

Tadeusz Kwilosz

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Zastosowanie odwiertów horyzontalnych w eksploatacji złóż i PMG

Opracowanie zawiera wyniki obserwacji i analiz związanych z wykorzystaniem odwiertów horyzontalnych w eksploatacji konwencjonalnych złóż ropy i gazu oraz podziemnych magazynów gazu. Wskazano główne obszary zastosowania technologii odwiertów horyzontalnych i przedstawiono wyniki oceny ich efektywności w porównaniu z odwiertami pionowymi. Posłużono się rezultatami analiz opracowanymi głównie przez ośrodki badawcze w USA, dotyczącymi obszaru USA i Kanady.

Słowa kluczowe: odwiert horyzontalny, współczynnik szczypania, wydajność złoża.

The use of horizontal wells in gas production from natural gas fields and UGS

The study contains the results of observations and analyzes associated with the usage of horizontal wells in conventional production from oil and gas fields and underground gas storage. The article shows the main areas of the application of horizontal drilling technology and the results of the assessment of their effectiveness in comparison with vertical well technology. Results of analyzes developed, mainly by research centers from the USA, relating to the territory of the United States of America and Canada were used.

Key words: horizontal well, recovery factor, reservoir performance.

Wstęp

Pierwsze próby wierceń horyzontalnych przeprowadzono w 1927 roku, jednakże dynamiczny wzrost liczby wykonanych w ten sposób odwiertów nastąpił dopiero po 1980 roku. Czas, który upłynął od pierwszych prób do upowszechnienia zastosowania odwiertów horyzontalnych w eksploatacji ropy naftowej i gazu ziemnego, był potrzebny do opracowania koniecznych technologii. Wzrost cen ropy naftowej do 35 \$ za baryłkę podczas kryzysu paliwowego w latach 70. XX wieku spowodował zainteresowanie się także złożami gazu ziemnego i ropy naftowej charakteryzującymi się trudnymi warunkami geologicznymi. Eksploatacja tych złóż wymagała zastosowania nowych rozwiązań, opartych głównie na technologii odwiertów horyzontalnych. Początkowo odwierty tego rodzaju były wykorzystywane do eksploatacji złóż o małej miąższości i przepuszczalności, naturalnie zeszcelinowanych, oraz w przypadku występowania problemów

z tworzeniem się stożków wodnych. Aktualnie technologia ta znajduje zastosowanie zarówno w eksploatacji złóż ropy naftowej, jak i gazu ziemnego.

Odwierty horyzontalne bardzo często wykorzystywane są w eksploatacji naturalnie zeszcelinowanych skał zbiornikowych (np. wapienie). Główną zaletą tego rozwiązania jest połączenie długim odcinkiem poziomym dużej liczby szczelin, co w konsekwencji prowadzi do bardziej efektywnego szczypania całego złoża. Kolejnym obszarem zastosowań technologii wierceń horyzontalnych jest eksploatacja złóż gazu ziemnego, w których występują problemy spowodowane tworzeniem się stożków wodnych. Wykorzystanie odwiertów horyzontalnych pozwala na uzyskanie tych samych wydajności przy niższych depresjach eksploatacyjnych w porównaniu do odwiertów pionowych. W związku z tym niższe depresje zapobiegają powstawaniu stożków oraz podciąganiu wody

złożowej. Podobny mechanizm działa przy eksploatacji złóż ropy naftowej, w których występuje zjawisko podciągania gazu podczas eksploatacji ropy.

Odwierty horyzontalne są szeroko wykorzystywane w eksploatacji złóż gazu ziemnego, zarówno charakteryzujących się niską, jak i wysoką przepuszczalnością. Zastosowanie wierceń horyzontalnych w złożach o niskich wartościach przepuszczalności pozwala na zwiększenie obszaru drenażu pojedynczym odwiertem, co w konsekwencji prowadzi do redukcji liczby odwiertów koniecznych do eksploatacji złoża.

