

# Wstęp do analizy ciśnień wglębnych występujących podczas wykonywania przewiertów horyzontalnych

JACEK JAWORSKI

Zastosowanie przewiertów sterowanych doprowadziło do szybkiego rozwoju technologii układania rurociągów. W chwili obecnej korzyści, jakie daje technologia sterowanych przewiertów horyzontalnych, znane są zarówno projektantom jak również potencjalnym inwestorom. Możliwość przekraczania różnego rodzaju przeszkód powierzchniowych pozwala dużo częściej niż dotychczas instalować rurociągi w terenie zurbanizowanym.

Przepływy płuczki wiertniczej w otworach horyzontalnych są skomplikowane i trudne do opisu, z tego też względu w poniżej przedstawionych rozważaniach zastosowano pewne uproszczenia zakładając, że struktury otaczające otwór nie zostały uszkodzone. W niniejszym artykule pokazano praktyczne zastosowanie obliczeń strat ciśnienia płuczki na przykładzie przewiertu pod rurociąg gazowy 20" (508 mm). Rezultaty tego typu obliczeń mogą być stosowane do określenia maksymalnych dopuszczalnych parametrów wiercenia, zwłaszcza w terenach o gęstej zabudowie, gdzie niekontrolowane ucieczki płuczki poza otwór wiertniczy mogą doprowadzić do dużych szkód.

Zastosowanie metod obliczeniowych w połączeniu z polowymi pomiarami i kontrolą parametrów płuczki pozwala na znaczne zmniejszenie ryzyka w tego typu przedsięwzięciach, zarówno na etapie projektowania jak i wykonawstwa.

## Skrócony opis prac wiertniczych

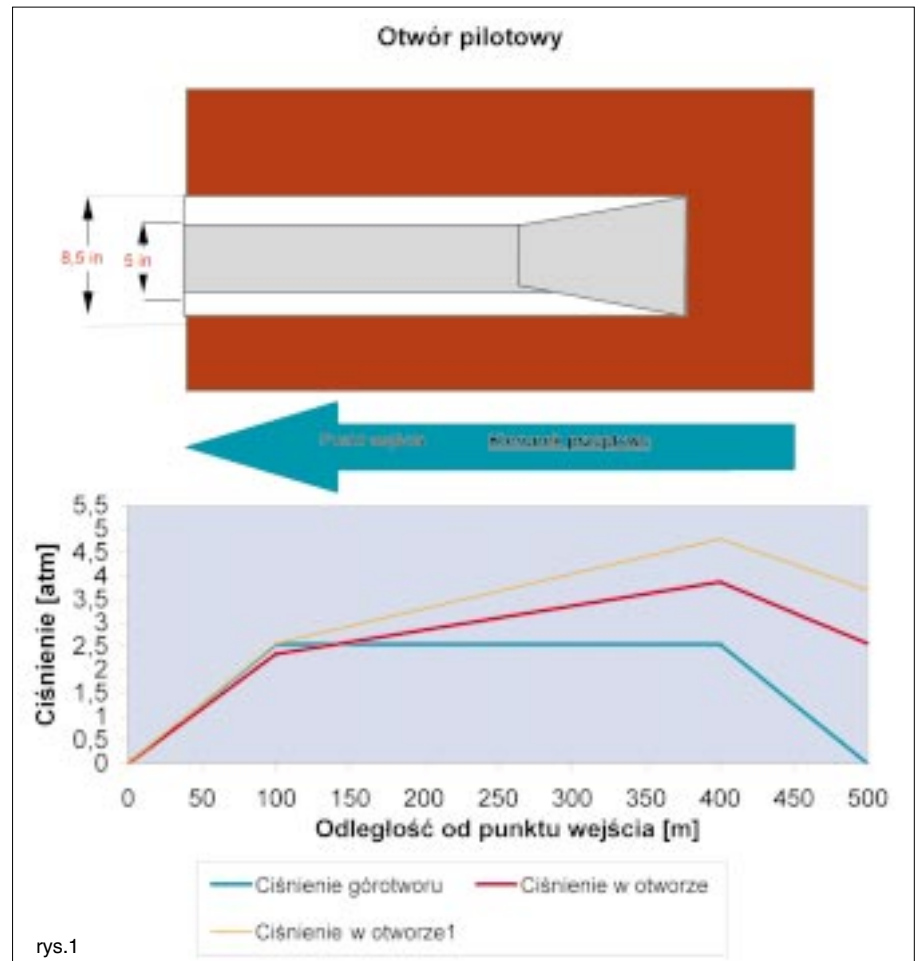
Układanie rurociągu przy zastosowaniu sterowanego przewiertu horyzontalnego składa się z dwóch eta-

pów. Pierwszy to wiercenie małosrednicowego otworu pilotowego wzdłuż projektowanej trajektorii. Drugi etap jest związany z powiększeniem otworu do wielkości, która będzie dostosowana do średnicy instalowanego rurociągu.

