznego przy zatłaczaniu/odbiorze autor posłużył się formułą dwuczłonową (16) dla odwiertu pionowego oraz formułą Joshiego (19) dla odwiertu poziomego:

- obliczenie ciśnienia dennego dynamicznego dla odwiertu pionowego w cyklu zatłaczania:

$$P_{dV}(P, q) = \sqrt[2]{P^2 + a \cdot q_{zatłV} + b \cdot q_{zatłV}^2} \quad (16)$$

- określenie współczynników do formuły dwuczłonowej:

$$a = \frac{\mu \cdot z \cdot P_n \cdot T}{\pi \cdot k \cdot h_{sr} \cdot T_n} \cdot \left(\ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_m \right) \quad (17)$$

$$b = \frac{\mu \cdot z \cdot P_n \cdot T}{\pi \cdot k \cdot h_{sr} \cdot T_n} \cdot D_t \quad (18)$$

- obliczenie ciśnienia dennego dynamicznego dla odwiertu poziomego w cyklu zatłaczania:

$$P_{dH}(P, q, \mu, z) =$$

$$= \sqrt[2]{(P)^2 + \frac{\left(q_{zatłH} \cdot \left(\mu \cdot P_n \cdot z \cdot T_{zt} \cdot \ln \left(\frac{\left(a_{poz} + \sqrt{(a_{poz})^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \right)}{\frac{L}{2}} \right) + \frac{I_{ani} \cdot h_{sr}}{L} \cdot \left(\left(\ln \left(\frac{I_{ani} \cdot h_{sr}}{r_w \cdot (I_{ani} + 1)} \right) - \frac{3}{4} \right) + S_h \right) \right) \right)}{\pi \cdot k \cdot h_{sr} \cdot T_n}} \quad (19)$$

W celu obliczenia zmian ciśnienia dennego dynamicznego przy odbiorze dla odwiertu pionowego P_{doV} posłużono się również formułą dwuczłonową (16), a w przypadku poziomego P_{doH} – formułą Joshiego (19), jednakże we wzorach wydatek zatłaczania $q_{zatłV}$ został zmieniony na wydatek odbioru q_{odbV} .

W celu obliczenia zmian ciśnień głowicowych dynamicznych przy zatłaczaniu/ odbiorze autor posłużył się równaniem przepustowości odwiertu dla odwiertu pionowego (20) i poziomego (22):

- obliczenie ciśnienia głowicowego dynamicznego z równania przepustowości odwiertu dla odwiertu pionowego przy zatłaczaniu:

$$P_{gV} = \sqrt[2]{\frac{((P_{dV})^2 + B_V \cdot (q_{zatłV})^2)}{e^{\left(\frac{2 \cdot g \cdot H_{pionV}}{z \cdot R_i \cdot T_{sr}}\right)}}} \quad (20)$$

$$B_V = 8 \cdot \frac{\lambda_V \cdot P_n^2 \cdot z^2 \cdot (T_{sr})^2 \cdot \left(e^{\left(\frac{2 \cdot g \cdot H_{pionV}}{z \cdot R_i \cdot T_{sr}}\right)} - 1\right)}{\pi \cdot d_V^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \quad (21)$$

- obliczenie ciśnienia głowicowego dynamicznego z równania przepustowości odwiertu dla odwiertu poziomego przy zatłaczaniu:

$$P_{gH} = \sqrt[2]{\frac{((P_{dH})^2 + B_H \cdot (q_{zatłH})^2)}{e^{\left(\frac{2 \cdot g \cdot H_{pozH}}{z \cdot R_i \cdot T_{sr}}\right)}}} \quad (22)$$

$$B_H = 8 \cdot \frac{\lambda_H \cdot P_n^2 \cdot z^2 \cdot (T_{sr})^2 \cdot \left(e^{\left(\frac{2 \cdot g \cdot H_{pozH}}{z \cdot R_i \cdot T_{sr}}\right)} - 1\right)}{\pi \cdot d_H^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \quad (23)$$

W celu obliczenia zmian ciśnień głowicowych dynamicznych przy odbiorze dla odwiertu pionowego P_{goV} oraz poziomego P_{goH} posłużono się również równaniem przepustowości odwiertu, jednakże we wzorach wydatek zatłaczania $q_{zatłV}$ zmieniono na wydatek odbioru q_{odbV} . Ponadto we wzorach zamienione są również ciśnienia denne dynamiczne w cyklu zatłaczania: P_{dV} , P_{dH} na ciśnienia denne dynamiczne w cyklu odbioru: P_{doV} , P_{doH} .