Zupełnie inny mechanizm występuje w przypadku złóż o wysokiej przepuszczalności. Wysoka przepuszczalność

horyzontu gazowego przyczynia się do uzyskania przez odwierty dużej wydajności, co w konsekwencji prowadzi do powstania zjawiska turbulencji w pobliżu odwiertów. Zjawisko to spowodowane jest wysokimi prędkościami przepływu. Odwierty poziome pozwalają na redukcję tego zjawiska, co skutkuje zwiększeniem ich wydajności.

Technologia wiercenia takich otworów wykorzystywana jest w metodach wtórnych eksploatacji złóż ropy naftowej, takich jak nawadnianie złoża oraz zatłaczanie gazu. Odwierty horyzontalne coraz częściej stosowane są w eksploatacji podziemnych magazynów gazu ziemnego, gdyż pozwalają na uzyskiwanie dużych wydajności przy stosunkowo niskiej depresji eksploatacji.

Doświadczenia uzyskane z wiercenia otworów horyzontalnych

Aktualna technologia wykonywania odwiertów poziomych pozwala na obniżenie kosztów, co prowadzi do coraz szerszego jej wykorzystania w eksploatacji złóż ropy naftowej, gazu ziemnego i podziemnych magazynów gazu [3, 5]. Pomimo dużej liczby zastosowań odwiertów poziomych przez zachodnie koncerny Polska nie dysponuje znaczącym doświadczeniem w zakresie tego rodzaju eksploatacji.

Do głównych korzyści płynących z zastosowania technologii odwiertów horyzontalnych należy zaliczyć:

- zwiększenie udostępnienia złoża (większy obszar),
- uniknięcie trudnych lokalizacji odwiertów,
- eksploatację złóż, w których występuje zjawisko stożków wodnych lub gazowych,
- połączenie obszarów złóż o zróżnicowanych właściwościach kolektorskich.

Szybki rozwój technologii wiercenia otworów horyzontalnych dostarczył danych niezbędnych do przeprowadzenia analizy skuteczności ich stosowania.

W związku z tym, że Polska nie dysponuje wystarczającym doświadczeniem w eksploatacji odwiertów horyzontalnych, zaprezentowano wyniki obcych opracowań, w celu pokazania doświadczeń zdobytych przez firmy zachodnie.

Pierwsza analiza została przeprowadzona przez Maurer Engineering dla U.S. Department of Energy. Badanie dotyczyło obszaru USA i Kanady i wykonano je w postaci ankiety. Uzyskane dane dotyczyły 58 złóż w USA (około 2300 odwiertów horyzontalnych) i 88 złóż w Kanadzie (około 700 odwiertów horyzontalnych) [2].

Badanie wykazało, że zastosowanie odwiertów poziomych może przyczynić się do wzrostu zasobów wydobywalnych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Wzrost ten oszacowano średnio na 2% pierwotnych zasobów geologicznych. Do głównych czynników zwiększenia stopnia szczypania można zaliczyć:

- udostępnienie obszarów złóż, które nie były eksploatowane do tej pory z powodów ekonomicznych (połączenie szczelin),
- opóźnienie tworzenia się stożków wodnych lub gazowych (zwiększenie ilości wydobytej ropy naftowej lub gazu),
- zwiększenie wydobywania ze złóż o małej miąższości i o małej przepuszczalności,
- poprawę efektywności zawadniania złoża (w przypadku złóż ropy naftowej).

W USA ponad 40% otworów horyzontalnych wierconych jest w formacjach węglanowych, natomiast 60% w innych formacjach geologicznych. Ankieta wykazała, że do najczęstszych przyczyn wyboru technologii odwiertów horyzontalnych należy zaliczyć (rysunek 1):

- możliwość połączenia naturalnych szczelin (53% przypadków);
- minimalizację tworzenia się stożków wodnych/gazowych (33%).

Początkowo większość odwiertów horyzontalnych była wykonywana w formacjach węglanowych. Dobre wyniki ekonomiczne uzyskane podczas eksploatacji tych złóż skłoniły do zastosowania nowej technologii także w innych formacjach geologicznych.