Otwór pilotowy jest najczęściej wykonywany dzięki wykorzystaniu asymetrycznej głowicy urabiającej. Postęp wiercenia jest osiągany poprzez hydrauliczno-mechaniczne urabianie skały. Asymetria narzędzia tworzy kierowane odchylenie w płaszczyźnie sterowania. Kiedy wymagana

jest zmiana kierunku wiercenia, narzędzie orientowane jest tak, aby kierunek urabiania odpowiadał oczekiwanej zmianie. Jeżeli wymagane jest wiercenie świdrem trójgryzowym w zwięzłych formacjach, konieczne jest zastosowanie silnika wglębego.

Tor otworu pilotowego jest kontrolowany podczas wiercenia przez pobieranie okresowych odczytów inklinacji i azymutu z głowicy urabiającej. Odczyty te w połączeniu z pomiarami odległości od ostatniego pomiaru są używane do obliczania poziomej i pionowej współrzędnej głowicy wier-



rys.1

całej w stosunku do punktu wejścia na powierzchnię. Otwór pilotowy jest poszerzany w marszach pośrednich bądź jednocześnie z procesem instalacji rurociągu. Przed poszerzaniem narzędzie rozwiercające jest dołączane do przewodu w punkcie wyjścia. Rozwiertak jest obracany i ciągnięty w kierunku wiertnicy, natomiast żerdzie są dodawane za rozwiertakiem w tempie postępu wiercenia. W ten sposób żerdzie wiertnicze są zawsze obecne w wierconym otworze. Przy małych średnicach rurociągów przejścia poszerzające mogą być pominięte i można zaryzykować końcowe przejście, instalując rurę w przewiercie po zakończeniu otworu pilotowego. W tym przypadku przygotowana do wciągania sekcja rurociągu jest dołączana do zestawu poszerzającego, a następnie wciągana za rozwiertakiem w kierunku wiertnicy.

#### **Nieprzewidywalne ucieczki płuczki wiertniczej**

Zagadnienie ucieczek płuczki jest podczas wykonywania przewierć horyzontalnych zjawiskiem dość powszechnie spotykanym i powstaje na skutek przekroczenia ciśnienia nadkładu warstw przez ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej między przewodem wiertniczym i ścianą otworu, w rezultacie czego dochodzi do szczelinowania warstw otaczających. Zjawisko to niejednokrotnie doprowadzało do powierzchniowych wypływów płuczki w punktach innych niż oczekiwane lub też zaników głębinowych do otaczających formacji.

Zazwyczaj podczas przekraczania rzek przewierć lokalizowane są na terenach nie zagospodarowanych, i takie sytuacje nie przedstawiają poważnego problemu. Jednakże uszkodzenie struktury warstw nadkładu, spiętrzenia i ucieczki płuczki na powierzchnię w terenach zurbanizowanych, nie będą tolerowane zarówno przez właścicieli terenu jak również przez służby ochrony środowiska. Dlatego w przypadku tego typu projektów konieczna jest analiza ciśnień i bieżąca korekta parametrów

technologicznych wiercenia oraz właściwości fizycznych i reologicznych płuczki.

#### **Założenia geotechniczne oraz trajektoria rozpatrywanego przykładu**

W obliczeniach założono typowe warunki wiercenia na terenie Polski. Skały nadkładu to utwory czwartorzędowe, założono dla nich średni gradient ciśnienia górotworu około 1,7 atm/10m. Teren wiercenia jest płaski, a punkty wejścia i wyjścia leżą na tej samej rzędnej wysokościowej. Odległość między punktem wejścia i wyjścia wynosi 500 m, a głębokość przejścia 15 m. Dla większej czytelności obliczeń tor wiercenia został podzielony na trzy odcinki - wewnętrzny poziomy i dwa skrajne nachylone w kierunku punktu wejścia i wyjścia. Parametry płuczki wychodzącej z otworu zostały przyjęte z praktyki polowej. Zestaw przewodu wiertniczego w trakcie wiercenia pilotowego stanowią rury płuczkowe 5" oraz świder 8 $\frac{1}{2}$ ", pominięto ewentualnie występujące obciążniki niemagnetyczne i silnik wgłębny.

