

Joanna Lewandowska

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Analiza niepewności określania zasobów złóż węglowodorów, na przykładzie złoża gazowo-kondensatowego

Wprowadzenie

Prawidłowe określenie zasobów złóż ropy i gazu jest podstawowym zagadnieniem dla optymalizacji planów rozwoju eksploatacji złóż węglowodorów. Niepewności związane z danymi geologiczno-geofizycznymi wykorzystywanymi w obliczeniach przyczyniają się do niepewności w opisie złoża, a co za tym idzie – do niepewności w określeniu jego zasobów. We wczesnej fazie rozpoznania złoża, gdy wywierconych jest tylko kilka otworów, zwykle dysponuje się bardzo małą ilością informacji dotyczących jego właściwości [5].

Najważniejszym problemem jest zagadnienie wiarygodności modelu geologiczno-złożowego; wpływającym zarówno na ocenę zasobów, jak i na sposób prowadzenia eksploatacji. Taka ocena – niejednoznaczna – wykonywana jest zwykle w procesie iteracyjnym z wykorzystaniem symulatorów złożowych, w trakcie eksploatacji złoża. Wraz z eksploatacją złoża stopień niepewności maleje, zazwyczaj osiągając minimum w momencie zaniechania produkcji węglowodorów. W przypadku wielu złóż, przed rozpoczęciem eksploatacji mamy do czynienia zarówno z niepewnością poszczególnych parametrów geologiczno-geofizycznych (brak sejsmiki), jak i z niepewnością kształtu struktury złoża (brak zdjęcia 3D). W związku z tym część parametrów wykorzystywanych przy two-

rzeniu modelu cyfrowego oraz do symulacji wydobycia musi zostać oszacowana. Uzyskane wyniki są więc wartościami szacunkowymi, przybliżonymi i w czasie dalszego rozpoznania złoża i jego eksploatacji mogą ulec zmianie.

Oszacowanie zasobów złoża stanowi jeden z najważniejszych etapów w planowaniu wydobycia. Istnieje kilka metod służących do oszacowania zasobów [4, 6]; wybór jednej z nich zależy od charakteru złoża, jakości i rodzaju danych jego dotyczących oraz wielkości nakładów, jakie mogą być przeznaczone na budowę modelu złoża. Jeśli możemy określić – chociaż w przybliżeniu – parametry geometryczne i geofizyczne struktury tworzącej złożo to najdokładniejszym sposobem aproksymacji zasobów w nim jest metoda objętościowa, którą wykorzystano w niniejszym artykule.

Metoda objętościowa polega na obliczeniu objętości skał zbiornikowych nasyconych węglowodorami. Może ona być stosowana przez cały okres eksploatacji złoża. Źródłem danych są krzywe geofizyki wiertniczej, pozwalające na wyznaczenie rozkładów nasyceń, miąższości efektywnej i porowatości lub przepuszczalności – w całym złożu, bądź w poszczególnych otworach. Umożliwia to potraktowanie tych parametrów jako zmiennych losowych i przeprowadzenie symulacji metodą Monte Carlo [4, 6].

Metoda Monte Carlo

Metoda ta została opracowana w ostatnich latach II wojny światowej w Stanach Zjednoczonych przez dwóch matematyków – J. von Neumanna i S. Ulama – podczas

prac nad skonstruowaniem bomby atomowej. Jest to sposób rozwiązywania zagadnień matematycznych drogą tzw. modelowania statystycznego, polegający na dobieraniu

do rozwiązywanego problemu takiego procesu losowego, którego parametry statystyczne (liczby charakteryzujące ogólne własności rozkładu prawdopodobieństwa) przybliżyłyby poszukiwane wartości rozwiązań.

W uproszczeniu, ideą tej metody jest przeprowadzenie dużej ilości prób, podczas których losuje się dane wejściowe i oblicza badaną wielkość. Każda informacja z danych wejściowych jest zmienną losową, posiadającą zdefiniowany rozkład. Po wylosowaniu wszystkich zmiennych oblicza się wartość szukaną, a następnie cały proces jest powtarzany. Po przeprowadzeniu dużej ilości prób otrzymuje się zestaw wartości badanej cechy, który można przedstawić w postaci histogramu, dopasować do odpowiedniego rozkładu oraz otrzymać dystrybuantę, wartość oczekiwaną i inne statystyki [4, 6].