Do najczęstszych powodów wykorzystania technologii odwiertów poziomych w Kanadzie należy zaliczyć (rysunek 2):

- minimalizację tworzenia się stożków wodnych/gazowych (48% przypadków),
- korzystne wyniki ekonomiczne (48%),
- możliwość połączenia naturalnych szczelin (27% przypadków).

Wyniki ankiet uzyskane przez Maurer Engineering zostały potwierdzone przez badania przeprowadzone przez P. Coffina z Elf Aquitaine [1]. Jego analiza wykazała, że najskuteczniejszym obszarem zastosowania technologii

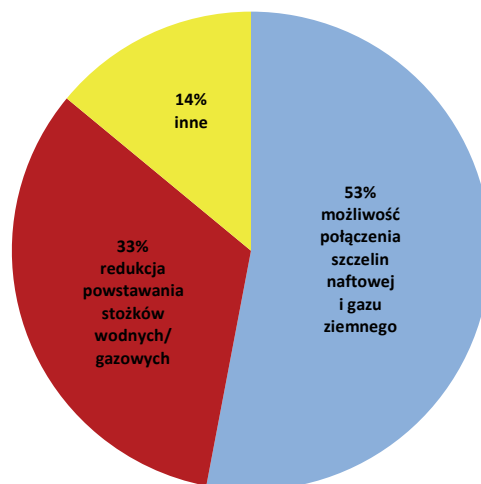
odwiertów horyzontalnych jest obszar złóż ropy naftowej i gazu ziemnego charakteryzujących się naturalną szczelinowatością oraz występowaniem stożków wodnych. Bardzo dobre efekty otrzymano również na złożach gazu ziemnego, gdzie głównym celem odwiertów była redukcja efektu turbulencji. W związku z tym wyższe wydajności odwiertów można było uzyskać przy niższych depresjach eksploatacji.

Podobną analizę przeprowadzili W. B. Harrison i R. Gillespie w 2003 roku [4]. Dotyczyła ona wykorzystania otworów poziomych odwierconych w okresie 1982–2003 w stanie Michigan. Badaniem zostało objętych 488 odwiertów horyzontalnych. Analiza potwierdziła wszystkie zalety technologii horyzontalnej z wyżej wymienionych badań. Harrison i Gillespie przedstawili procentowy udział analizowanych odwiertów w poszczególnych zastosowaniach (rysunek 3). Odwierty horyzontalne najczęściej były stosowane do:

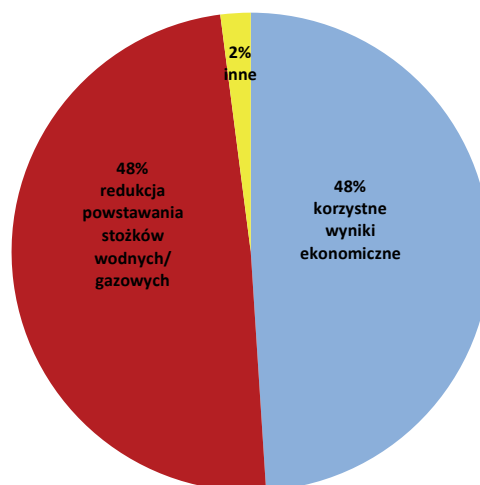
- rozwierceni już zagospodarowanych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego (50%),
- rozwierceni PMG (20%),
- wierceń poszukiwawczych oraz rozwierceni złóż gazu ziemnego (20%),
- wierceni odcinka horyzontalnego z odwiertów pionowych, które pierwotnie nie wykazały przyływu mediów ropa/gaz (10%).

