

**Jerzy Stopa*, Stanisław Rychlicki*,
Paweł Wojnarowski*, Piotr Kosowski***

ZASTOSOWANIE ODWIERTÓW ROZGAŁĘZIONYCH W EKSPLOATACJI ZŁOŻ ROPY I GAZU**

1. WSTĘP

Technologia odwiertów multilateralnych znana od lat 50. XX wieku, szczególnie szybko zaczęła rozwijać się w latach 90. Głównym celem zastosowania tej technologii jest dążenie do zwiększenia wydobywania ropy naftowej lub gazu ziemnego. Pozwala ona na szersze udostępnienie złoża, zaczerpywanie z cienkich warstw złożowych czy warstw szczelinowatych wykorzystując do tego istniejące już otwory bez konieczności wiercenia otworów dodatkowych.

Systemy multilateralne w porównaniu z konwencjonalnymi otworami oferują szereg możliwości optymalizacji wyników ekonomicznych. Niektóre z tych korzyści są łatwe do zdefiniowania, są też takie, których identyfikacja i pomiar jest trudniejsza. Najczęściej potencjalne zyski z zastosowania otworów multilateralnych można podzielić na dwie kategorie. Pierwsza to możliwość zwiększenia wydobywania i/lub przyśpieszenia produkcji dla poszczególnych otworów. Druga to możliwość zmniejszenia kosztów ponoszonych w trakcie realizacji projektu wydobywczego.

Wśród ekonomicznych zalet systemów multilateralnych wymienić można m.in. [2]:

– **Redukcję kosztów.**

Technologia otworów multilateralnych znacznie zmniejsza nakłady inwestycyjne, ponieważ duża część kosztów udostępnienia złoża zostaje poniesiona podczas wiercenia głównego otworu. Przykładowo otwór dwudenny może zwiększyć produkcję o 100%, przy wzroście kosztów o 50%.

– **Zwiększone zasoby.**

Otwory multilateralne mogą pozwolić na znaczne zwiększenie zasobów wydobywalnych w złożu, poprzez uzyskanie dostępu do odizolowanych jego części. Dzięki tej technologii

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w Zakładzie Inżynierii Naftowej WWiNiG AGH w ramach grantu nr N 524 021 32/2564

opłacalna może być również eksploatacja mniejszych złóż, która przy zastosowaniu innej technologii wydobycia nie byłaby efektywna ekonomicznie.

– **Przyspieszoną produkcję.**

Ten czynnik jest szczególnie ważny w przypadku wysokich cen ropy lub wysokich kosztów operacyjnych. Odpowiedni rozkład odgałęzień umożliwia zwiększony drenaż złoża i przyspieszenie produkcji.

– **Zastosowanie do złóż ropy ciężkich.**

SAGD (*Steam assisted gravity drainage*) to multilateralna technologia eksploatacji złóż ciężkiej ropy, polegająca na odwierceniu dwóch horyzontalnych odgałęzień. Górne odgałęzienie służy do wtłaczania pary wodnej a dolne do produkcji ropy naftowej.

Możliwość zwiększenia wydobycia to bardzo istotna korzyść. Podczas rozważania projektu zastosowania otworów multilateralnych jest to zazwyczaj pierwszy rozpatrywany czynnik i jego znaczenie jest z reguły najważniejsze. Rozpoznanie tego typu korzyści dla otworów multilateralnych jest często utrudnione ze względu na wysoką zależność od właściwości złoża i umiejętności inżynierów odnośnie właściwej interpretacji danych i prawidłowego modelowania złoża. Często pełna ocena możliwa jest dopiero po odwierceniu otworu multilateralnego i prowadzeniu produkcji przez jakiś czas. Ten brak pewności to główna przeszkoda podczas procesu planowania tego typu projektów [3].