W analizowanych przejściach założono wykorzystanie rozwiertaków o rozmiarach 12" i 30". Nie wzięte zostały pod uwagę zmiany prędkości przepływu płuczki wskutek zjawiska tłokowania przez zestaw poszerzający.

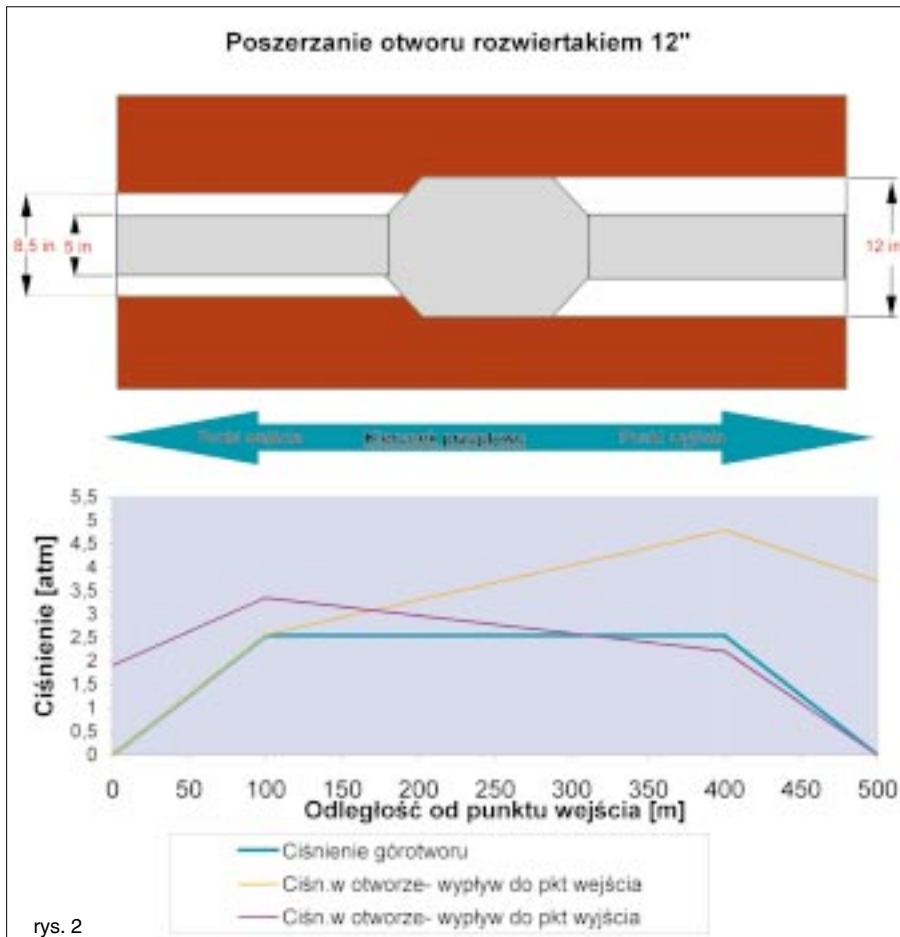
#### **Analiza ciśnień wgłębnych i przepływów płuczki**

Tego typu analizy nie są jeszcze standardowo przeprowadzane w trakcie wykonywania przewierć horyzontalnych. Dla obliczenia ciśnień panujących w otworze konieczne jest uwzględnienie całego obiegu płuczki wiertniczej. Płuczka jest tłoczona przez przewód wiertniczy do dysz narzędzia, a następnie wypływa przestrzenią pierścieniową pomiędzy rurami płuczkowymi a ścianą otworu na powierzchnię terenu. Ciśnienie rejestrowane na manometrze pompy jest sumą strat ciśnienia w armaturze tłoczącej, w przewodzie, dyszach narzę-

dzia oraz przestrzeni pierścieniowej. Ciśnienie w otworze wiertniczym w danym punkcie stanowi sumę ciśnienia potrzebnego do osiągnięcia wymaganego przepływu wzdłuż przestrzeni pierścieniowej do punktu wyjścia i statycznego ciśnienia wywołanego ciężarem słupa płuczki.