Łatwo zauważyć, że w stanie Michigan stosunkowo dużą część ze wszystkich otworów horyzontalnych stanowią odwierty wiercone na PMG. Wydaje się to naturalne, gdyż odwierty poziome są w stanie zapewnić wysoką wydajność, konieczną do funkcjonowania podziemnych magazynów gazu. Bardzo ciekawym zastosowaniem technologii horyzontalnej jest wiercenie odcinka poziomego z istniejących odwiertów pionowych, które pierwotnie nie wykazały przyływu mediów ropa/gaz. W stanie Michigan aż 10% wszystkich odwiertów horyzontalnych wykonuje się w celu wykorzystania nietrafionego otworu pionowego. Pamiętając o tym, że 50% wierceń horyzontalnych zostało wykonanych (Michigan) w celu rozwierceni zagospodarowanych już złóż ropy naftowej i gazu ziemnego, łatwo wytłumaczyć stosunkowo duży udział wierceni odcinka horyzontalnego w „pustych” odwiertach pionowych. Do głównych przyczyn tego zjawiska można zaliczyć:

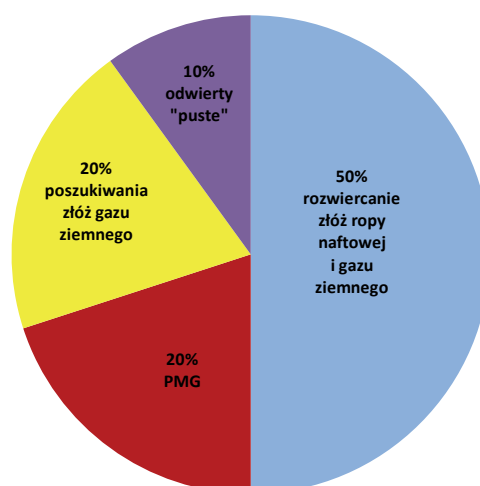
- możliwość udostępnienia rozpoznanego złoża ropy/gazu odcinkiem poziomym,
- redukcję kosztów wierceni otworu horyzontalnego – nawet do 20÷50%.



Rys. 1. Zastosowanie odwiertów poziomych w USA, według Maurer Engineering



Rys. 2. Zastosowanie odwiertów poziomych w Kanadzie, według Maurer Engineering



Rys. 3. Ogólne zastosowanie odwiertów poziomych

Konstrukcja odwiertów horyzontalnych

Podział odwiertów horyzontalnych zaproponował Joshi [6]. Początkowo otwory te wykonywano przy zasto-

sowaniu dużego promienia krzywizny odwiertu. W tego typu wierceniach promień krzywizny odwiertu wynosił

powyżej 300 m. Sytuacja ta była naturalnym rozwinięciem technologii wiercenia odwiertów kierunkowych.

Na początku lat 80. XX wieku opracowano technologię wiercenia odwiertów o:

- średnim promieniu krzywizny (130÷300 m),
- krótkim promieniu krzywizny (10÷20 m).

Aktualnie większość otworów poziomych jest wiercona przy wykorzystaniu średniego promienia krzywizny, gdyż metoda ta pozwala wiercić długie odcinki horyzontalne (1000÷1500 m). Technologia wykonywania odwiertów o krótkim promieniu krzywizny ma zarówno zalety, jak

i wady. Wśród zalet trzeba wymienić niższe koszty wiercenia w stosunku do odwiertów o średnim promieniu wiercenia. Rozwiązanie to jest rzadziej wykorzystywane, gdyż do jego wad należy zaliczyć ograniczenie długości odcinka horyzontalnego.

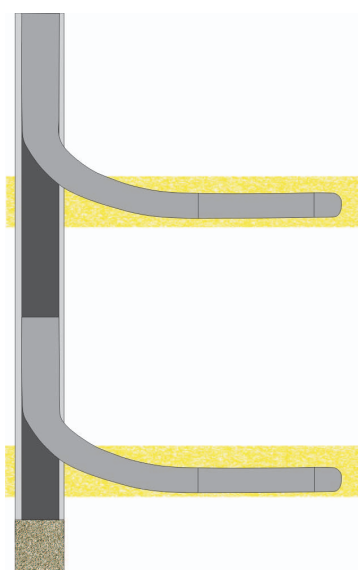
W początkowych wierceniach odcinek horyzontalny był przeważnie niezarurowany lub wyposażony w rury cięte. W późniejszym okresie, w miarę zdobywania doświadczeń, do udostępnienia złoża stosowano gotowe filtry oraz rury cementowane z perforacją odcinka eksploatacyjnego lub system eksploatacyjno-szczelinowy.