6. Założenia dotyczące zatłaczania/odbioru gazu do/z PMG „X”

6.1. Założenia dotyczące zatłaczania gazu do PMG „X”

Czas zatłaczania gazu w poszczególnych pięciu cyklach eksploatacji PMG „X” został przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 1
Liczba dni zatłaczania gazu w poszczególnych cyklach eksploatacji PMG „X”

Numer cyklu zatłaczania	Liczba dni zatłaczania odwiertem pionowym „V”	Liczba dni zatłaczania odwiertem poziomym „H”
1	77	77
2	173	178
3	130	145
4	115	115
5	110	116

Na podstawie dokumentacji PGNiG przyjęto:

- maksymalny wydatek zatłaczania odwiertu pionowego $q_V = 480\,000\text{ nm}^3/\text{d}$,
- maksymalny wydatek zatłaczania odwiertu poziomego $q_H = 1\,135\,300\text{ nm}^3/\text{d}$,
- maksymalne ciśnienie głowicowe tłoczenia $P_{\max} = 190$ barów.

Źródło: PGNiG (2009a, 2009b, 2010)

6.2. Założenia dotyczące odbioru gazu od PMG „X”

Czas odbioru gazu w poszczególnych pięciu cyklach eksploatacji PMG „X” został przedstawiony w tabeli 2.

Tabela 2
Liczba dni odbioru gazu w poszczególnych cyklach eksploatacji PMG „X”

Numer cyklu odbioru	Liczba dni odbioru odwiertem pionowym „V”	Liczba dni odbioru odwiertem poziomym „H”
1	94	124
2	105	120
3	60	140
4	10	100
5	101	111

Na podstawie dokumentacji PGNiG przyjęto:

- maksymalną depresję odbioru odwiertu pionowego $\Delta P_{ooV} = 2,7$ bara,
- maksymalną depresję odbioru odwiertu poziomego $\Delta P_{ooH} = 8,6$ bara,
- minimalne ciśnienie głowicowe odbioru $P_{glo} = 100$ bara.

Źródło: opracowanie własne na podstawie PGNiG (2009a, 2009b, 2010)

Do wykonania prognozy szóstego cyklu autor przyjął przedstawione poniżej założenia.

Liczbę dni zatłaczania gazu w szóstym cyklu eksploatacji PMG „X” przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3
Liczba dni zatłaczania gazu w szóstym cyklu eksploatacji PMG „X”

Numer cyklu zatłaczania	Liczba dni zatłaczania odwiertem pionowym „V”	Liczba dni zatłaczania odwiertem poziomym „H”
6	150	150

Wartości pozostałych parametrów pozostały takie same jak w poprzednich cyklach.

Liczbę dni odbioru gazu w szóstym cyklu eksploatacji PMG „X” przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4
Liczba dni odbioru gazu w szóstym cyklu eksploatacji PMG „X”

Numer cyklu odbioru	Liczba dni odbioru odwiertem pionowym „V”	Liczba dni odbioru odwiertem poziomym „H”
6	120	120

Wartości pozostałych parametrów pozostały takie same jak w poprzednich cyklach.

W tabeli 5 zostały zawarte dane dotyczące ilości gazu zatłaczanego i odbieranego oraz bilans ilości gazu na koniec każdego z pięciu cykli eksploatacji PMG „X”.

