

Czesław Rybicki*, Jacek Blicharski*

PROBLEMY PRZEMIESZCZANIA SIĘ WODY ZŁOŻOWEJ W CZASIE EKSPLOATACJI ZŁOŻ GAZU ZIEMNEGO I PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW GAZU

1. WPROWADZENIE

Eksploracja złoża wiąże się z powstaniem strefy obniżonego ciśnienia wokół odwiertu, wyniku czego następuje dopływ płynów złożowych. Zaburzenie ciśnienia obejmuje stopniowo strefę wodonośną, powodując przemieszczanie się wody w kierunku centrum złoża. Ruch wody odbywa się najczęściej w sposób nieregularny i może prowadzić do powstawania języków lub stożków wodnych.

Tworzenie się nieregularnych form przemieszczania się wody ma istotne znaczenie dla procesu eksploatacji gazu, bowiem może w sposób nieoczekiwany zmniejszać wydatek dopływu gazu do odwiertów lub doprowadzić do zaniku eksploatacji. Zmniejszanie się wydajności odwiertu w wyniku dopływu wody jest spowodowane gromadzeniem się wody na dnie odwiertu, co prowadzi do spadku ciśnienia w odwiercie, koniecznego do wyniesienia mieszaniny gazowo-wodnej na powierzchnię.

W granicznym przypadku woda dopływająca ze złoża do odwiertu może nie być wydobywana wraz z gazem, blokując dopływ gazu i prowadząc do stopniowego wyłączenia odwiertu z eksploatacji. Zatem ruch wody złożowej w strukturze złoża i jego śledzenie są istotne dla każdego złoża, a szczególnie są ważne dla podziemnego magazynowania gazu, gdzie występuje cykliczne przemieszczanie się wody w złożu.

W artykule przedstawiono rozważania dotyczące problemów oceny warunków energetycznych oraz intensywności dopływu wody oraz wykonano obliczenia dla przykładowego złoża gazu.

W obliczeniach przyjęto tłokowy charakter wypierania gazu przez wodę oraz przyjęto, że skała jest sztywna.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

2. OCENA WARUNKÓW ENERGETYCZNYCH ZŁOŻA GAZU

W celu wykonania właściwej prognozy eksploatacji złoża, niezbędne jest określenie mechanizmu jego pracy, tzn. określenie charakteru zmian ciśnienia złożowego w funkcji wydobywania celem odtworzenia dotychczasowego przebiegu eksploatacji (*history match*). Złoże gazu ziemnego może pracować jako złoże niewolumetryczne (zmienna objętość przestrzeni porowej) lub wolumetryczne (stała objętość przestrzeni porowej). Większość złóż zachowuje się jako złoża niewolumetryczne, w których nieznana jest wielkość zasobów gazu oraz ilość dopływającej wody. Dopływ wody jest wywołany zmianą ciśnienia złożowego i jednocześnie wpływa na jego zmianę.

W inżynierii złożowej najbardziej znanymi i powszechnymi metodami pozwalającymi analizować i prognozować zachowanie się złóż gazu w trakcie eksploatacji są dwie metody bilansu masowego:

- 1) metoda „p/z”,
- 2) metoda Havlena–Odeha.

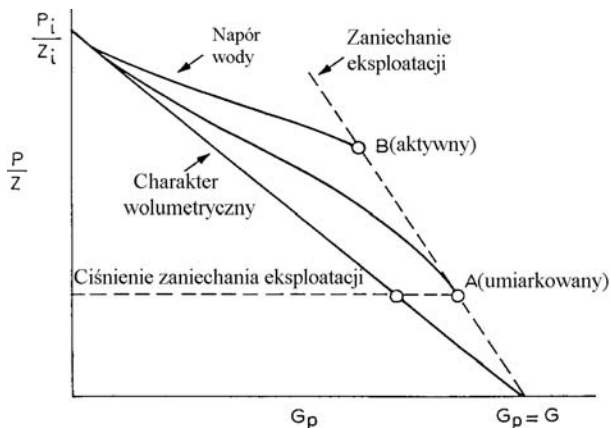
Metoda bilansu masowego „p/z”

W przypadku złoża wolumetrycznego zależność ciśnienia złożowego p w funkcji ilości wydobytego gazu G_p wyraża się zależnością [4]

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (1)$$

zaś w przypadku złoża niewolumetrycznego zależnością [3]

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \frac{\left(1 - \frac{G_p}{G} \right)}{1 - \frac{(W_e - W_p) B_w}{G \cdot B_{gi}}} \quad (2)$$



Rys. 1. Wykres diagnostyczny oceny mechanizmu pracy złoża – metoda „p/z” [3]

Równanie (1) jest zależnością liniową (charakter wolumetryczny), zaś zależność (2) jest równaniem nieliniowym (napór wody), co pokazano na rysunku 1.