Określenie oszczędności dla systemów multilateralnych jest znacznie łatwiejsze i może być przeprowadzone podczas procesu planowania otworów. Pomimo tego, iż właściwości złoża i ewentualne zwiększenie rezerw i produkcji są głównym czynnikiem decydującym o zastosowaniu otworów multilateralnych, wymierna redukcja kosztów jest bardzo ważnym czynnikiem przemawiającym na korzyść systemów multilateralnych. Należy jednak podkreślić, iż nie w każdym przypadku zastosowanie otworu multilateralnego przynosi techniczne i ekonomiczne korzyści.

2. MODELOWANIE PRACY ODWIERTU MULTILATERALNEGO

W literaturze występują dwa rodzaje modeli symulacyjnych otworów multilateralnych:

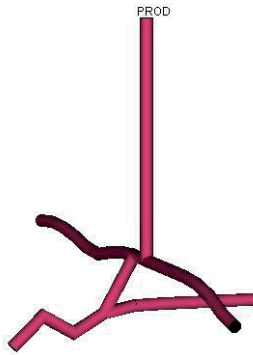
- 1) modele trójwymiarowe, numeryczne, uwzględniające rzeczywistą geometrię złoża;
- 2) uproszczone modele analityczne.

Ze względu na znaczny stopień skomplikowania problemu te ostatnie służą do wstępnych obliczeń przeprowadzanych w celu ustalenia optymalnej geometrii otworu i jego przybliżonej wydajności.

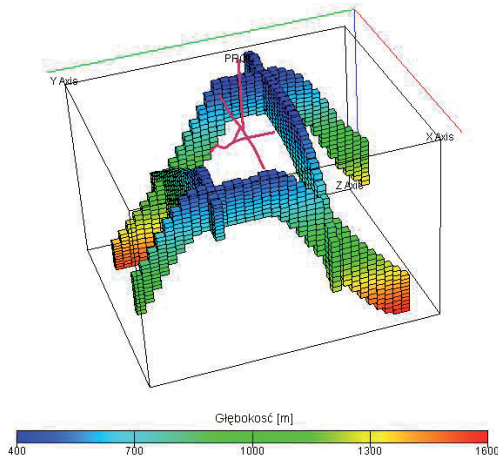
W modelu numerycznym, otwór multilateralny jest reprezentowany przez zbiór segmentów połączonych wzajemnie zgodnie z topologią modelowanego otworu. Dla każdego segmentu definiuje się jego położenie w siatce symulacyjnej oraz połączenia z innymi segmentami. Wyróżniony jest segment główny, od którego odchodzą odgałęzienia (branch). Gałęzie mogą być połączone w wyróżnionych węzłach, zwanych połączeniami (junction), nie mogą jednak tworzyć pętli. Zarówno segment główny jak i gałęzie mogą składać się z wielu segmentów,

które z kolei mogą być połączone z oczkiem siatki symulacyjnej, przez które przechodzą (model perforacji) albo od niego odizolowane (brak perforacji). Każdy z segmentów zawiera wyróżniony punkt, zwany węzłem (node). W trakcie symulacji obliczane są różnice ciśnień między sąsiednimi węzłami, a także między węzłami i oczkami siatki różnicowej, reprezentującymi dynamiczne ciśnienie złożowe. W ten sposób układ węzłów należących do jednej gałęzi tworzy jedno wymiarową siatkę różnicową, co umożliwia obliczanie spadków ciśnień w gałęziach i w całym otworze z uwzględnieniem zarówno strat ciśnienia w segmentach jak i aktualnego ciśnienia złożowego.

W ramach pracy wykonano obliczenia symulacyjne pracy odwiertu multilateralego zarówno w złożu ropy naftowej, jak i gazu ziemnego. W celu określenia wielkości wydobycia takim otworem, obliczenia powtórzone dla odwiertu pionowego. Przyjęty w obliczeniach odwiert posiada cztery odgałęzienia (rys. 1) ułożone w parach na dwóch poziomach w centralnej części złoża (rys. 2).

