

Robert Rado*, Jan Lubaś**

KONCEPCJA WIERCENIA EKSPLOATACYJNYCH OTWORÓW KIERUNKOWYCH I HORYZONTALNYCH Z OKREŚLENIEM KONTURU ROPA-WODA

1. WSTĘP

Wraz z postępem techniki i technologii w wiertnictwie, w wierceniach udostępniających złoża powszechnie wykorzystywane są otwory kierunkowe. Obniżenie nakładów na wiercenie i zwiększenie trafności otworów można uzyskać przez zastosowanie wiercenia otworu kierunkowego z dodatkowym odcinkiem pilotowym. Wiercenie takie pozwala na dokładne określenie granicy konturu ropa-woda lub określenie położenia stropu i spągu warstwy produktywnej i nieproduktywnej, w przypadku warstw o małej miąższości. Dokładne określenie położenia tej granicy zwiększa szanse na wykonanie otworu kierunkowego w warstwie roponośnej.

Wykonanie otworu z poziomym odcinkiem końcowym nastęrcza niekiedy trudności z osiągnięciem zamierzonego celu. Poprawę celności wykonania takiego otworu ułatwia wykonanie jego części jako odcinka pilotowego, a w ślad za nim – końcowego otworu kierunkowego.

Analizy czasu oraz techniki wykonania takich otworów są ułatwieniem w określeniu niezbędnych nakładów inwestycyjnych na ich wykonanie, kalkulacji kosztu eksploatacji urządzeń wiertniczych, kosztów serwisu kierunkowego etc.

Czas oraz koszty potrzebne na wykonanie takiego otworu kierunkowego można podzielić na:

- czas i koszty potrzebne na odwiercenie otworu pilotowego i późniejszą jego likwidację,
- czas i koszty niezbędne na wykonanie odcinka kierunkowego otworu z odcinkiem poziomym.

Dzięki danym uzyskanym z wykonania takiego otworu udało się uchwycić czas trwania poszczególnych faz projektu, niezbędnych do wykonania otworu do planowanej głębokości i założonej długości odcinka poziomego

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Poszukiwania Nafty i Gazu Kraków Sp. z o.o.

Analizując czasy i koszty trwania poszczególnych faz całego procesu technologicznego, można wykazać, że dwuetapowe wykonanie otworu kierunkowego zwiększa trafność otworu, niepodnosząc równocześnie znacznie ogólnego kosztu wykonania otworu.

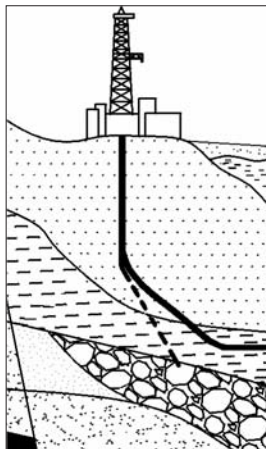
2. CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA-WIERTNICZA WYKONANIA OTWORU

Aktualne tendencje przy wykonywaniu otworów eksploatacyjnych bądź rekonstrukcyjnych zmierzają do wykorzystywania wierceń kierunkowych. Otwory takie wiercone są np. w celu zwiększenia efektywności eksploatacji złoża, która jest niewystarczająca bądź ekonomicznie nieuzasadniona w przypadku wykonywania otworów pionowych, lub też uwarunkowania techniczno-geologiczne utrudniają lub uniemożliwiają odwiercenie otworów pionowych. Inną przesłanką do wykonania takiego otworu może być również brak technicznych możliwości likwidacji komplikacji lub awarii w otworze pionowym, powodujący konieczność odchylenia osi otworu w nowym kierunku.

Wiercenia kierunkowe z poziomym odcinkiem otworu należą do jednych z najtrudniejszych technicznie, a pozytywne zakończenie wiercenia zależy między innymi od prawidłowego ulokowania poziomej części otworu w warstwie produktywnej.