Metoda Havlena–Odeha

Metoda Havlena–Odeha oparta jest równaniu bilansu masowego zapisanego w postaci [1]

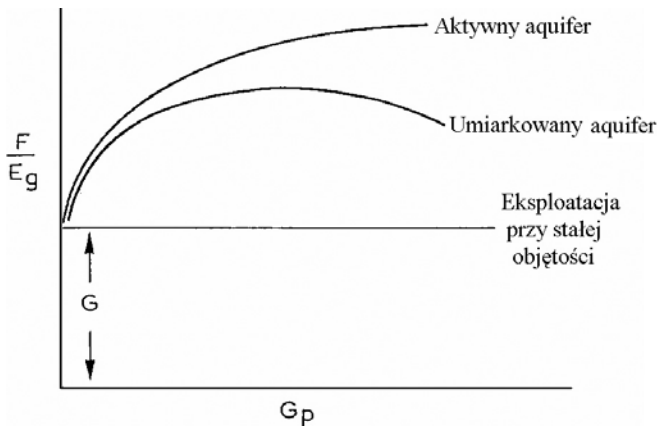
$$\frac{F}{E_g} = G + \frac{W_e B_w}{E_g} \quad (3)$$

gdzie:

$$F = G_p B_g + W_p B_w \quad (4)$$

$$E_g = B_g + B_{gi} \quad (5)$$

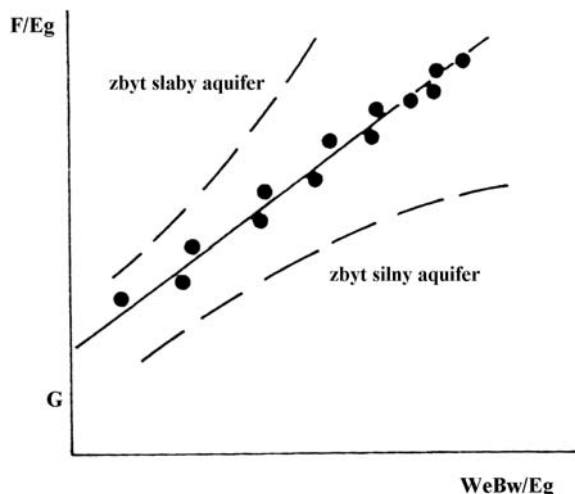
Wykreślenie zależności F/E_g vs. G_p umożliwia ocenę skali aktywności strefy wodonośnej (aquifer) i jej oddziaływania na strefę gazonośną, co pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres diagnostyczny oceny – mechanizmu pracy złoża – metoda Havlena–Odeha [1]

Technika interpretacji metodą „p/z” wydaje się prosta, ale główne niebezpieczeństwo leży w rozstrzygnięciu o liniowym lub nieliniowym charakterze zależności ilorazu p/z vs. G_p , co może prowadzić do błędnej interpretacji złoża jako wolumetryczne i związanego z tym błędem przeszacowania początkowych zasobów gazu w złożu. Z doświadczeń przemysłowych wynika, że mniejszy błąd popełnia się stosując metodę Havlena–Odeha ze względu na jej większą czułość na zmiany wywołane dopływem wody.

Metoda Havlena–Odeha pozwala także na właściwe oszacowanie ilości dopływającej wody zgodnie z równaniem (3). Jak wynika z równania (3), właściwie dopasowanie aktywności strefy wodonośnej znamionuje się zależnością liniową o nachyleniu 1, zaś rzędna początkowa określa wielkość zasobów początkowych, co pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres poprawnego dopasowania aktywności strefy wodonośnej (metoda Havlena–Odeha) [3]

3. METODY OBLICZANIA DOPŁYWU WODY

Dopływ wody do złoża spowodowany jest kompaktacją skały i rozprężaniem się wody w strefie wodonośnej spowodowanej spadkiem ciśnienia w strefie zajętej przez gaz. Ilość dopływającej do złoża wody zależy od wzajemnego stosunku strefy zajętej przez gaz i strefy wodonośnej, własności petrofizycznych skał (głównie przepuszczalności), tempa szczyrpywania zasobów gazu i czasu trwania eksploatacji.