Metoda Monte Carlo często stosowana jest do obliczania rozkładu zasobów złóż węglowodorów. Niepewności szacowane są dla każdego z parametrów wejściowych (powierzchni lub objętości złoża, porowatości, nasycenia itd.).

Wyniki takiego badania wykorzystywane są jako dane wejściowe do symulacji Monte Carlo, w której wszystkie parametry odznaczające się niepewnością opisane są przez odpowiednie rozkłady [3].

Analiza Monte Carlo wykonywana jest głównie w celu oceny zakresu możliwych wartości dla zasobów gazu lub kondensatu w złożu. Zazwyczaj niepewność parametrów wejściowych przedstawiana jest za pomocą rozkładu trójkątnego oraz istnieje pewien stopień korelacji pomiędzy poszczególnymi zmiennymi (np. porowatością a nasyceniem) [3].

Obliczanie zasobów przykładowego złoża gazowo-kondensatowego zostało przeprowadzone metodą Monte Carlo. Generowano wartości zmiennych i obliczano zasoby przy wykorzystaniu metody objętościowej. Operacja ta była powtarzana założoną ilość razy (w tym wypadku 10 000), co pozwoliło na wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa i dystrybuanty zasobów. Dane wykorzystane w symulacji zostały dopasowywane do odpowiedniego rozkładu za pomocą testów zgodności.

Szacowanie zasobów złoża gazu

Do oszacowania zasobów złoża gazu wykorzystano zależność:

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot h_i \cdot \phi_i \cdot (1 - S_{wi})}{B_i}$$

gdzie:

Z – zasoby,

n – liczba warstw,

A_i – i -ta powierzchnia,

h_i – miąższość efektywna dla i -tej warstwy złoża,

Φ_i – współczynnik porowatości dla i -tej warstwy złoża,

S_{wi} – współczynnik nasycenia wodą dla i -tej warstwy złoża,

B_i – współczynnik objętościowy gazu.

Powyższe parametry (oprócz n) traktowane są jako zmienne losowe.

Symulacja zasobów złoża przy wykorzystaniu rozkładów parametrów dla poszczególnych warstw

Zasoby złoża zostały oszacowane symulacyjnie, metodą Monte Carlo. Parametry, które zostały wprowadzone jako dane wejściowe do symulacji pochodziły z interpretacji dostępnych informacji i materiałów geologiczno-geofizycznych. Wartości współczynników porowatości, miąższości i nasycenia wodą w każdej z warstw zostały dopasowane do odpowiednich rozkładów zmiennej losowej za pomocą testu zgodności χ^2 . Wszystkie wymienione parametry posiadały rozkłady trójkątne.

Dla celów obliczeniowych, powierzchnia złoża została podzielona i przypisana do poszczególnych warstw. Przyjęto dla niej rozkład trójkątny, o średniej odpowiedniej dla danej warstwy i odchyleniach standardowych równych 2% średniej. Współczynnik objętościowy również charakteryzował się rozkładem trójkątnym.

Dla tak opisanego złoża obliczono zasoby poszczegól-

nych warstw, a następnie je zsumowano. Uzyskane wyniki wykorzystano do określenia zgodności metody objętościowej z wynikami kompozycyjnej symulacji numerycznej, wykonanej za pomocą symulatora Eclipse.