Tabela 5
Ilości gazu zatłaczanego i odbieranego w poszczególnych cyklach eksploatacji PMG „X”

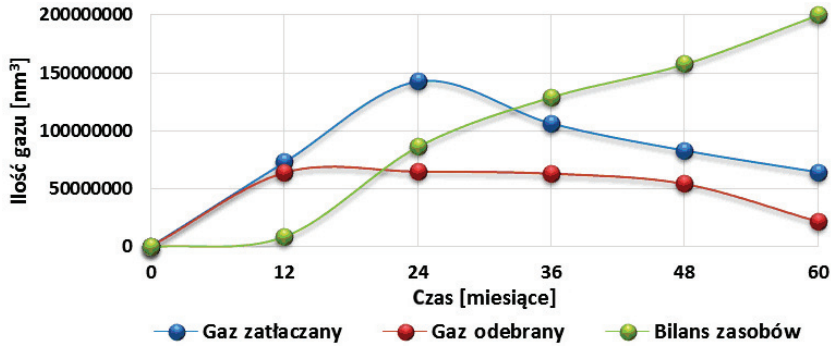
Numer cyklu	Gaz zatłaczany [nm ³]	Gaz odebrany [nm ³]	Bilans zasobów [nm ³]
1	72 968 156	64 301 620	8 666 536
2	142 605 963	65 081 846	86 187 771
3	106 160 091	63 286 659	129 061 203
4	82 849 614	54 333 530	157 577 287
5	64 183 375	21 763 621	199 997 041

Źródło: opracowanie własne na podstawie PGNiG (2009a, 2009b, 2010)

Na podstawie danych z tabeli 5 został sporządzony wykres ilustrujący zmienną ilość gazu podczas eksploatacji PMG „X” (rys. 2).

Z analizy rysunku 2 wynika, że ilość zatłaczanego gazu w początkowych dwóch cyklach wzrasta liniowo, osiągając szczyt na poziomie 142,6 mln nm³, a w późniejszych cyklach spada jednostajnie do poziomu około 64 mln nm³. Jeżeli chodzi o ilość odebranego gazu, to przez okres pierwszych trzech cykli utrzymuje się ona na stałym poziomie wynoszącym 63–65 mln nm³, natomiast w kolejnych dwóch cyklach zmniejsza

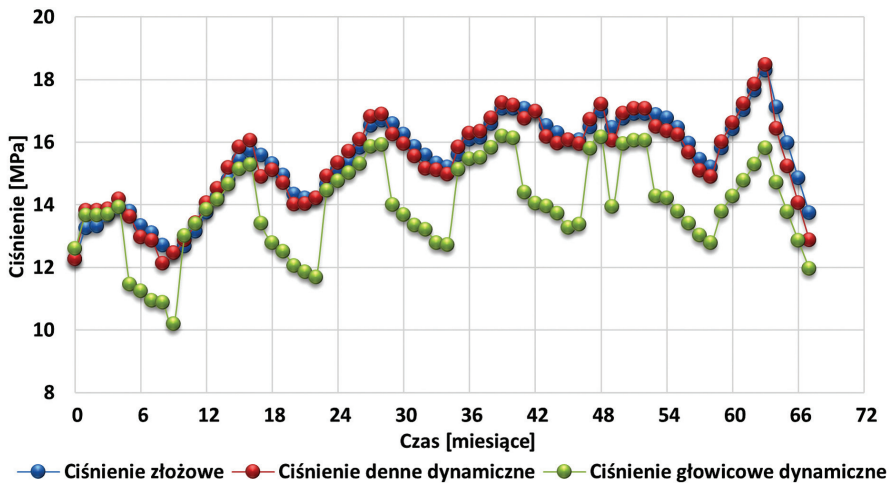
się o 2/3 i wynosi około 21,8 mln nm^3 . Na podstawie analizy bilansu zasobów można stwierdzić, że stan magazynowy się zwiększa, osiągając na koniec piątego cyklu całkowitą pojemność czynną PMG „X”.