W inżynierii złożowej najbardziej znanymi i stosowanymi metodami pozwalającymi wyznaczyć wielkość dopływu wody do złoża są metody:

- van Everdingena–Hursta,
- Fetkovicha.

Metoda van Everdingena–Hursta

Metoda van Everdingena–Hursta obliczania dopływu wody do złoża ze strefy wodonośnej opiera się na równaniu dopływu płynu do odwiertu przy założeniu stałego spadku ciśnienia.

Równanie to ma postać [1]

$$W_e = 2\pi \cdot \phi \cdot h \cdot c_t \cdot r_o^2 \cdot f \cdot \Delta p \cdot W_D(t_D) \quad (6)$$

gdzie:

- f – współczynnik niepełnej geometrii radialnej,
- $W_D(t_D)$ – bezwymiarowa funkcja dopływu wody.

Wartości bezwymiarowej funkcji dopływu wody $W_D(t_D)$ można odczytać z odpowiednich tabel lub wykresów [2]. Zastosowanie równania (6) dla zmieniającego się ciśnienia złożowego wymaga stosowania zasady superpozycji.

Metoda Fetkovicha

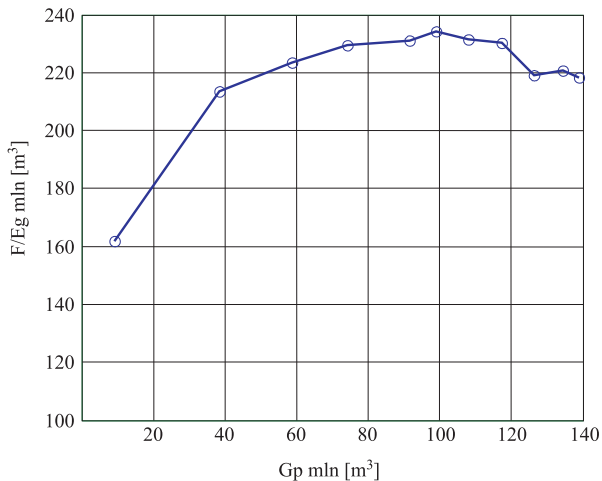
Metoda Fetkovicha jest metodą inżynierską, opierającą się na równaniu dopływu płynu słabo ściśliwego ze strefy o ograniczonym zasięgu. Końcowa zależność na skumulowany wydatek dopływu wody do złoża ma postać [2]

$$W_e = \frac{W_{ei}}{p_i} (p_i - p) (1 - e^{-J p_i t / W_{ei}}) \quad (7)$$

4. ANALIZA PRZEBIEGU EKSPLOATACJI WYBRANEGO HORYZONTU ZŁOŻA GAZU ZIEMNEGO

Na podstawie przedstawionej wcześniej metody diagnozowania warunków energetycznych złóż gazu oraz metody określania ilości dopływającej wody, autorzy wykonali obliczenia dla przykładowego złoża gazu pracującego w warunkach ruchomej wody złożowej. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu autorskiego programu komputerowego.

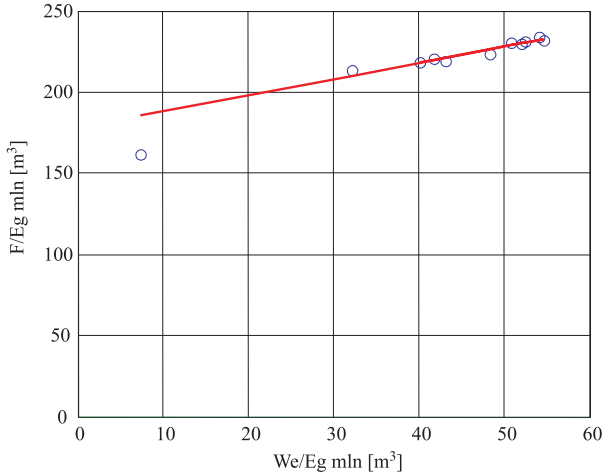
Na rysunku 4 pokazano wykres diagnostyczny mechanizmu pracy wybranego złoża metodą Havlena–Odeha. Jak widać z rysunku 4, analizowane złożo pracuje w warunkach aktywnej wody złożowej. Z kształtu krzywej należy wnioskować o umiarkowanym oddziaływaniu strefy wodonośnej na złożo.