Odwierty multilateralne

Technologia odwiertów multilateralnych polega na wykonaniu z jednego otworu pionowego więcej niż jednego odcinka horyzontalnego. Rysunek 4 przedstawia odwiert multilateralny udostępniający równocześnie dwa horyzonty.

Szybki rozwój technologii wiercenia otworów horyzontalnych umożliwił opracowanie technologii wiercenia odcinka poziomego z odwiertu pionowego – poprzez wycięcie „okna” w odwiercie. Następnym krokiem było opracowanie technologii udostępniania dwóch i więcej horyzontów odcinkiem poziomym. Do głównych zalet technologii multilateralnej można zaliczyć:

- obniżenie kosztów wiercenia (15÷30%),
- obniżenie kosztów zagospodarowania złoża (mniej odwiertów i rurociągów),
- zwiększenie wydajności odwiertów,
- mniejszy wpływ na środowisko (mniej odwiertów).



Rys. 4. Odwiert multilateralny

Koszt odwiertów poziomych i multilateralnych

Początkowo koszty odwiertów horyzontalnych były bardzo wysokie. We wczesnych latach 80. XX wieku wiercono otwory o dużym promieniu krzywizny i krótkim odcinku horyzontalnym, od 30 m do 100 m. Wzrost wydajności takich odwiertów w stosunku do otworów pionowych był niewielki, dlatego finansowa opłacalność ich stosowania była niska. Rozwój technologii pozwolił na zmniejszenie promienia krzywizny odwiertu oraz na wydłużenie odcinka poziomego. Aktualnie najczęściej otworów horyzontalnych wierci się o średnim promieniu krzywizny oraz o długim odcinku poziomym, dochodzącym do kilku kilometrów. British Petroleum wykonało rekordowy odwiert typu ERD (*extended reach drilling*), którego długość osiągnęła 10,1 km. Miało to miejsce w Wielkiej Brytanii, na złożu ropy naftowej Wytch Farm. Koszt wiercenia i wyposażenia odwiertów poziomych zależy od wielu parametrów, do których można zaliczyć:

- głębokość wiercenia,

- długość odcinka poziomego,
- warunki występujące na złożu.

Z tych przyczyn trudno jednoznacznie określić koszt wykonania odwiertu poziomego przed opracowaniem projektu szczegółowego. W związku z tym łatwiej oszacować koszt odwiertu horyzontalnego w porównaniu do kosztu otworu pionowego wierconego na tym samym złożu. Porównanie jest jak najbardziej uzasadnione, gdyż odwierty horyzontalne są alternatywą dla odwiertów pionowych. Badania przeprowadzone przez Deskinsa [3] wykazały, że koszt odwiertu horyzontalnego w USA zależy od rodzaju złoża (tablica 1).

Można zauważyć, że wydajność otworu poziomego jest od 2,8 do 3,9 razy większa od wydajności otworu pionowego. Niestety, koszt takich odwiertów jest również wyższy. Indeks zysku występujący w tabeli został wprowadzony w celu wykonania oceny opłacalności eksploatacji odwiertów

Tablica 1. Wskaźniki oceny kosztów wykonania i wydajności odwiertów horyzontalnych dla obszaru USA

Litologia	Stosunek wydajności odwiertu horyzontalnego do pionowego	Stosunek kosztu odwiertu horyzontalnego do pionowego	Indeks zysku
Piaskowce	2,8	2,2	1,27
Formacje węglanowe	3,9	1,8	2,17
Wszystkie formacje	3,2	2,0	1,60

Tablica 2. Wskaźniki oceny kosztów wykonania i wydajności odwiertów horyzontalnych dla obszaru Kanady