Istotnych informacji odnośnie wiarygodności uzyskanych wyników dostarcza dystrybuanta F_z (funkcja zmiennej z , która odpowiada prawdopodobieństwu przyjęcia przez zmienną losową Z wartości mniejszej lub równej z , tzn. $P\{Z \leq z\} = F_z(z)$ prawdopodobieństwa zasobów), ponieważ z jej pomocą można określić [6]:

- zasoby pewne (z_p) – jako kwantyl rzędu 0,1; z warunku $P\{Z \leq z_p\} = F_{z_p}(z) = 0,1$;
- zasoby najbardziej prawdopodobne (z_0) – jako medianę; z warunku $P\{Z \leq z_0\} = F_{z_0}(z) = 0,5$;
- zasoby możliwe (z_M) – jako kwantyl rzędu 0,9; z warunku $P\{Z \leq z_M\} = F_{z_M}(z) = 0,9$.

Zasoby określone na poziomie 90% definiowane są jako zasoby pewne – to te, dla których istnieje tylko 10% szans, że zasoby rzeczywiste są mniejsze od wielkości zasobów określonych jako „pewne” oraz 90% szans, że zasoby rzeczywiste są większe od zasobów „pewnych”. Inaczej mówiąc, prawdopodobieństwo wystąpienia zasobów „pewnych” węglowodorów jest większe niż 85÷95% [1, 2].

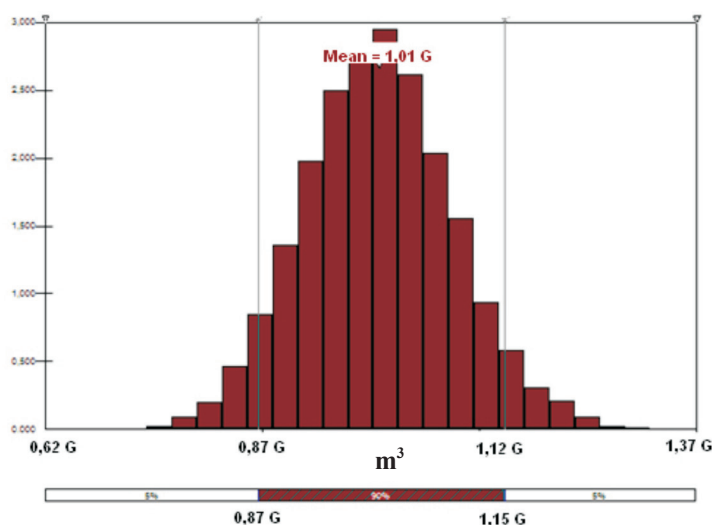
Zasoby określone na poziomie 50% są zasobami „najbardziej prawdopodobnymi”, czyli prawdopodobieństwo uzyskania rzeczywistej wielkości zasobów większych lub mniejszych od zasobów określonych na poziomie 50% jest takie samo. Inaczej mówiąc, zasoby „najbardziej prawdopodobne” (do których należy dodać zasoby „pewne”), to takie, których całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia jest większe niż 50% [1, 2].

Dla zasobów „możliwych do uzyskania” prawdopodobieństwo wystąpienia większych zasobów rzeczywistych wynosi tylko 10%, a mniejszych – aż 90%. Inaczej mówiąc, zasoby „możliwe” (do których należy dodać zasoby „pewne” i „najbardziej prawdopodobne”) to takie, których całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia jest większe niż 5÷15% [1, 2].

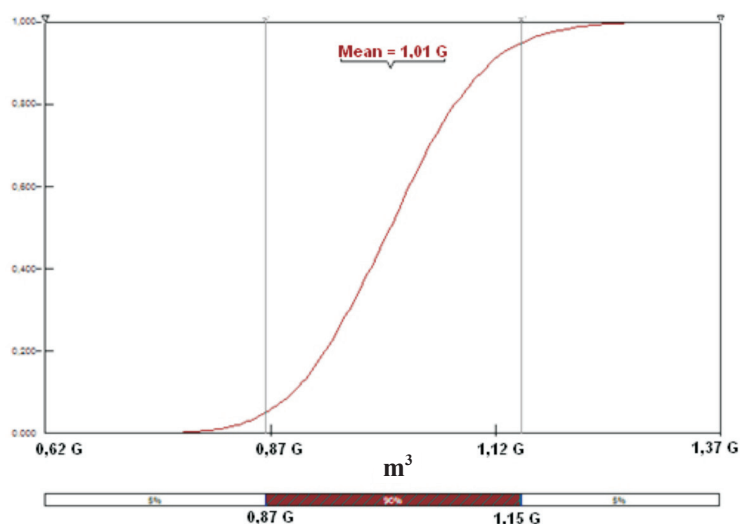
W wyniku symulacji numerycznej wykonanej w programie Eclipse dla trójwymiarowego, kompozycyjnego modelu złoża uzyskano wielkości zasobów geologicznych gazu ziemnego i kondensatu, które w dalszej części artykułu będą oznaczone odpowiednio symbolami G i N . Ze względu na brak historii eksploatacji złoża, uzyskany rezultat nie mógł być zweryfikowany – dlatego też kolejnym etapem obliczeń była symulacja metodą Monte Carlo.