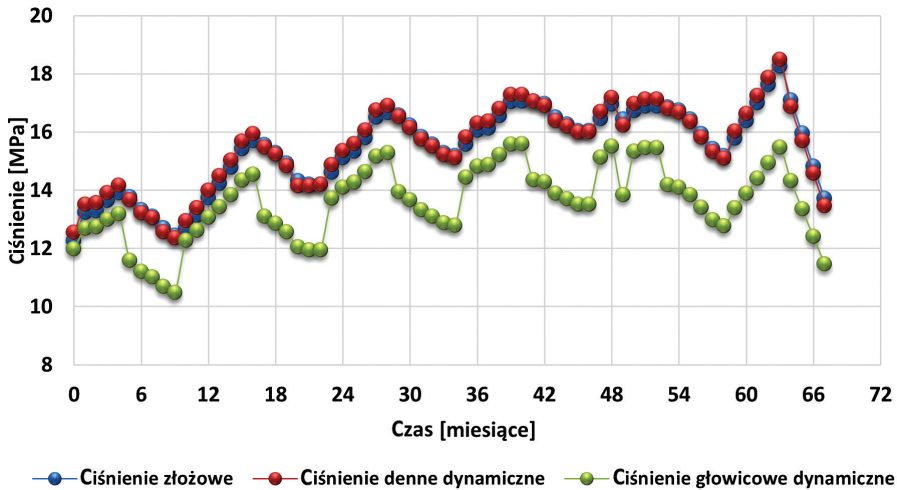
Rys. 2. Eksploatacja PMG „X” w poszczególnych cyklach
Źródło: opracowanie własne na podstawie PGNiG (2009a, 2009b, 2010)

7. Wyniki zastosowanego modelu analitycznego

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono obliczone przez autora ciśnienia denne oraz złożowe i głowicowe. Obliczenia dotyczące pięciu cykli oparte są na dokumentacji wynikowej odwiertów eksploatacyjnych – pionowego i poziomego – którymi prowadzona jest eksploatacja PMG „X”, natomiast dane dotyczące szóstego cyklu eksploatacji (od 59. miesiąca) stanowią autorską prognozę.



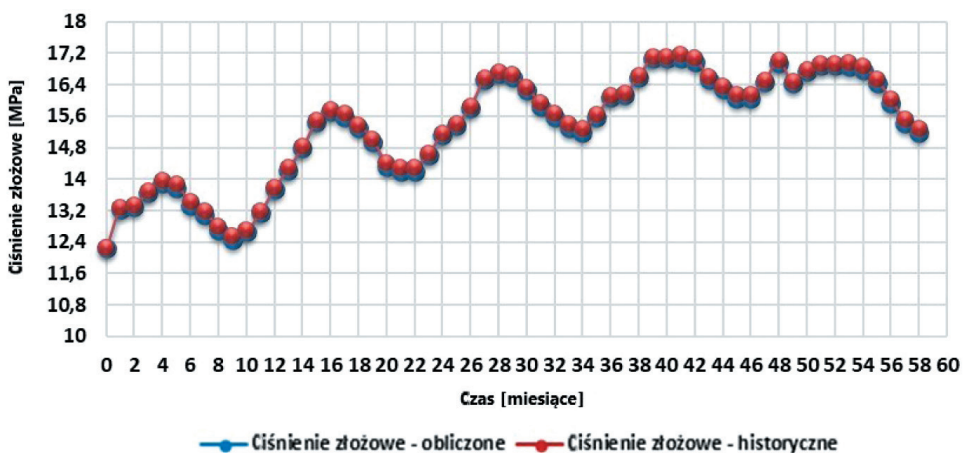
Rys. 3. Zmiany ciśnienia złożowego, dennego dynamicznego oraz głowicowego dynamicznego w odwiercie pionowym w funkcji czasu