Litologia	Stosunek wydajności odwiertu horyzontalnego do pionowego	Stosunek kosztu odwiertu horyzontalnego do pionowego	Indeks zysku
Piaskowce Lekka ropa	5,1	2,3	2,22
Piaskowce Ciężka ropa	5,6	2,5	2,24
Formacje węglanowe	3,1	2,0	1,55
Złoża gazu	3,4	1,8	1,89
Wszystkie formacje	4,1	2,2	1,86

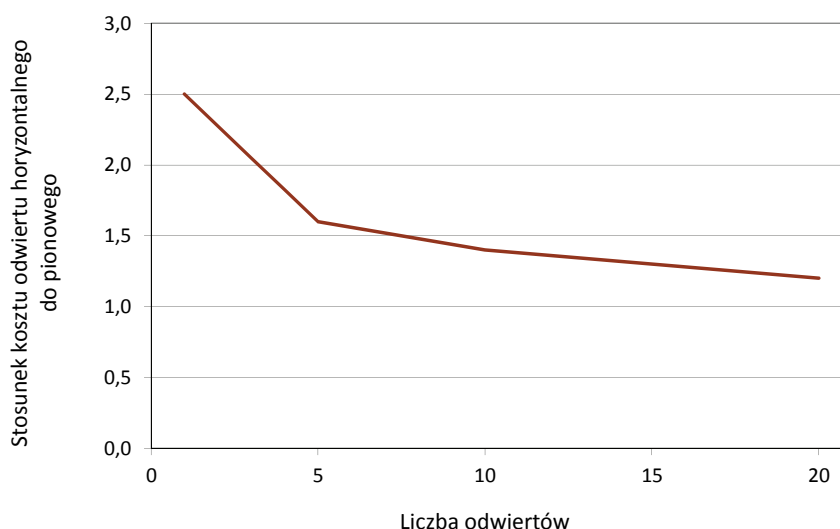
poziomych i pionowych. Indeks zysku uwzględnia wzrost wydajności odwiertu poziomego wraz z kosztem jego wiercenia i wyposażenia. Deskins wykazał, że stosowanie odwiertów horyzontalnych jest opłacalne we wszystkich formacjach geologicznych. W USA najbardziej opłaca się wykonywać takie odwierty w skałach węglanowych. Podobne badania przeprowadzone dla złóż zlokalizowanych w Kanadzie (tablica 2) potwierdziły dane amerykańskie.

Porównując wyniki badań przeprowadzonych w USA i Kanadzie, można zauważyć, że średni indeks zysku obliczony dla wszystkich formacji w USA (1,6) jest podobny do analogicznej wielkości wyznaczonej dla złóż kanadyjskich (1,86). Z przedstawionych badań płynie bardzo ciekawy wniosek, że zastosowanie technologii odwiertów

horyzontalnych również na złożach gazu ziemnego jest opłacalne ekonomicznie. Indeks zysku dla złóż kanadyjskich wynosi 1,89, co znaczy, że odwiert horyzontalny jest lepszy o 89% od odwiertu pionowego po uwzględnieniu ich wydajności i kosztów.

Joshi [6] wykazał, że koszty odwiertów horyzontalnych wykonanych na danym złożu maleją wraz z liczbą przeprowadzonych wierceń (rysunek 5). Zależność ta została nazwana krzywą zdobywania doświadczenia. Koszt wiercenia pierwszego otworu jest około 2,5 razy wyższy od kosztu odwiertu pionowego.

Wykres pokazuje, że koszt wykonania odwiertu horyzontalnego drastycznie spada, gdy wiercimy co najmniej 5 odwiertów – z 2,5 do około 1,6 (do 1,2 dla 20 odwiertów).



Rys. 5. Krzywa kosztu odwiertów horyzontalnych

Koszt odwiertów multilateralnych

Największą zaletą odwiertów multilateralnych jest możliwość równoczesnego udostępnienia kilku horyzontów z jednego odwiertu pionowego, w związku z czym koszty zagospodarowania złoża są niższe niż koszty rozwiązań alternatywnych.