W wyniku symulacji otrzymano histogram zasobów gazu w złożu, przedstawiony na rysunku 1. Kształt tego histogramu wskazuje, że szacowane zasoby posiadają rozkład normalny. Wartość oczekiwana to $1,01 \cdot G \text{ m}^3$, a wielkość zasobów złoża z prawdopodobieństwem 90% mieści się w granicach $0,87 \div 1,15 \cdot G \text{ m}^3$ gazu, gdzie G to zasoby gazu ziemnego uzyskane za pomocą kompozycyjnej symulacji numerycznej. Otrzymałą dystrybucję przedstawiono na rysunku 2.

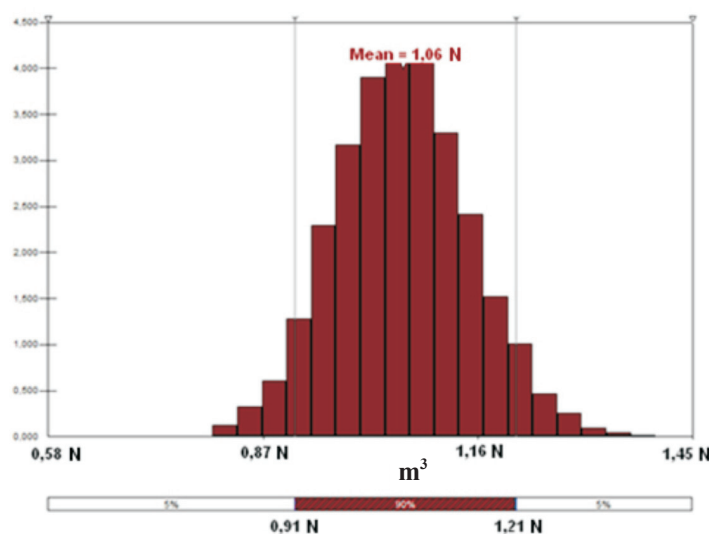
W tym przypadku zasoby „pewne” gazu są równe $0,90 \cdot G \text{ m}^3$, zasoby „najbardziej prawdopodobne” $1,01 \cdot G \text{ m}^3$, a „możliwe” – $1,12 \cdot G \text{ m}^3$.