W przypadku gdy miąższość warstwy jest niewielka, zalega ona pod dużym kątem bądź jest pofałdowana, a struktura, w której się znajduje, jest zaburzona np. uskokami, powodzenie wykonania końcowej części otworu związane jest z dokładnym wyznaczeniem parametrów zalegania warstwy. Bez ich znajomości proces kierowania trajektorią osi otworu jest trudny i w wielu przypadkach kończy się niepowodzeniem z powodu nawiercenia warstwy nadległej lub leżącej poniżej, bądź też wprowadzenie otworu pod niewłaściwym kątem w stosunku do rozciągłości warstwy.

Dlatego też, nowe koncepcje wiercenia otworów zmierzają w kierunku wiercenia otworów z odcinkiem pilotowym, a następnie właściwym otworem kierunkowym (rys 1).



Rys. 1. Koncepcja wykonania otworu kierunkowego ze zlikwidowaną końcówką otworu

Autorzy artykułu oparli swoje rozważania na danych uzyskanych z prac wiertniczych prowadzonych na strukturze roponośnej, która została rozwiercona otworami pionowymi.

W trakcie eksploatacji złoża nastąpił spadek wydajności otworów eksploatacyjnych, w wyniku czego podjęto decyzję o wykonaniu dodatkowych otworów, które pozwoliłyby na przywrócenie oczekiwanej wydajności złoża. Po analizie warunków geologiczno-złożowych i różnych wariantów zdecydowano, że najlepszym rozwiązaniem będzie wykonanie otworów kierunkowych z poziomym odcinkiem końcowym.

Po pierwszych niezbyt udanych doświadczeniach związanych z celnością przy wierceniu pierwszego otworu kierunkowego na tej strukturze, zdecydowano o wierceniu kolejnego otworu kierunkowego, tym razem ze wstępnym otworem pilotowym, a następnie wykonanie właściwego otworu kierunkowego. Trudności przy wierceniu pierwszego z otworów zaowocowały doświadczeniami, które wykorzystano, projektując kolejny otwór kierunkowy. Mając na względzie problem z określeniem położenia konturu ropa-woda, co utrudniało zaprojektowanie odpowiedniej trajektorii otworu kierunkowego i poprawne ułożenie poziomego odcinka w stosunku do tego konturu, zdecydowano na wyznaczenie jego położenia za pomocą otworu pilotowego. W trakcie eksploatacji złoża nastąpiła zmiana położenia konturu ropa-woda, co przy wierceniu otworu kierunkowego z poziomym odcinkiem końcowym mogło spowodować, że uzyskany efekt byłby niewspółmierny do poniesionych nakładów finansowych.

Nakłady były podstawowym czynnikiem przemawiającym za wykonaniem otworu pilotowego. W rachubę wchodziło wykonanie otworu badawczego, dzięki któremu uzyskano by aktualne dane niezbędne do zaprojektowania procesu wiercenia kolejnych otworów. Jednak z punktu widzenia finansowego to rozwiązanie podrażało inwestycje.

Dlatego też ostatecznie zaprojektowano otwór kierunkowy dwuetapowy, tj.:

1. wykonanie otworu pilotowego,
2. wykonanie otworu kierunkowego.

Projekt zakładał odwiercenie otworu pilotowego wierconego w końcowej fazie pod kątem 30° , następnie likwidację jego końcowej części i odwiercenie nowej części otworu wchodzącej w warstwę produktywną pod kątem ok. 90° .

Dane do artykułu zebrano z wiercenia otworu, którego celem było określenie położenia konturu ropa-woda, a następnie osiągnięcie odcinkiem kierunkowym otworu piaskowca dewońskiego, który jest warstwą produktywną zalegającą w przedziale głębokości od 2650 m do 2715 m (TVD – *total vertical depth*).

Prace wiertnicze prowadzono na strukturze geologicznej o następującej budowie geologicznej:

- czwartorzęd do głębokości ok. 27 m,
- trias do głębokości ok. 805 m,
- karbon do końcowych głębokości wiercenia, czyli ok. 2850 m.

Projekt geologiczno-techniczny otworu zakładał następującą konstrukcję zarurowania otworu.