Oto przykłady wykorzystania technologii multilateralnej w praktyce:

- Unocal zastosował odwiert multilateralny udostępniający 3 horyzonty na złożu Dos Cuadras w Kalifornii, koszt odwiertu wyniósł 2/3 spodziewanego kosztu 3 odwiertów horyzontalnych,
- zastosowanie odwiertów horyzontalnych i multilateralnych na Morzu Północnym przynosi oszczędności od 23% do 44% w stosunku do odwiertów pionowych.

Podsumowanie

Technologia związana z wykorzystaniem odwiertów horyzontalnych do eksploatacji złóż gazu ziemnego, ropy naftowej i podziemnych magazynów gazu jest stosunkowo nowa, gdyż jej rozwój rozpoczął się w latach 80. XX wieku. Początkowo jej zastosowanie ograniczało się do złóż gazu ziemnego i ropy naftowej charakteryzujących się małą miąższością i niską przepuszczalnością. Ekonomiczne sukcesy uzyskane w eksploatacji pierwszych odwiertów poziomych skłoniły projektantów do wykorzystania ich do coraz to nowszych zastosowań. Aktualnie jest eksploatowanych około kilkunastu tysięcy odwiertów horyzontalnych odwierconych na wszystkich kontynentach w różnych formacjach geologicznych. Duża część z nich posiada już wieloletnią historię wydobywania, która pozwala na przeprowadzenie badań koniecznych do określenia ich ekonomicznej efektywności. Badania wykazały, że do najefektywniejszych obszarów zastosowania odwiertów horyzontalnych można zaliczyć eksploatację:

- złóż o małej miąższości i o małej przepuszczalności, które nie były eksploatowane do tej pory z powodów ekonomicznych,
- złóż szczelinowatych, na których występuje zjawisko powstawania stożków wodnych lub gazowych (ropa naftowa),
- podziemnych magazynów gazu ziemnego,
- złóż ropy naftowej, na których prowadzone jest zawładanie złoża.

Ciekawy wniosek został wyciągnięty przez firmę Maurer Engineering, która przeprowadziła badania dla U.S. Department of Energy. Badanie dotyczące obszaru USA i Kanady, wykonane w postaci ankiety, wykazało, że zastosowanie odwiertów poziomych może przyczynić się do wzrostu zasobów wydobywalnych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Wzrost ten oszacowano średnio na 2% pierwotnych zasobów geologicznych.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2014, nr 12, s. 926–931

Artykuł nadesłano do Redakcji 26.09.2014 r. Zatwierdzono do druku 27.10.2014 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy przemysłowej pt. *Określenie możliwości prowadzenia wierceń typu „Slim Hole” w warunkach przedgórze Karpat/Karpat – etap I* – praca INiG na zlecenie PGNiG SA; nr zlecenia: 764/KP/2013, nr archiwalny: DK-4100-136/2013.

Literatura

- [1] Coffin P.: *Horizontal well evaluation after 12 years*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3–6 October 1993.
- [2] Deskins W. G., McDonald W. J., Reid T. B.: *Survey shows successes, failures of horizontal wells*. Oil & Gas Journal, June 1995.
- [3] Filar B.: *Analiza wpływu zastosowania różnych technologii udostępniania złóż niekonwencjonalnych na opłacalność ich eksploatacji*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 3, s. 143–150.
- [4] Harrison W. B., Gillespie R.: *Horizontals making an impact in Michigan*. AAPG Mid-Continent Section Meeting, Tulsa, Oklahoma, 12–14 October 2003.
- [5] Kasza P.: *Nowe technologie udostępniania złóż węglowodorów w otworach kierunkowych i poziomych*. *Nafta-Gaz* 2009, nr 4, s. 317–321.
- [6] Saavedra N. F., Joshi S. D.: *Application of Horizontal Well Technology in Colombia*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2002, vol. 41, no. 3, pp. 33.



Dr Tadeusz KWILOSZ
 Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu.
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25A
 31-503 Kraków
 E-mail: kwilosz@inig.pl