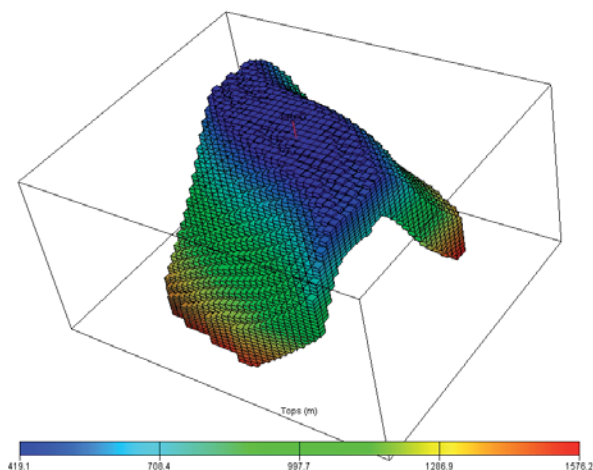


Rys. 1. Wizualizacja kształtu odwiertu

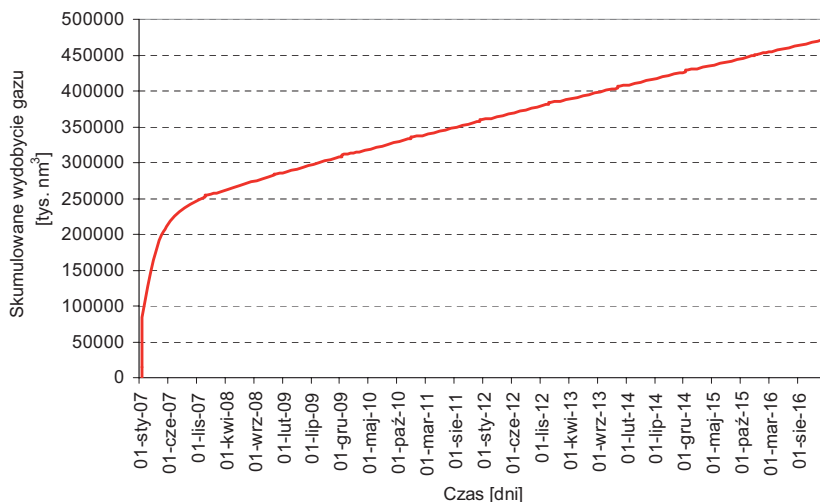


Rys. 2. Przestrzenny kształt odwiertu na tle modelu

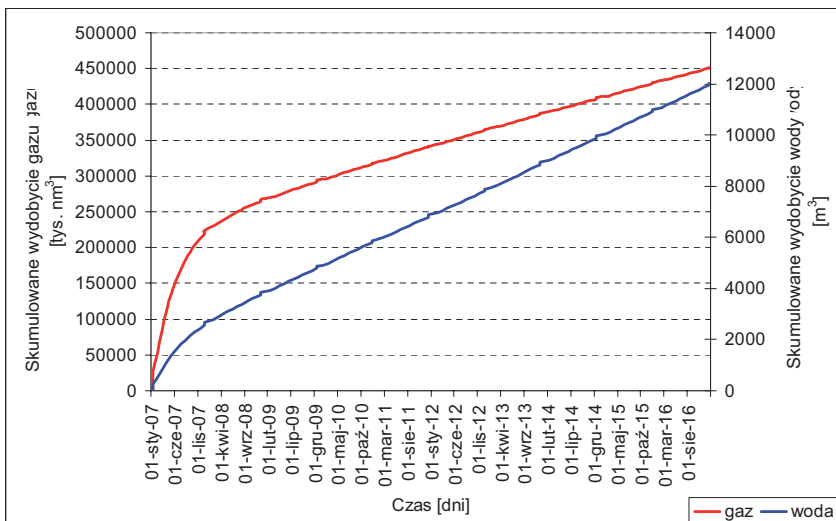
W celu umożliwienia porównania uzyskanych wyników, obliczenia wykonano we wszystkich przypadkach dla takiej samej struktury złożowej, zakładając nasycenie strefy złożowej gazem lub ropą. Przestrzenny kształt struktury przedstawia rysunek 3. Obliczenia przeprowadzono dla okresu 10 lat, zakładając wydobywanie ze stałym ciśnieniem dennym. Uzyskane w ten sposób zmiany wydobywania przedstawiają rysunki 4–7. W przypadku odwiertu multilateralnego, zarówno dla złoża gazu jak i ropy naftowej, nie stwierdzono produkcji wody.