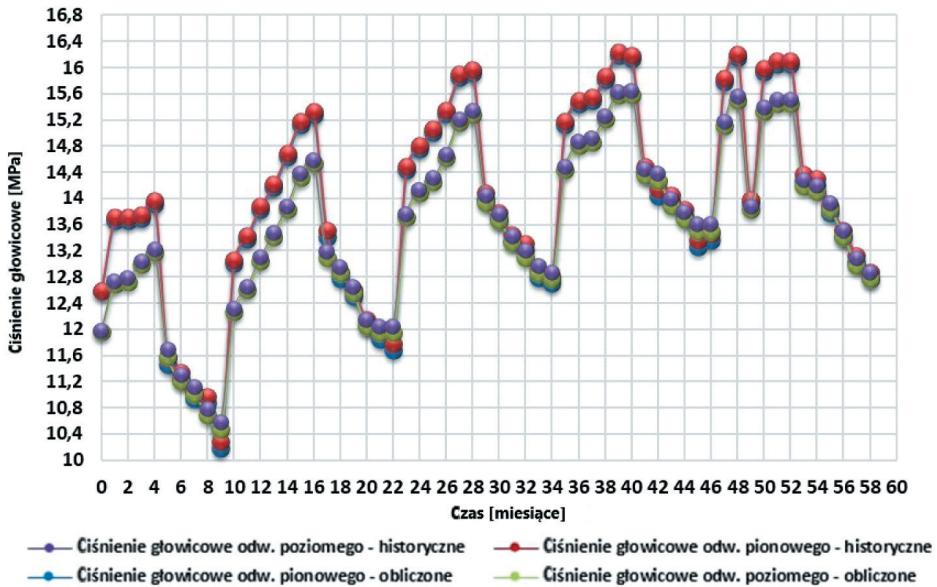
Rys. 4. Zmiany ciśnienia złożowego, dennego dynamicznego oraz głowicowego dynamicznego w odwiercie poziomym w funkcji czasu

Analizując wykresy ciśnień dennych oraz złożowych odwiertu pionowego i poziomego dla pięciu cykli eksploatacji, można zauważyć niewielkie różnice w ich przebiegu, natomiast w chwili odbioru gazu widoczny jest wyraźny spadek ciśnienia głowicowego.

Na rysunkach 5 i 6 autor zestawiał obliczone przez siebie ciśnienia złożowe i głowicowe z danymi historycznymi dotyczącymi odwiertu pionowego i poziomego zawartymi w dokumentacji wynikowej odwiertów „V” oraz „H” eksploatujących PMG „X” w czasie pięciu cykli zatłaczania i odbioru gazu.



Rys. 5. Ciśnienia złożowe obliczone i oparte na danych historycznych w odwiercie pionowym „V” oraz poziomym „H”



Rys. 6. Ciśnienia głowicowe obliczone i oparte na danych historycznych w odwiercie pionowym „V” oraz poziomym „H”

Przebieg krzywych ciśnienia złożowego (rys. 5) oraz krzywych ciśnień głowicowych (rys. 6) obliczonych jest prawie identyczny jak przebieg krzywych tych ciśnień oszacowanych na podstawie danych historycznych – różnica wynosi około 0,5 bara, co potwierdza dobre odwzorowanie pracy magazynu przy użyciu sporządzonego uproszczonego modelu analitycznego.

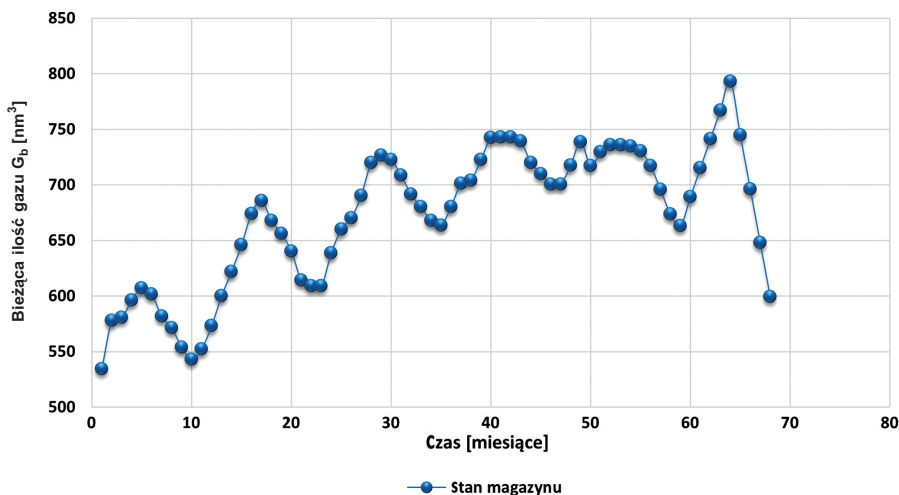
W związku z eksploatacją podziemnego magazynu gazu „X” na rysunku 7 autor przedstawił bieżącą ilość gazu w PMG w okresie pięciu cykli zatłaczania i odbioru gazu, tzn. od 0. do 58. miesiąca, natomiast dla cyklu szóstego, od 59. miesiąca, została wykonana autorska prognoza pracy magazynu.