Rys. 1. Histogram zasobów gazu rozpatrywanego złoża

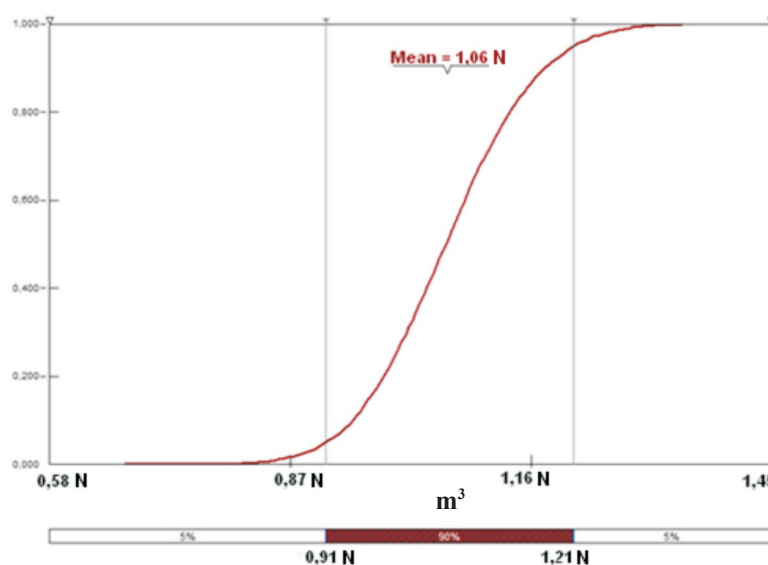


Rys. 2. Dystrybuanta wielkości zasobów gazu



Rys. 3. Histogram zasobów kondensatu rozpatrywanego złoża

W wyniku symulacji Monte Carlo otrzymano również histogram zasobów kondensatu w złożu, który przedsta-



Rys. 4. Dystrybuanta wielkości zasobów ropy

wiono na rysunku 3. Kształt tego histogramu wskazuje, że szacowane zasoby posiadają rozkład logarytmiczno-normalny. Wartość oczekiwana wynosi $1,06 \cdot N \text{ m}^3$, a wielkość zasobów złoża z prawdopodobieństwem 90% mieści się w granicach $0,91 \div 1,21 \cdot N \text{ m}^3$, gdzie N to zasoby kondensatu uzyskane za pomocą kompozycyjnej symulacji numerycznej, przeprowadzonej w programie Eclipse. Otrzymaną dystrybuantę przedstawiono na rysunku 4.

W tym przypadku zasoby „pewne” kondensatu są równe $0,94 \cdot N \text{ m}^3$, zasoby „najbardziej prawdopodobne” $1,06 \cdot N \text{ m}^3$, a „możliwe” – $1,18 \cdot N \text{ m}^3$.

W tabelicy 1 przedstawiono zestawienie wszystkich uzyskanych wyników.

Tablica 1. Wielkość zasobów ze wszystkich przeprowadzonych symulacji

| Rodzaj zasobów | | Zasoby uzyskane za pomocą symulacji Monte Carlo [m ³] | Zasoby uzyskane za pomocą symulacji kompozycyjnej [m ³] |
|----------------|---------------------------|---|---|
| Gaz ziemny | pewne | $0,90 \cdot G$ | $1 \cdot G$ |
| | najbardziej prawdopodobne | $1,01 \cdot G$ | |
| | możliwe | $1,12 \cdot G$ | |
| Kondensat | pewne | $0,94 \cdot N$ | $1 \cdot N$ |
| | najbardziej prawdopodobne | $1,06 \cdot N$ | |
| | możliwe | $1,18 \cdot N$ | |

Podsumowanie

Komputerowa symulacja metodą Monte Carlo jest bardzo wydajnym narzędziem służącym do obliczania zasobów złóż metodą objętościową, przy wykorzystaniu dostępnych danych geologiczno-geofizycznych. Dużą zaletą metody Monte Carlo jest uzyskiwanie wyniku w postaci pewnego przedziału wartości, w którym z określonym prawdopodobieństwem możemy oczekiwać wystąpienia zasobów. Uświadamia to stopień ryzyka ponoszonego podczas podejmowania decyzji związanych z inwestycjami dotyczącymi zagospodarowania i eksploatacji złoża.

W przedstawionej pracy zaprezentowano model stworzony na podstawie danych obarczonych znaczną niepewnością, wynikającą z wczesnej fazy udostępniania złoża. Przy porównaniu wyników symulacji Monte Carlo z symulacją kompozycyjną wykonaną w programie Eclipse można zauważyć, że wartość zasobów uzyskanych

w oparciu o model kompozycyjny całkowicie mieści się między zasobami „pewnymi” a „najbardziej prawdopodobnymi”. Wyniki tej symulacji są bardzo dokładne: 90% przewidywanych zasobów gazu mieści się w przedziale $0,87 \div 1,15 \cdot G \text{ m}^3$, a w przypadku kondensatu – w przedziale $0,91 \div 1,21 \cdot N \text{ m}^3$. Za bardziej wiarygodny należy uznać sposób szacowania zasobów z podziałem złoża na części, np. na warstwy, wykorzystujący pełną dostępną informację geologiczno-geofizyczną.