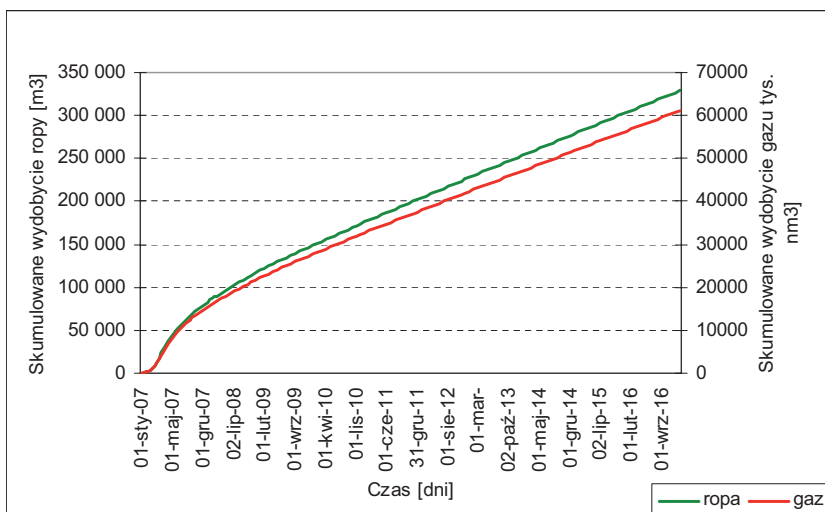
Rys. 3. Model struktury złożowej



Rys. 4. Skumulowane wydobywanie gazu – odwiert multilateralny, złożo gazu

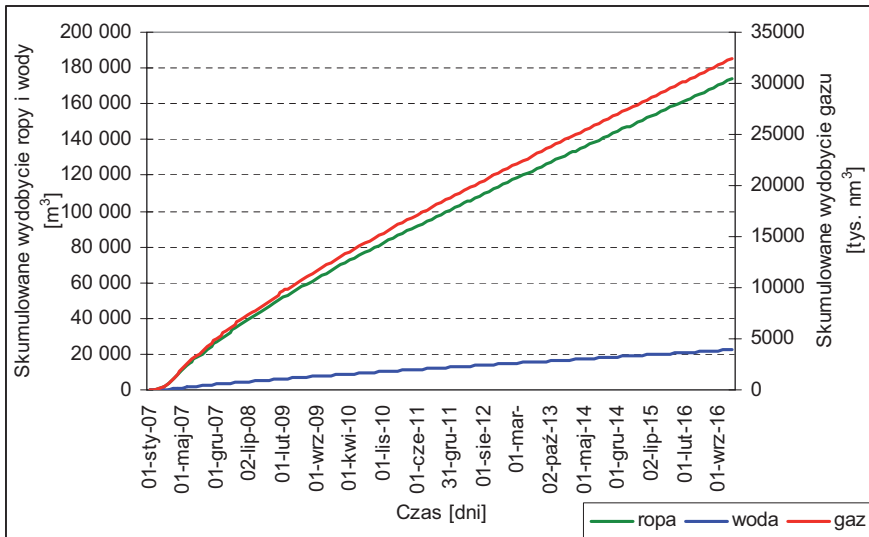


Rys. 5. Skumulowane wydobycie gazu i wody – odwiert pionowy, złożo gazu



Rys. 6. Skumulowane wydobycie ropy i gazu – odwiert multilateralny, złożo ropy

Jak widać z przedstawionych wykresów, zastosowanie odwiertu multilateralnego umożliwia osiągnięcie znacznie większego wydobycia ropy. W przypadku gazu ziemnego różnice te są niewielkie.