Analizując stan magazynu w kolejnych cyklach, można stwierdzić stopniowe zwiększanie ilości gazu w PMG, co przejawia się większą ilością zatłoczonego gazu w stosunku do gazu odbieranego. W szóstym cyklu, stanowiącym prognozę, następuje natomiast odbiór całej pojemności czynnej PMG „X”.

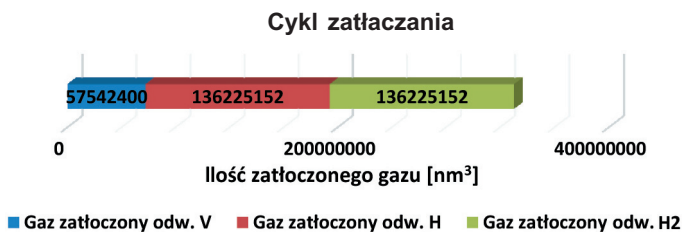
Na rysunkach 8 i 9 autor przedstawił na podstawie prognozy dotyczącej szóstego cyklu pracy PMG „X” ilości gazu zatłoczonego oraz odebranego odwiertem pionowym oraz odwiertami poziomymi.

Na podstawie przeprowadzonej przez autora prognozy szóstego cyklu pracy PMG „X” można stwierdzić, że pojemność czynna magazynu dzięki odwierceniu kolejnego poziomego odwiertu eksploatacyjnego „H2” wzrosła z 200 mln nm^3 do 330 mln nm^3 , co stanowi wzrost o 60,6%. W ciągu 150 dni w fazie zatłaczania przy wydajnościach maksy-

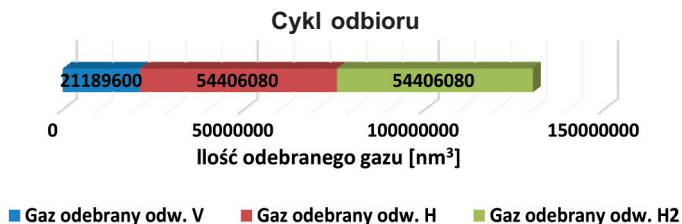
malnych rzędu $1,63 \text{ nm}^3/\text{s}$ w przypadku odwiertu pionowego „V” oraz $4,198 \text{ nm}^3/\text{s}$ w odwiertach poziomych „H” i „H2” uzyskano maksymalną pojemność czynną 330 mln nm^3 , natomiast odbiór został przeprowadzony w ciągu 120 dni przy maksymalnych wydajnościach odwiertów wynoszących odpowiednio $5,5 \text{ nm}^3/\text{s}$ dla odwiertu pionowego „V” oraz $13,139 \text{ nm}^3/\text{s}$ dla odwiertów poziomych „H” i „H2”, umożliwiając tym samym odebranie całej pojemności czynnej gazu z magazynu.



Rys. 7. Zależności stanu magazynu G_b [nm³] od czasu [miesiące]
 Źródło: opracowanie własne na podstawie PGNiG (2009a, 2009b, 2010)



Rys. 8. Ilości gazu zatłaczanego w prognozowanym cyklu eksploatacji PMG „X”



Rys. 9. Ilości gazu odbieranego w prognozowanym cyklu eksploatacji PMG „X”

Podsumowując bilans szóstego cyklu, stwierdzono, że odwiertem pionowym odebrano o 36 352 800 nm³ gazu więcej niż zatłoczono, a z odwiertów poziomych łącznie odebrano o 163 638 144 nm³ gazu więcej w stosunku do ilości zatłoczonej przez te odwierty.

8. Wnioski

Projektowanie poprawnej eksploatacji PMG jest zagadnieniem złożonym nie tylko ze względu na technologię procesu, ale przede wszystkim na warunki ekonomiczne, w jakich będzie odbywało się magazynowanie gazu. Z jednej strony należy brać pod uwagę warunki geologiczne struktury, w której magazynuje się gaz, z drugiej – koszt gazu przeznaczonego do magazynowania, zapotrzebowanie rynku na gaz oraz koszt pracy urządzeń potrzebnych w tym procesie. Wszystko to składa się na cenę magazynowanego gazu.