W przypadku poziomych otworów istnieją dwie drogi powrotu płuczki od narzędzia wierzącego na powierzchnię. Przepływ przestrzenią pierścieniową może odbywać się do punktu wejścia lub w kierunku przeciwnym do punktu wyjścia. Obliczenia wykonano zakładając, że przepływ będzie kontynuowany w całości drogą wymagającą najmniejszych strat ciśnienia i całkowicie będzie się zmieniać w punkcie, w którym opory przepływu w obydwu kierunkach będą sobie równe. W ten sposób maksymalne ciśnienie w otworze jest osiągane w punkcie, w którym kierunek przepływu ulega zmianie.

W rzeczywistości w przewiercach horyzontalnych nie jest łatwe utrzymywanie stałej cyrkulacji płuczki. Formacje skalne nie są ciągle, na drodze wiercenia możemy natknąć się na warstwy o bardzo wysokiej przepuszczalności, silnie spękane, soczewki lub strukturalne anomalie, które mogą powodować opory przepływu mniejsze niż w przestrzeni pierścieniowej poza rurami płuczkowymi. Urobek wiertniczy może akumulować się w dolnej części otworu formując przeszkody. Wówczas ciśnienie będzie wzrastać dopóki przeszkoda nie zostanie usunięta lub nie ustali się inny tor przepływu na powierzchnię. Podobnie będzie się działo wówczas, jeżeli parametry płuczki wiertniczej są dobrane nieprawidłowo i wskutek obciążenia urobkiem jej parametry reologiczne ulegną znacznemu wzrostowi. Problem doboru parametrów płuczki i parametrów technicznych wiercenia stanowi dużo szersze zagadnienie. Proces wiercenia jest dynamiczny i chwilowe ciśnienie w otworze może wzrosnąć np. kiedy przewiercane są trudne pokła-



< 2000 stwierdzono istnienie przepływu laminarnego.

Wobec powyższego skorzystano z formuł dla modelu reologicznego Bingham’a (równanie 2).

Obliczenia wykonane zostały dla różnych faz przewiertu horyzontalnego. Formacje geologiczne są rozpatrywane jako będące pod nadciśnieniem od momentu, kiedy obliczone ciśnienie płuczki przekroczyło ciśnienie górotworu.

Ciśnienie górotworu w rozpatrywanym zagadnieniu wzrasta wraz z głębokością średnio o 0,17 atm/m. Rezultaty obliczeń zostały omówione poniżej, charakterystyki przepływów przedstawione graficznie na rysunkach 1-3.

**Kierunkowe wiercenie pilotowe (rys. 1)**

Na wykresie kolorem czerwonym zostało przedstawione ciśnienie w otworze dla płuczki czystej nieobciążonej o parametrach reologicznych:  $\mu_p = 8 \text{ mPas}$ ,  $\tau_0 = 12 \text{ Pa}$ .

Kolorem żółtym zaznaczono ciśnienie płuczki dla rozpatrywanego przypadku.

Wierząc otwór pilotowy cały przepływ jest skierowany przestrzenią pierścieniową do punktu wejścia. Ciśnienie nadkładu w zasadzie zostaje przekroczone od samego początku wiercenia, całkowite rozejsście wykresów ma miejsce w przybliżeniu w odległości około 100 metrów od punktu wejścia i jest to kontynuowane do końca wierconego

dy. W tym przypadku nadmiar ciśnienia jest szybko rozładowywany przez minimalny przepływ do otaczających skał.

Założono, że warstwy przewiercane zawierają dużą ilość bardzo drobnej frakcji oraz pewną część fazy ilastej jak typowe zapiaszczone gliny, w związku z tym płuczka wychodząca z otworu wskutek obciążenia urobkiem będzie miała gęstość  $\rho = 1,23 \text{ kg/l}$ , parametry reologiczne od-

powiednio: lepkość plastyczna  $\mu_p = 15 \text{ mPas}$ , granica płynięcia  $\tau_0 = 18 \text{ Pa}$ , wydatek pompy płuczkowej przyjęto na poziomie 500 l/min.

Metoda użyta do kalkulacji strat ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej zapożyczona została z wiertnictwa naftowego.