Otrzymano bardzo dobrą korelację pomiędzy ilością zasobów pochodzącą z symulacji zrealizowanej symulatorem złożowym Eclipse oraz symulacją wykonaną za pomocą metody Monte Carlo. W związku z tym można stwierdzić, że prawdopodobieństwo uzyskania zasobów geologicznych określonych symulatorem złożowym jest bardzo duże, rzędu 85÷95%.

Artykuł nadesłano do Redakcji 28.03.2011 r. Przyjęto do druku 28.04.2011 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Chun-Pin Ch., Zsay-Shing L.: *Stochastic analysis of production decline data for production prediction and reserves estimation*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 23, p. 149–160, 1999.
- [2] Garb F.A.: *Oil and gas reserves classification, estimation, and evaluation*. SPE 13946, Journal of Petroleum Technology, March 1985.
- [3] Govan A.H.: *An integrated uncertainty analysis for the development of an offshore gas condensate field*. SPE 49506, Journal of Petroleum Technology, 1998.
- [4] Jucha S., Rybicki Cz., Siemek J., Stopa J.: *Metoda probabilistyczna Monte Carlo w symulacji rozkładu zasobów węglowodorów*. Górnictwo, Zeszyt 4, 1998.
- [5] Meisingset K.K.: *Uncertainties in Reservoir Fluid Description for Reservoir Modeling*. SPE Reservoir Eval. & Eng., 2 (5), October 1999.
- [6] Stopa J., Rychlicki S., Kosowski P.: *Obliczanie zasobów złóż gazu ziemnego metodą Monte Carlo z wykorzystaniem krzywych geofizyki wiertniczej*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, 20/1, s. 177–188, 2003.
- [7] Rubinstein R.Y.: *Simulation and the Monte Carlo Method*. J. Wiley & Sons Inc., New York, 1981.
- [8] Wit R.: *Metody Monte Carlo – wykłady*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2004.
- [9] Zieliński R.: *Metody Monte Carlo*. WNT, 1970.



Mgr inż. Joanna LEWANDOWSKA – asystentka na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Absolwentka Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, specjalność geoinformatyka oraz Wydziału Matematyki Stosowanej AGH. Zajmuje się komputerowym modelowaniem złóż węglowodorów oraz analizą niepewności określania parametrów występujących w modelu geologicznym.

ZAKŁAD ANALIZ NAFTOWYCH

- kompleksowa analiza rop naftowych;
- badanie składu chemicznego i ocena jakości produktów naftowych, biokomponentów, biopaliw oraz paliw alternatywnych;
- ocena potencjalnej kancerogenności produktów naftowych, w tym test DAB-10;
- oznaczanie metali ciężkich w produktach naftowych – świeżych i zużytych oraz w odpadach;
- identyfikacja substancji pochodzących z degradacji produktów naftowych;
- usługi monitorowania jakości paliw ciekłych, biopaliw i LPG oraz stopnia zużycia olejów silnikowych w pojazdach;
- opracowywanie nowych metod analitycznych dla produktów naftowych i pokrewnych: świeżych, w eksploatacji oraz zużytych;
- identyfikacja i oznaczanie toksycznych związków emitowanych z silników wysokoprężnych (WWA w cząstkach stałych PM);
- usługi eksperckie i rzeczoznawcze w zakresie: orzecznictwa o jakości paliw silnikowych, analityki produktów naftowych oraz problemów związanych z eksploatacją produktów naftowych i produktów pokrewnych;
- badania oraz doradztwo w zakresie klasyfikacji surowców i produktów naftowych, w odniesieniu do Nomenklatury Scalonej (CN);
- opracowanie Kart Charakterystyki substancji dla branży naftowej i branż pokrewnych.

Kierownik: dr inż. Beata Altkorn

Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków

Telefon: 12 617-76-00

Faks: 12 617-76-80, 12 617-75-22

E-mail: beata.altkorn@inig.pl