Planując przekształcenie szcherpanego złoża gazu ziemnego w PMG, należy brać pod uwagę jego szczelność oraz stan zasobów na koniec eksploatacji. Ilość pozostałego gazu stanowi w całości lub w części tzw. gaz buforowy, który jest konieczny do prawidłowej pracy przyszłego magazynu. Jego ilość wpływa zasadniczo na czas i koszty budowy PMG.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że odwierty poziome są około 2–3 razy bardziej efektywne od tych pionowych. Spowodowane jest to oczywiście tym, że mają większy kontakt ze złożem i większą strefę drenażu, co pozwala na zastosowanie większych średnic rur wydobywczych oraz na ustalenie dla nich większych wydatków dozwolonych.

Przy założeniu, iż przyjęte w obliczeniach czasy cykli zatłaczania oraz cykli odbioru są takie same jak w rzeczywistości, a także że przyjęte wydatki dokładnie odzwierciedlają wydatki rzeczywiste, stwierdzono, że wyniki obliczeń dotyczących ciśnień odwiertów są zbieżne z wartościami rzeczywistymi – różnią się jedynie o 0,5 bara, co wskazuje na dobre odwzorowanie analitycznego modelu i możliwości wykorzystania go w prognozowaniu dalszej pracy PMG.

Na podstawie przeprowadzonej prognozy szóstego cyklu pracy PMG została zwiększona pojemność czynna magazynu z 200 mln nm³ do 330 mln nm³. Stało się to możliwe dzięki wykonaniu jeszcze jednego odwiertu poziomego „H2” o parametrach takich jak „H”. W prognozie eksploatacja odbywa się przy założeniu maksymalnej ilości gazu, jaką można było zatłoczyć w ciągu 150 dni w fazie zatłaczania, natomiast odbiór prowadzony był w ciągu 120 dni przy maksymalnych wydajnościach odwiertów, w celu odebrania całej pojemności czynnej gazu z magazynu.

Spis oznaczeń

- a, b – współczynniki formuły dwuczłonowej,
 a_{poz} – połowa długości elipsoidy oddziaływania odwiertu poziomego,
 A_{z1} – powierzchnia złoża,
 A, B – parametry równania wielomianowego trzeciego stopnia na współczynnik ściśliwości gazu,
 B_g – współczynnik objętościowy gazu,
 B_H – parametr równania przepustowości odwiertu poziomego,
 B_V – parametr równania przepustowości odwiertu pionowego,
 d_H – średnica rur wydobywczych odwiertu poziomego,
 d_V – średnica rur wydobywczych odwiertu pionowego,
 D_t – współczynnik turbulencji,
 G – całkowite zasoby złoża,
 G_b – bieżąca ilość gazu w podziemnym magazynie gazu,
 G_{o1} – ilość odebranego gazu,
 G_p – ilość wydobytego gazu po miesiącu,
 G_{z1} – ilość zatłoczonego gazu,
 h_{sr} – średnia miąższość złoża,
 H_{pionV} – głębokość odwiertu pionowego „V”,
 H_{pozH} – głębokość odwiertu poziomego „H”,
 i_H – liczba odwiertów poziomych,
 i_V – liczba odwiertów pionowych,
 I_{ani} – współczynnik anizotropii ośrodka porowatego,
 k – przepuszczalność złoża,
 L – długość odcinka poziomego odwiertu,
 m – miara objętości zajmowanej przez cząsteczki gazu,
 M_{sr} – masa molowa mieszaniny gazu,
 n – miara siły przyciągania między cząsteczkami gazu,
 P – ciśnienie,
 P_{dH} – ciśnienie denne dynamiczne dla odwiertu poziomego przy zatłaczaniu,
 P_{dV} – ciśnienie denne dynamiczne dla odwiertu pionowego przy zatłaczaniu,
 P_{doH} – ciśnienie denne dynamiczne dla odwiertu poziomego przy odbiorze,
 P_{doV} – ciśnienie denne dynamiczne dla odwiertu pionowego przy odbiorze,
 P_{gH} – ciśnienie głowicowe dynamiczne dla odwiertu poziomego przy zatłaczaniu,
 P_{gV} – ciśnienie głowicowe dynamiczne dla odwiertu pionowego przy zatłaczaniu,
 P_{glo} – minimalne ciśnienie głowicowe odbioru,
 P_{goH} – ciśnienie głowicowe dynamiczne dla odwiertu poziomego przy odbiorze,