Rys. 7. Skumulowane wydobycie ropy, gazu i wody – odwiert pionowy, złożo ropy

Ponadto zastosowanie odwiertu rozgałęzionego wpływa na ograniczenie wydobycia wód złożowych. W przypadku eksploatacji odwiertem pionowym następuje stopniowe podciąganie wody podścielającej do odwiertu i jego zawadnianie.

3. PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI EKONOMICZNEJ OTWORÓW PIONOWYCH I MULTILATERALNYCH

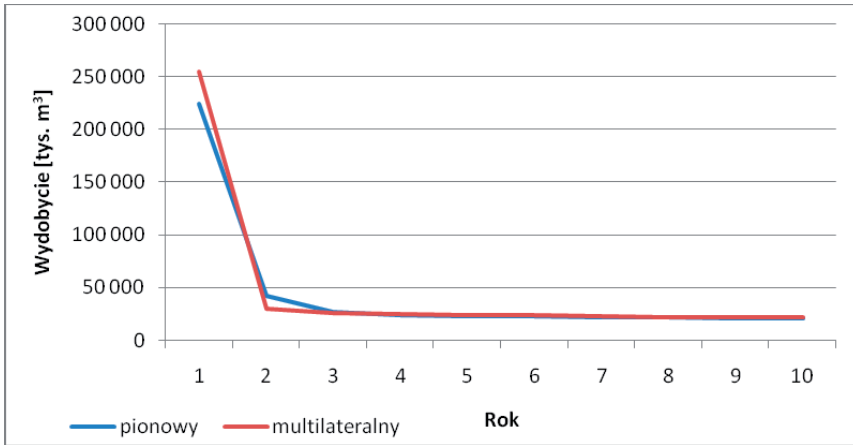
Porównania efektywności ekonomicznej zastosowania otworów pionowych i multilateralnych na złożach gazu ziemnego i ropy naftowej wykonano za pomocą metody zdyskontowanych przepływów pieniężnych (NPV), przy wykorzystaniu wyników komputerowej symulacji eksploatacji złoż.

Wielkość wydobycia w poszczególnych latach przedstawiają:

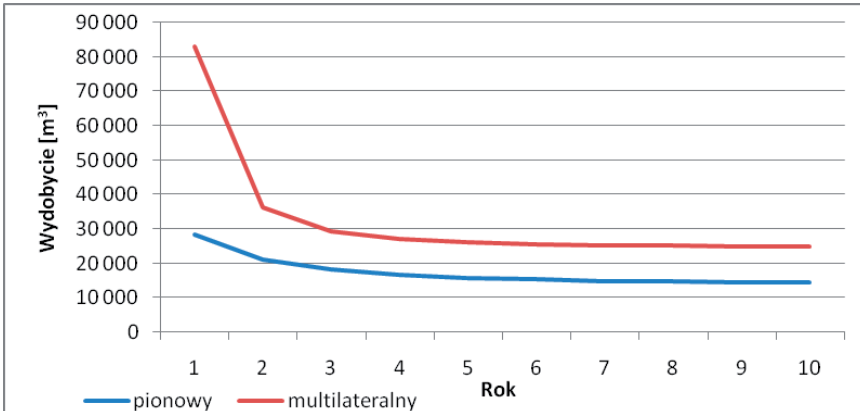
- rysunek 8 – dla złoża gazu,
- rysunek 9 – dla złoża ropy naftowej.