Kolumnę wstępną zaprojektowano do głębokości 27 m i zarurowano rurami okładzinowymi $13 \frac{3}{8}$ ". Wiercenie odbywało się świdrem o średnicy $17 \frac{1}{2}$ ".

Drugi etap wiercenia zakładał przewiercenie triasu i nawiercenie maksymalnie 25 m karbonu poniżej jego stropu, a następnie zarurowanie tej części otworu rurami 9 $\frac{5}{8}$ " (cdw). Kolumna ta była przewidziana jako przewodnikowa, na niej zamontowane zostało powierzchniowe wyposażenie przeciwerupcyjne. Wiercenie dla tego interwału wykonano świdrem gryzowym produkcji Reed EHT11G o średnicy 12 $\frac{1}{4}$ ". Ten etap wiercenia, czyli wykonanie odcinka otworu pionowego przebiegło bez komplikacji.

W trzecim etapie odwiercono odcinek otworu świdrem gryzowym 8 $\frac{1}{2}$ " z wglębnym napędem, a następnie zarurowano rurami okładzinowymi 7" (kolumna techniczna – cdw). Do wiercenia użyto świdrów typu PDC – UNITED DIAMOND UD513. Otwór w tej części, tzn. poniżej buta rur 9 $\frac{5}{8}$ ", wiercono początkowo jako prostoliniowy, a następnie od głębokości 1461 m rozpoczęto zmianę trajektorii otworu tak, aby osiągnąć odchylenie jego osi o kąt 30° na głębokości 100 m powyżej stropu karbonu. Po uzyskaniu zakładanego odchylenia otwór wiercono stycznie do zadanego kąta już jako otwór prostoliniowy, aby wprowadzić go w strop karbonu pod tym kątem i doprowadzić go do zaplanowanej głębokości. Dla tego odcinka odchylenie rozpoczęto na głębokości 1461 m (KOP – *kick-off point*), a założony kąt odchylenia osi otworu uzyskano na głębokości 2488 m (EOB – *end of build up*). Zestaw do wiercenia otworu kierunkowego składał się z zestawu z wglębnym silnikiem hydraulicznym firmy Varidrill. Odchylenie osi otworu do osiągnięcia zakładanego kąta wykonano zestawem z krzywym łącznikiem o kącie 1,15°. Następnie wiercenie kontynuowano pod uzyskanym kątem do głębokości 2585 m (MD – *length of wellbore*), czyli 2534 m (TVD). Po zakończeniu wiercenia tego odcinka otworu wykonano pomiary geofizyczne, zapuszczono rury okładzinowe 7" i zacementowano je do wierzchu.

Nietypowe było wykonanie kolejnego etapu, czyli otworu pilotowego. Wykonanie odcinka otworu pilotowego o maksymalnym kącie odchylenia 30° miało spełnić dwa zasadnicze zadania. Po pierwsze, zbadać położenie konturu ropa-woda w piaskowcu dewońskim, w celu ostatecznego ustalenia współrzędnych odcinka poziomego. W tym przypadku ograniczenie kąta odchylenia osi otworu do 30° wiązało się z utrudnieniem wprowadzenia aparatury kontrolno-pomiarowej. Przy większych kątach odchylenia konieczne jest używanie specjalistycznego osprzętu z własnym napędem do przemieszczania go w głąb otworu. W takim przypadku wydłuża to czas wykonania badań geofizycznych i w efekcie podraża wykonanie otworu. Po drugie, nachylony odcinek po zlikwidowaniu jego dolnej części stanowił początkowy fragment właściwego otworu kierunkowego.

Kontynuowanie wiercenia poniżej buta rur okładzinowych o średnicy 7" otworu pilotowego kontynuowano pod ustalonym kątem odchylenia do głębokości 2932 m (MD). Wiercono go świdrem o średnicy 6" aż do osiągnięcia konturu ropa-woda. Do wiercenia użyto zestawu BHA z silnikiem wglębnym 4 $\frac{3}{4}$ " z możliwością sterowania trajektorią otworu. Odcinek ten nie został zarurowany, a po przeprowadzeniu pomiarów geofizycznych, które potwierdziły położenie konturu ropa-woda, zlikwidowano go na całej długości przez wykonanie korka cementowego.