Po obliczeniu granicznej prędkości przepływu w przestrzeni pierścieniowej według równania 1 i określeniu uogólnionej liczby Reynoldsa Re

równanie 1

$$V_c = \frac{3,04}{(D_o - D_i) \cdot \rho} \left( \mu_p + \sqrt{\mu_p^2 + 83,61 \cdot \tau_0 \cdot (D_o - D_i)^2 \cdot \rho} \right)$$

równanie 2

$$p = \frac{L \cdot Q \cdot \mu_p}{408,63 \cdot (D_o + D_i) \cdot (D_o - D_i)^3} + \frac{\tau_0 \cdot L}{6,35 \cdot (D_o - D_i)}$$

$V_c$  - Prędkość krytyczna w przestrzeni pierścieniowej [m/ min]  
 $Q$  - Strumień objętości [l/min]  
 $p$  - Strata ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej [kPa]  
 $L$  - Długość otworu od narzędzia do powierzchni terenu [m]  
 $D_o$  - Średnica otworu [in]  
 $D_i$  - Średnica zewnętrzna żerdzi lub obciążników [in]  
 $\mu_p$  - Lepkość plastyczna [mPas]  
 $\tau_0$  - Granica płynięcia [Pa]  
 $\rho$  - Gęstość płuczki [kg/l]

profilu.

**Poszerzanie otworu rozwiertakiem 12" (rys. 2)**

Podczas poszerzania dochodziemy do punktu, w którym ciśnienie wymagane dla powrotu płuczki do punktu wyjścia jest równe ciśnieniu wymaganemu dla pokonania oporów przepływu do punktu wejścia. Przepływ do punktu wyjścia następuje przestrzenią pierścieniową, pomiędzy 12" rozwiertanym otworem i 5" rurami płuczkowymi (wykres czerwony). Przepływ do punktu wejścia przestrzenią pierścieniową pomiędzy 8 1/2" otworem pilotowym i 5" rurami płuczkowymi zaznaczono na wykresie kolorem żółtym.

Wykresy ciśnień w otworze przecinają się w odległości około 170 m od punktu wejścia i w tym punkcie ciśnienie osiąga wartość maksymalną około 3,1 atm. Ciśnienie górotworu zostało przekroczone na 220 m długości profilu. W praktyce zanik cyrkulacji nastąpiłby w odległości 180 m od punktu wyjścia, natomiast płuczka powróciłaby w odległości kilkunastu metrów od punktu wejścia.

**Poszerzanie otworu rozwiertakiem 30" z jednoczesnym wciąganiem rury 20" (rys. 3)**

Podczas poszerzania otworu dochodzimy do punktu, w którym ciśnienie wymagane do powrotu płuczki do punktu wyjścia jest równe ciśnieniu wymaganemu do wywołania przepływu płuczki w kierunku punktu wejścia. Przepływ do punktu wyjścia następuje przestrzenią pierścieniową pomiędzy 30" rozwiertanym otworem i 20" wciągana kolumną układanego rurociągu, co pokazuje kolor czerwony. Przepływ do punktu wejścia przestrzenią pierścieniową pomiędzy 20" poszerzonym wcześniej otworem i 5" rurami płuczkowymi przedstawiono na wykresie kolorem żółtym.