Wyraźnie można zauważyć, iż zastosowanie otworu multilateralnego dla analizowanego złoża gazu ziemnego nie powoduje znaczącego wzrostu wydobycia. Różnica pomiędzy wydobyciem za pomocą otworu multilateralnego a otworem pionowym wynosi po 10 latach tylko 4,7%. Inaczej sytuacja wygląda w przypadku analizowanego złoża ropy naftowej. Zastosowanie otworu multilateralnego powoduje znaczny wzrost wydobycia ropy naftowej – po 10 latach o prawie 88%.

Wyniki symulacji poddano analizie ekonomicznej. Założenia analizy przedstawiają tabele 1 i 2.



Rys. 8. Wydobycie gazu ziemnego w zależności od rodzaju otworu



Rys. 9. Wydobycie ropy naftowej w zależności od rodzaju otworu

Tabela 1

Założenia analizy ekonomicznej dla złoża gazu ziemnego

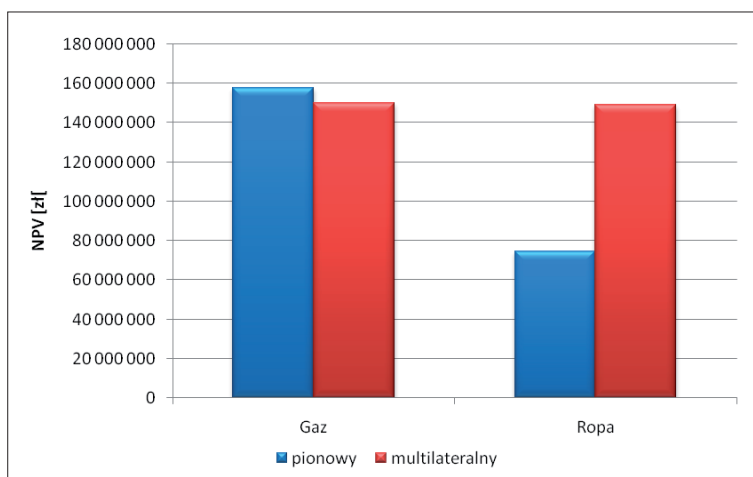
Nakłady inwestycyjne – otwór pionowy [zł]	20 000 000,00
Nakłady inwestycyjne – otwór multilateralny [zł]	40 000 000,00
Cena gazu [zł/tys. m ³]	675,00
Koszty zmienne [zł/tys. m ³]	25,00
Koszty stałe [zł/rok]	1 000 000,00
Stawka amortyzacji	0,10

Tabela 2

Założenie analizy ekonomicznej dla złoża ropy naftowej

Nakłady inwestycyjne – otwór pionowy [zł]	20 000 000,00
Nakłady inwestycyjne – otwór multilateralny [zł]	40 000 000,00
Cena ropy [\$/baryłka]	65,00
Koszty zmienne [zł/m ³]	50,00
Koszty stałe [zł/rok]	1 000 000,00
Stawka amortyzacji	0,10

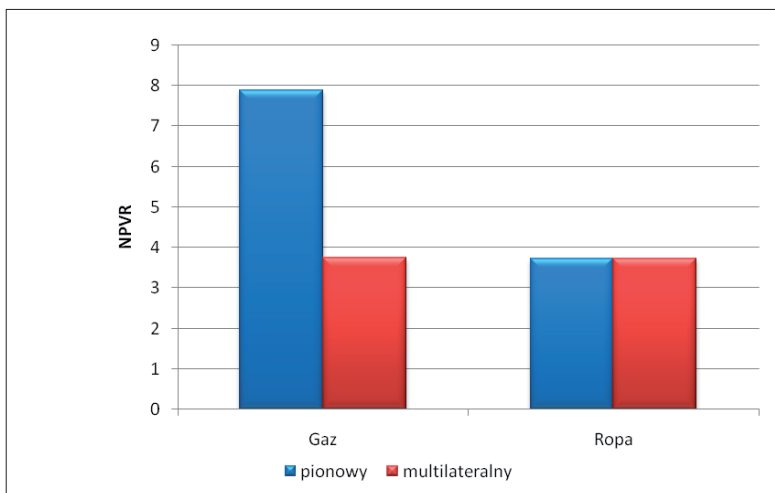
Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 10. NPV dla złoża gazu ziemnego jest wyższe w przypadku zastosowania tradycyjnego otworu pionowego, natomiast dla złoża ropy naftowej wartość zaktualizowana netto jest znacznie wyższa w przypadku otworu multilateralnego. W każdym jednak przypadku inwestycja jest wysoce opłacalna, zarówno przy zastosowaniu otworów pionowych jak i multilateralnych.