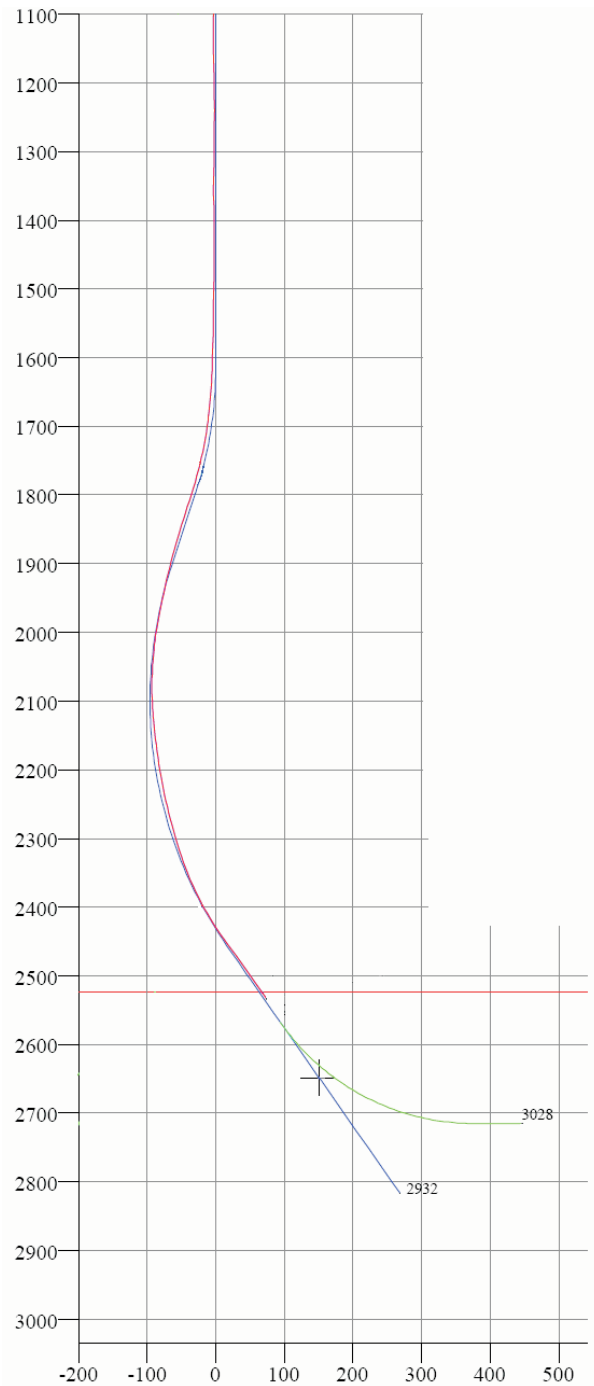
Wiercenie właściwego otworu kierunkowego świdrem o średnicy 6" nastąpiło poprzez odchylenie otworu w wykonanym korku cementowym bezpośrednio pod butem rur okładzinowych 7". Wykonano to, stosując do tego celu zestaw BHA z krzywym łącznikiem, zakładając wzrost kąta odchylenia 9° na każde 30 m długości wierconego otworu. Część

eksploatacyjną otworu przewidziano zarurować kolumną traconą (liner) o średnicy 4 1/2" zapiętą na łączniku 100 m powyżej buta kolumny rur okładzinowych 7" i zacementowaną na zakładkę.

Konstrukcję otworu przedstawiono w tabeli 1, natomiast schematyczną trajektorię otworu pilotowego i otworu kierunkowego zaprezentowano na rysunku 2. W tabeli 2 zestawiono dolną część przewodu wiertniczego dla wiercenia otworu o średnicy 8 1/2" z głębokim silnikiem hydraulicznym.