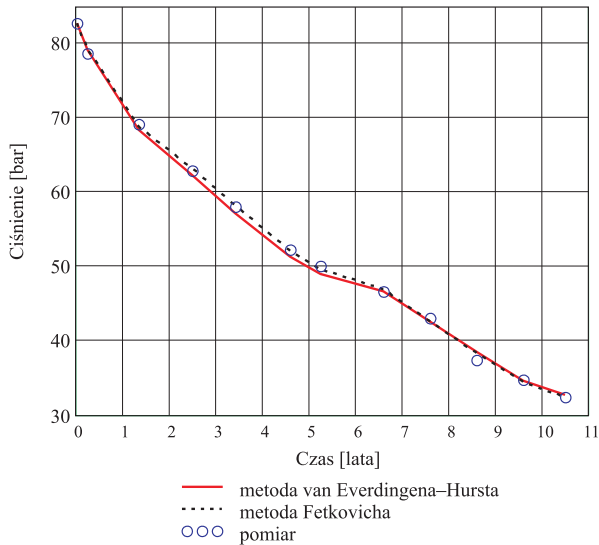
Rys. 4. Wykres diagnostyczny oceny mechanizmu pracy analizowanego złoża

Na podstawie równania bilansu masowego (2) oraz metod van Everdingena–Hursta i Fetkovicha obliczenia ilości dopływającej wody do złoża dokonano doboru właściwych

parametrów charakteryzujących strefę wodonośną, uzyskując zależność liniową w układzie F/E_g vs W_e/E_g (rys. 5) oraz odtworzono przebieg zmian ciśnienia złożowego w stosunku do wartości mierzonych w czasie eksploatacji (rys. 6).



Rys. 5. Wykres poprawnego dopasowania modelu strefy wodonośnej analizowanego złoża



Rys. 6. Dopasowanie obliczanych ciśnień złożowych z wartościami mierzonymi dla analizowanego złoża

Z analizy rysunku 5 wynika wielkość początkowych zasobów gazu ziemnego, która dla analizowanego złoża wynosi ok. $180 \text{ mln } m_n^3$.

5. POSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Większość eksploatowanych odwiertów na złożach gazu ziemnego i magazynach gazu jest w większym lub mniejszym stopniu zagrożona możliwością przebicia się w ich kierunku wody złożowej ze strefy wodonośnej. Zjawisku temu sprzyja między innymi:

- aktywność strefy wodonośnej,
- tempo eksploatacji gazu,
- czas eksploatacji.

Aktywność strefy wodonośnej zależy od wielkości tej strefy, jak też parametrów petrofizycznych skały złożowej. W celu wykonania wiarygodnych prognoz eksploatacji złoża lub podziemnego magazynu gazu koniecznym jest posiadanie poprawnie skalibrowanych modeli obliczania ilości dopływającej wody do strefy gazonośnej oraz obliczania ciśnień złożowych.

Z wyników obliczeń wykonanych przez autorów dla przykładowego złoża w oparciu modele bilansu masowego wynika, że możliwym jest uzyskanie poprawnego odtworzenia przebiegu eksploatacji złoża. Zdaniem autorów poprawnie skalibrowany model bilansowy może z powodzeniem stanowić alternatywę lub uzupełnienie dla bardziej zaawansowanych metod symulacji komputerowej.

SPIS OZNACZEŃ

- G_p – ilość wydobytego gazu [m_n^3]
 G – początkowe zasoby gazu w złożu [m_n^3]
 p_i – początkowe ciśnienie złożowe [Pa]
 p – bieżące ciśnienie złożowe [Pa]
 W_e – ilość wody dopływającej do złoża [m^3]
 W_p – ilość wody wydobytej ze złoża [m^3]
 B_w – współczynnik objętościowy wody [–]
 B_g, B_{gi} – współczynniki objętościowe gazu przy ciśnieniu bieżącym i początkowym [–]
 f – współczynnik porowatości [–]
 h – miąższość złoża [m]
 r_o – średni promień złoża [m]
 c_t – całkowity współczynnik ściśliwości [1/Pa]
 W_{ei} – maksymalna ilość wody jaka może dopłynąć do złoża ze strefy wodonośnej [m^3]
 J – indeks wydajności strefy wodonośnej [$m^3/Pa \cdot s$]

LITERATURA

- [1] Ahmed T.: *Reservoir Engineering Handbook*. Gulf Professional Publishing 2001
- [2] Dake L.P.: *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Elsevier Science Publishers 1978
- [3] Dake L.P.: *The Practice of Reservoir Engineering*. Elsevier 1994
- [4] Hagoort J.: *Fundamentals of Gas Reservoir Engineering*. Amsterdam, Elsevier 1988
- [5] *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering, Vol. 1*. Gulf Publishing Company 1996