Wykresy ciśnień w otworze

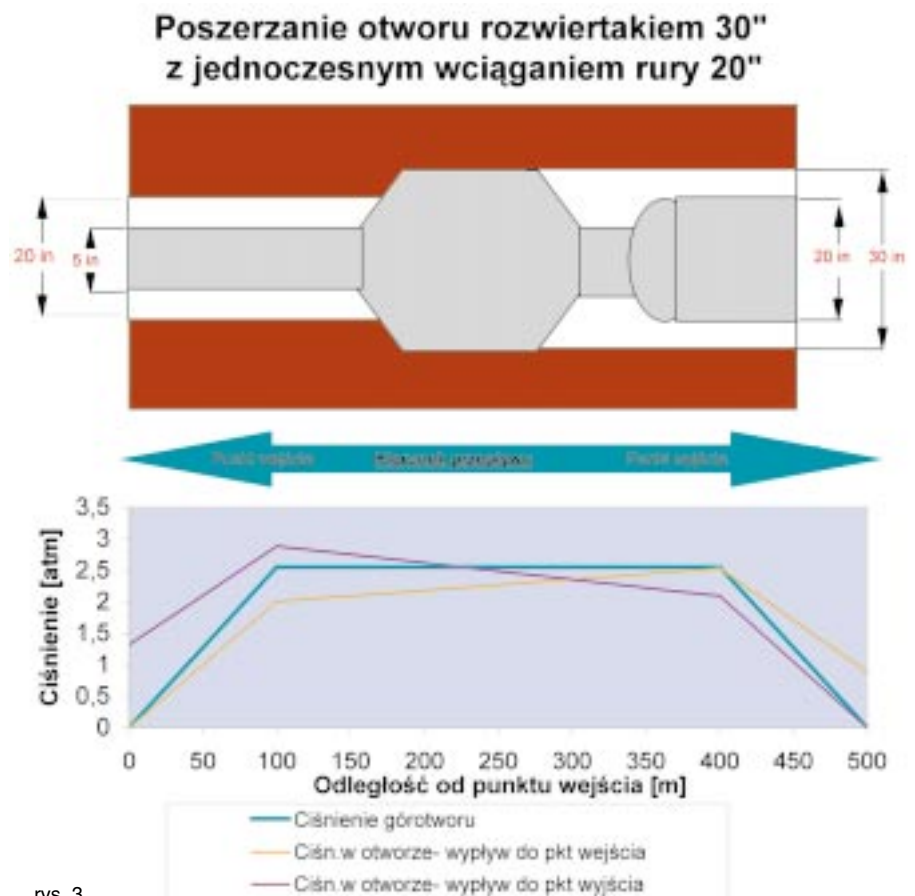
przecinają się w odległości 300 m od punktu wejścia i w tym punkcie ciśnienie osiąga wartość maksymalną około 2,3 atm. Od tego punktu powrót płuczki będzie następował do punktu wejścia. Ciśnienie górotworu nie zostało przekroczone na całej długości profilu.

**Podsumowanie i zalecenia**

Opracowanie to przybliża metody obliczeniowe stosowane w otworach naftowych do zastosowań w horyzontalnych przewiertach sterowanych. Z tej uproszczonej analizy wynika, że na terenach zabudowanych w przypadku projektowania trajektorii i długości odcinków przewiertów horyzontalnych należy wykonać szczegółowe geologiczne badania podłoża dla określenia ciśnienia górotworu oraz wychwytnia ewentualnych nieciągłości struktur. Następnym krokiem jest takie dobranie głębokości położenia instalacji, parametrów kolejnych po-

szerzeń, aby nadwyżka ciśnienia górotworu zapewniała bezpieczne prowadzenie prac. Wbrew pozorom zwiększenie głębokości przejścia nie podniesie w znaczący sposób kosztów robót wiertniczych. W Polsce obowiązujące Prawo Górnicze i Geologiczne dopuszcza wiercenie bez zatwierdzonego Planu Ruchu do głębokości 30 m.

Ze względu na formalności prawdopodobnie będzie to maksymalna uwzględniana głębokość profilu. W Stanach Zjednoczonych Ameryki znane są projekty instalacji rurociągów gazowych o średnicy 20" w terenie o zwartej zabudowie, gdzie głębokość przejścia wynosiła 42 m, a długość ponad 1100 m. W terenie zabudowanym instalowanie nawet wielkośrednicowych rurociągów przy pomocy przewiertów sterowanych stanowi uzasadnioną ekonomicznie alternatywę wobec technik tradycyjnych. Parametry użyte w trakcie analizy w dużej części za-



rys. 3

łożone teoretycznie. W warunkach polowych poparcie zdefiniowanych tutaj wielkości aktualnymi pomiarami pozwoli na bieżącą korektę parametrów wiercenia. Niezbędne jest określenie wydatku płuczki zarówno tłoczonyj do otworu jak i z niego wypływającej, parametrów reologicznych oraz ciężaru właściwego płuczki. Te wartości skorelowane z parametrami wiercenia takimi jak postęp, ciśnienie pompy płuczkowej, geometria otworu, konfiguracja zestawu wierzącego oraz warunkami geologicznymi i geotechnicznymi pozwoli na zminimalizowanie ryzyka ponoszonego przez wykonawcę.

#### Literatura:

1. Gilles Gabolde, Jean-Paul Nguyen: Drilling Data Handbook, Institut Francais du Petrole, Houston, Texas 1991.
2. Drilling Fluids Engineering Manual, M-I Drilling Fluids Co., Houston, Texas 1991,
3. John D. Hair: Analysis of subsurface pressures involved with directionally controlled horizontal drilling, Manual of Practice, ASCE, Oklahoma 1994.



Jacek Jaworski mgr inż

Absolwent Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalizuje się w płynach wiertniczych. Od 1997 r. współpracuje z firmą HEADS POLSKA.