Tabela 1
Profil geologiczny i schemat zarurowania otworu

Zakres głębokości [m]	Zarurowanie [m]				Litologia	Stratygrafia		
	13 3/8"	9 5/8"	7"	4 1/2"				
0÷30	27 m	852 m	2534 m	2452 m	Piaski grubo- i średnioziarniste z wkładkami gliny	Czwartorzęd		
30÷50					Piaskowiec kwarcytowy z wkładkami kwarcytu			
50÷80	Piaskowiec kwarcytowy, ił							
80÷190	Piaskowiec kwarcytowy, plastyczne iły amorficzne z wkładkami węgla kamiennego							
190÷330	Iły szare				Trias			
330÷565	Piaskowiec kwarcytowy, łupek szary, zlepienie wkładki kwarcytów							
565÷560	Zlepienie							
560÷820	Piaskowiec kwarcytowy, łupek brunatny, łupek czerwony							
820÷875	Łupek szary							
875÷970	852 m				2534 m	2452 m	Łupek szary, mułowce szare z wkładkami węgla kamiennego	Karbon
970÷1330							Łupek szary, mułowiec szary, piaskowiec szary	
1330÷1500		Łupek szary, mułowiec szary, wkładki węgla kamiennego piaskowiec szary						
1500÷2620		Łupek szary z przewarstwieniami mułowca szarego						
2620÷2655		Piaskowiec kwarcytowy z przewarstwieniami łupka brunatnego						
2655÷2690	Łupki szare							
2690÷2935	2715 m	2534 m	2452 m	Piaskowiec z wkładkami kaolinu				



Rys. 2. Schemat trajektorii otworu horizontalnego

Tabela 2

Zestawienie dolnej części przewodu wiertniczego dla wiercenia otworu o średnicy 8 1/2"

Średnica nominalna ["]	Element przewodu wiertniczego	Długość [m]	Długość skumulowana [m]
5	Rury płuczkowe		Do wierzchu
6 3/4	Łącznik	0,50	62,93
6 1/2	Obciążniki	30,00	62,43
6 1/2	Nożyce hydrauliczne	4,60	32,43
6 1/2	Niemagnetyczny obciążnik	9,14	27,83
6 1/2	Amortyzator drgań	0,85	18,69
6 1/2	Niemagnetyczny obciążnik z systemem MWD	9,45	17,84
6 1/2	Niemagnetyczny ustawialny łącznik	1,20	8,39
6 1/2	Łącznik	0,49	7,19
6 3/4	Wgłębny silnik hydrauliczny Varidril 7830 1.83 BH	6,48	6,70
8 1/2	Świder UD 513	0,22	0,22

3. BILANS CZASU I KOSZTY WYKONANIA OTWORU

Analiza czasu wykonania otworów kierunkowego pilotowego do głębokości 2818 m (TVD) pozwoliła autorom na wyznaczenie czasów niezbędnych do wykonania poszczególnych czynności wiertniczych podczas wiercenia otworu kierunkowego z początkową częścią prostoliniową.

Kompleksowe wykonanie otworu wiertniczego kierunkowego z odwierceniem otworu pilotowego można podzielić na trzy zasadnicze etapy:

- Etap I – odwiercenie otworu pilotowego do planowanej głębokości.
- Etap II – likwidacja dolnej części otworu pilotowego.
- Etap III – odwiercenie otworu kierunkowego z odcinkiem horyzontalnym do planowanej długości i jego zarurowanie.

Przeprowadzone analizy wykazały, że wiercenie otworu pod rurę okładzinową 13 3/8" wraz z jej zapuszczeniem i cementowaniem, następnie wszystkie operacje związane z wykonaniem wiercenia i orurowania otworu kolumną 9 5/8" do głębokości 852 m i ostatecznie wiercenie otworu świdrem o średnicy 8 1/2" do głębokości 2534 m (TVD) zajęło łącznie 410 godzin pracy. Przyjmując godzinową stawkę pracy wiertnicy na poziomie 700 \$/h, koszt ten zamknął się kwotą ok. 287 tys. \$. Serwis kierunkowy pracował w tym czasie 282 godz. Przyjmując koszt pracy serwisu na poziomie 400 \$/h, daje to 112 tys. \$. Dodatkowo-

wo należy uwzględnić koszty związane z rurowaniem, cementowaniem, serwisem płuczkowym, zużytymi i zdawnymi do dalszej eksploatacji narzędziami, pomiarami geofizycznymi, serwisem geologiczno-wiertniczym (*mud loggingiem*) oraz kosztami socjalnymi, który kształtują się na poziomie 660 tys. \$. Całościowy koszt tego etapu prac zamknął się kwotą 1,059 mln \$.