Rys. 10. NPV inwestycji dla złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w zależności od rodzaju zastosowanego otworu

Inwestycji o różnych wielkościach nakładów nie powinno się jednak porównywać na podstawie samego kryterium NPV, a bardziej odpowiednią metodą jest wykorzystanie wskaźnika wartości zaktualizowanej netto (NPVR), wyrażonym jako stosunek NPV do zdyskontowanych nakładów inwestycyjnych (rys. 11) [1].

Zastosowanie wskaźnika NPVR wskazuje na przewagę zastosowania otworu pionowego na analizowanym złożu gazu ziemnego. Minimalny wzrost wydobywania nie rekompensuje



Rys. 11. NPVR inwestycji dla złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w zależności od rodzaju zastosowanego otworu

zwiększonych nakładów inwestycyjnych, związanych z zastosowaniem otworu multilateralnego. W przypadku złoża ropy naftowej, przy identycznej wielkości NPVR dla obu rodzajów otworów, należy wskazać na otwór multilateralny, jako korzystniejszy, ze względu na znacznie wyższe wydobycie i wyższy poziom NPV.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzić można, iż zastosowanie odwiertu multilateralnego znacząco wpływa na zwiększenie wydobycia ropy naftowej ze złoża. W przypadku złóż gazu ziemnego nie obserwuje się znaczącego wpływu na wydobycie w zakresie analizowanych ciśnień. Główną korzyścią w tym przypadku może być zminimalizowanie niebezpieczeństwa powstawania stożków wodnych a co za tym idzie zawodnienia odwiertów dzięki oddaleniu odwiertu multilateralnego od konturu gaz – woda. Odwiert taki zapewnia ponadto objęcie drenażem znacznej części złoża, co w przypadku wierceń pionowych wymagałoby rozbudowanej siatki odwiertów. Jednakże prace związane z wykonaniem takiego odwiertu poprzedzone powinny być dokładnymi badaniami geologiczno złożowymi w celu identyfikacji panujących obecnie w złożu warunków energetycznych oraz określenia pozostających w złożu zasobów. Istotna jest również prawidłowa lokalizacja oraz właściwe określenie długości odgałęzień zapewniające dostęp do strefy ropnej i bezpieczną odległość od strefy zawodnionej.

Z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia zastosowanie otworu multilateralnego na analizowanym złożu ropy naftowej jest bardzo korzystne, ponieważ uzyskujemy prawie 88% wzrost wydobycia w przeciągu 10 lat oraz znacząco większe przychody i zyski z eks-

ploatacji złoża. W przypadku badanego złoża gazu ziemnego minimalny wzrost wydobycia i gorsze wyniki ekonomiczne nie uzasadniają zastosowania otworu multilateralnego.

Wnioski te nie są uniwersalne i dotyczą jedynie analizowanych złóż, a ocena zarówno technicznej, jak i ekonomicznej efektywności zastosowania otworów multilateralnych powinna być przeprowadzona dla każdego złoża oddzielnie.

LITERATURA

- [1] Brigham E.: *Zarządzanie finansami*. PWE. Warszawa, 2000
- [2] Hogg C.: *Identifying the Economic Savings Beyond the Reservoir*. SPE 94677, 2005
- [3] Oberkircher J.: *The Economic Viability of Multilateral Wells*. IADC/SPE 59202, 2000