- P_{goV} – ciśnienie głowicowe dynamiczne dla odwiertu pionowego przy odbiorze,
 P_i – ciśnienie początkowe w złożu,
 P_{max} – maksymalne ciśnienie głowicowe tłoczenia,
 P_n – ciśnienie normalne,
 P_{pkr} – ciśnienie pseudokrytyczne mieszaniny gazu,
 P_z – ciśnienie złożowe,
 q_H – maksymalny wydatek zatłaczania odwiertu poziomego,
 q_{odbH} – wydatek odbioru na odwiercie poziomym,
 q_{odbV} – wydatek odbioru na odwiercie pionowym,
 q_V – maksymalny wydatek zatłaczania odwiertu pionowego,
 q_{zatH} – wydatek zatłaczania na odwiercie poziomym,
 q_{zatV} – wydatek zatłaczania na odwiercie pionowym,
 r_e – promień strefy oddziaływania odwiertu,
 r_w – promień odwiertu,
 $root$ – funkcja celu w programie Mathcad,
 R – uniwersalna stała gazowa,
 R_i – indywidualna stała gazowa mieszaniny gazu,
 S_h – *skin effect* w odwiercie poziomym,
 S_m – *skin effect* mechaniczny,
 S_w – nasycenie wodą,
 t_{odbH} – czas odbioru w ciągu jednego miesiąca dla odwiertu poziomego,
 t_{odbV} – czas odbioru w ciągu jednego miesiąca dla odwiertu pionowego,
 t_{zatH} – czas zatłaczania w ciągu jednego miesiąca dla odwiertu poziomego,
 t_{zatV} – czas zatłaczania w ciągu jednego miesiąca dla odwiertu pionowego,
 T_{glo} – temperatura na głowicy odwiertu,
 T_n – temperatura normalna,
 T_{pkr} – temperatura pseudokrytyczna mieszaniny gazu,
 T_{sr} – temperatura średnia w odwiercie,
 T_{zl} – temperatura złożowa,
 U, X_i, Y_i – parametry do wyznaczenia współczynnika lepkości dynamicznej,
 z – współczynnik ściśliwości gazu,
 z_i – współczynnik ściśliwości gazu dla składnika i ,
 ΔP_{ooH} – maksymalna depresja odbioru dla odwiertu poziomego,
 ΔP_{ooV} – maksymalna depresja odbioru dla odwiertu pionowego,
 λ_H – współczynnik oporów przepływu odwiertu poziomego,
 λ_V – współczynnik oporów przepływu odwiertu pionowego,
 μ – współczynnik lepkości dynamicznej gazu,
 ρ – gęstość eksploatowanego gazu,
 ϕ – porowatość złoża.

Literatura

- Gąska K., Hoszowski A., Gmiński Z., Kurek A., 2012, *Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce* [oprac. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego. Oddział Warszawa II], Oficyna Wydawnicza ASPRA-JR, Warszawa.
- PGNiG Oddział Zielona Góra, 2006, Aktualizacja studium wykonalności dla PMG „X” na bazie częściowo szcerpanego złoża gazu ziemnego „X”, Zielona Góra [materiały niepublikowane].
- PGNiG SA w Warszawie, 2009a, Dokumentacja wynikowa odwiertu eksploatacyjnego „V”, Poznań [materiały niepublikowane].
- PGNiG SA w Warszawie, 2009b, Dokumentacja geologiczna złoża gazu ziemnego „X” w kat. B, Zielona Góra [materiały niepublikowane].
- PGNiG SA w Warszawie, 2010, Dokumentacja wynikowa odwiertu eksploatacyjnego „H”, Zielona Góra [materiały niepublikowane].