Wiercenie odcinka pilotowego, wraz w wykonanymi pomiarami geofizycznymi oraz likwidacją odcinka otworu, zajęło łącznie 115 godzin, co daje kwotę 212 tys. \$.

Na wykonanie końcowej części otworu ze 120-metrowym odcinkiem poziomym potrzebowano 208 godzin. Przyjmując powyższe, koszty eksploatacji wiertnicy, serwisu kierunkowego i pozostałe koszty zamknęły się w granicy 390 tys. \$. Koszty te nie uwzględniają nakładów poniesionych na rury okładzinowe linera 4½", ich zapuszczenie i zacementowanie ponieważ, technologia udostępnienia poziomów produktywnych może przewidywać różne warianty wyposażenia wgłębnego. Ogólny koszt wiercenia otworu z odcinkiem pilotowym i 120-metrowym odcinkiem horyzontalnym zamknął się w kwocie 1,661 mln \$. Czas trwania poszczególnych operacji i ich przybliżony koszt zestawiono w tabeli 3.

W rozpatrywanym przykładzie pominięto czas i koszt uzbrojenia części eksploatacyjnej, ponieważ prace te należy wykonać w każdym otworze przeznaczonym do eksploatacji zarówno pionowym, jak i kierunkowym. Czasy i koszty wykonania takiego uzbrojenia są porównywalne przy identycznych średnicach i konstrukcji otworu. Pominięto również koszty związane z transportem, montażem i demontażem urządzenia wiertniczego. Koszty te są takie same, niezależnie od tego, czy otwór będzie wiercony z odcinkiem pilotowym, czy też bez niego, a uzależnione tylko od warunków geologiczno-technicznych i odległości transportu.

Tabela 3

Zestawienie czasów operacji wiertniczych oraz procentowy udział kosztów wiercenia otworu kierunkowego z odcinkiem horyzontalnym i wykonanym dodatkowo otworem pilotowym

Operacja wiertnicza	Czas trwania operacji [h]	Koszt wiercenia [\$]	Procentowy udział kosztów [%]
Wiercenie otworu i jego zarurowanie kolumną rur okładzinowych 13 ⅜", 9 ⅝" i 7"	410	1 059 000	63,7
Odwiercenie odcinka otworu pilotowego i jego likwidacja	115	212 000	12,8
Wiercenie odcinka otworu kierunkowego ze 120 m odcinkiem horyzontalnym	208	390 000	23,5
Łącznie	733	1 661 000	100

Reasumując, wzrost nakładów na odwiercenie otworu kierunkowego z częścią pilotową, jak wynika z przytoczonych obliczeń, wzrasta o ok. 13% w stosunku do nakładów na otwór kierunkowy wiercony bezpośrednio, bez wiercenia części pilotowej. Wiercenie

otworu pionowego jest oczywiście tańsze i szybsze, ale jak wykazano w omawianym przypadku wykonania otworu pilotowego, nie spowodowało to znaczącego wydłużenia czasu wiercenia i zwiększenia kosztów. Natomiast błędne oszacowanie konturu ropa-woda i w następstwie tego konieczność zmiany trajektorii lub częściowej nieplanowanej likwidacji spowodowałyby z pewnością dużo większe koszty.

W podobnych przypadkach, jak powyżej opisany, a zwłaszcza tam gdzie w trakcie eksploatacji zmieniło się położenie konturu ropa-woda, stosowanie rozpoznawczego otworu pilotowego ogranicza możliwość popełnienia błędu.

Wiercenie otworu wówczas, gdy prace prowadzone są na mało rozpoznanym złożu lub już częściowo wyeksploatowanym złożu, jest obarczone pewnym ryzykiem, ponieważ nieznaczące niedoszacowanie lub przeszacowanie położenia konturu może spowodować, że otwór nie spełni założonego celu, docierając np. do strefy zawadzonej. W skrajnym przypadku może zająć konieczność jego likwidacji lub częściowej likwidacji, a następnie wykorzystanie go do ponownego wiercenia, ale już pod innym kątem. Przy czym, z punktu widzenia technicznego, nie zawsze jest to możliwe, a na pewno niewspółmiernie podnosi nakłady na prace wiertnicze.

Przedstawiona analiza poniesionych nakładów wykazuje zasadność takiego postępowania. Niemniej należy pamiętać, że uwarunkowania techniczne mogą zmienić to podejście. Otwory kierunkowe są z reguły technicznie trudniejsze do wykonania, a prawdopodobieństwo wystąpienia awarii lub komplikacji znacznie wyższe aniżeli w otworach pionowych. Oczywiście w otworach wierconych jako pionowe zdarzają się awarie wiertnicze, jednak ryzyko ich wystąpienia jest znacznie mniejsze, a usuwanie łatwiejsze. Jednak z technicznego punktu widzenia wiercenie otworów pionowych, lub tylko odchylonych, jest szybsze i łatwiejsze. Dlatego decyzja o zastosowaniu otworu kombinowanego musi zostać poprzedzona analizą techniczną i ekonomiczną.

4. WNIOSKI

- 1) Na podstawie wykonanych analiz danych przemysłowych, autorzy stwierdzili, że czas wykonania otworu wiertniczego kierunkowego ze 120-metrowym odcinkiem horyzontalnym do głębokości 2715 m (TVD) i odcinkiem pilotowym do głębokości 2818 m (TVD), wyniósł 733 godziny. Koszt inwestycji wykonania otworu wynosi ok. 1,66 mln \$.
- 2) Otwór pilotowy wykonywany jest jako kierunkowy, celem wykorzystania jego krzywizny przy wierceniu otworu kierunkowego z częścią horyzontalną. Maksymalny kąt odchylenia osi otworu pilotowego nie powinien przekraczać 30° z powodów trudności w przeprowadzeniu pomiarów otworowych.
- 3) Stosowanie rozpoznawczego otworu pilotowego, zwłaszcza tam gdzie w trakcie eksploatacji zmieniło się położenie konturu ropa-woda, ogranicza możliwość popełnienia błędu.
- 4) Koszt odwiercenia otworu pilotowego i późniejszej jego likwidacji podraża inwestycję o ok. 13%. Wzrost nakładów inwestycyjnych na wykonanie otworu pilotowego jest niewspółmierny do uzyskanych informacji geologiczno-złożowych lub też do wykonania dwóch oddzielnych otworów.

LITERATURA

- [1] Rado R., Lubaś J.: *Porównanie efektywności pracy różnych typów narzędzi wiertniczych*. Materiały z IX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej, Kraków, Wydawnictwo AGH 1998
- [2] Gonet A., Zięba A., Pawlikowska J., Wójcik M.: *Technika i technologia rdzeniowania otworów*. Kraków, Wydawnictwo AGH 1996
- [3] Szostak L.: *Wiertnictwo*. Warszawa, Wydawnictwo Geologiczne 1989
- [4] Szostak L., Chrząszcz W., Wiśniowski R.: *Narzędzia wierzące*. Kraków, Wydawnictwo AGH 1996
- [5] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaczek K.: *Horizontal well path designing with catenary metod*. Materiały konferencyjne „Nové poznatky v oblasti vrtania, tazby, dopravy a uskladnovania uhl'ovodíkov”, Podbanské 2002, XI Medzinárodná Vedecko-Technická Konferencia, 29–31 Oktobra 2002, Podbanské, Slovensko
- [6] Wiśniowski R.: *New drilling methods for the conductor casing operations*. Acta Montanistica Slovaca, 2006
- [7] Ziaja J., Wiśniowski R.: *Decision model and criteria of selection of rational schemes of casing in drilling wells*. Materiały Konferencyjne VSB Ostrava „Mineral raw materials and mining activity of the 21st century”, January 30–31, 2001 Ostrava