

Robert Rado*, Jan Lubaś**

OPTYMALIZACJA PROCESU WIERCENIA NARZĘDZIAMI PDC O ŚREDNICY 8 ½"***

1. WSTĘP

Dla optymalizacji procesu wiercenia bardzo ważnym czynnikiem jest prawidłowy dobór narzędzi w zależności od przewierczanych warstw. Stosunkowo prostym działaniem wydaje się dobór narzędzia w przypadku, gdy do przewiercenia mamy jednorodną warstwę o dużej miąższości. Znacznie trudniejszym okazuje się wybór, gdy przewiercamy kompleks warstw o różnej miąższości, składzie litologicznym, czyli o różnej zwiercalności. W takim przypadku należy zastanowić się, w jaki sposób prowadzić wiercenie? Czy w czasie wiercenia należy:

- zastosować kilka narzędzi wiertniczych i zmieniać je w zależności od przewiercanej warstwy,
- zastosować jedno narzędzie i w zależności od warunków wiercenia (zmiennosć przewierczanych warstw) dobierać dla niego optymalne parametry technologii wiercenia.

Pierwszy przypadek generuje w trakcie wiercenia dużą ilość operacji dźwigowych związanych z wymianą narzędzi, co w konsekwencji znacznie wydłuża proces wiercenia otworu i ostatecznie wpływa ujemnie na uzyskiwane wskaźniki wiercenia. Ma to szczególne znaczenie w otworach głębokich, gdzie udział czasu operacji dźwigowych w stosunku do czasu wiercenia jest znaczny.

Przyjęcie drugiego wariantu powoduje, że w przypadku wykorzystywania jednego „uniwersalnego” narzędzia do przewiercania odmiennych litologicznie warstw niezbędne

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Poszukiwania Nafty i Gazu Kraków Sp. z o.o. 31-503 Kraków ul. Lubicz 25

*** Artykuł wykonano w ramach BW

jest, przy nawiercaniu „nowej” warstwy, optymalizowanie parametrów wiercenia. Niejednokrotnie dostosowanie mechanicznych parametrów wiercenia wymaga wykonania w warunkach polowych testu zwiercalności. Zdarza się również, że podjęte działania nie przynoszą spodziewanych rezultatów i w konsekwencji dochodzi do wymiany narzędzia wiertniczego.

W poniższym artykule autorzy skupili się na przypadku, w którym to w jednym marszu świdrem PDC o średnicy 8 ½" przewiercono interwał o długości 788 m w warstwach, które nie były na całej długości wiercenia jednorodne litologicznie, przy czym zmienność litologiczna była w przedziale od kilku do kilkudziesięciu metrów. Prace wiertnicze prowadzono w miocenie autochtonicznych – sarmacie na Przedgórzu Karpat.

2. WARUNKI WIERTNICZO-GEOLOGICZNE ORAZ STOSOWANA TECHNOLOGIA WIERCENIA


Tak jak wspomniano we wstępie, do wiercenia użyto świdra typu PDC M519 firmy SMITH o średnicy 8 ½" (0,2032 m). Narzędzie to posiada 5 ostrzy urabiających o rozmiarze 19 mm (rys. 1) oraz 5 otworów płuczkowych. W przypadku wierceń, o których mowa w poniższym artykule, został wyposażony w cztery dysze płuczkowe o średnicy $\phi = 0,01111$ m (14/32") oraz jedną o średnicy $\phi = 0,01429$ m (18/32"). (IADC: M123 ER 2015).



Rys. 1. Świder wiertniczy M519

Wiercenie otworu odbywało się z użyciem silnika węgłowego z systemem MWD, dzięki któremu wspomagano utrzymanie pionowej trajektorii osi otworu w trakcie wiercenia. Zestawienie dolnej części przewodu wiertniczego przedstawiono na rysunku 2.

W przewierconym profilu miocenu autochtonicznego – sarmatu występowały głównie ilowce z przewarstwieniami mułowców i piaskowców o różnej miąższości.

2 Pasy rur grubościennych HWDP 5"	 <p>HWDP x 4</p> <p>DC x 2</p> <p>Jar</p> <p>DC x 6</p> <p>String stabi</p> <p>NMHWDP</p> <p>Pulser Sub</p> <p>NMHWDP w/MWD</p> <p>O. Sub String Stab</p> <p>Dump sub</p> <p>Motor 6 3/4" 4/5 L 7.0 Stg</p> <p>PDC bit</p>
1 Pas obciążników 6 1/2"	
Nożyce hydrauliczne 6 1/2"	
3 Pasy obciążników 6 1/2"	
Stabilizator	
Niemagnetyczna rura grubościenna HWDP 6 1/2"	
Pulsator 6 1/2"	
Niemagnetyczna rura grubościenna HWDP 6 1/2"	
Łącznik orientowany 6 1/2"	
Stabilizator 6 1/2"	
Dump sub 6 1/2"	
Silnik wgłębny 6 3/4", 4/5	
Świder 8 1/2", Smith PDC M519	

Rys. 2. Zestawienie dolnej części przewodu wiertniczego (BHA)

3. ANALIZA WARUNKÓW WIERTNICZO-GEOLOGICZNYCH DLA OKREŚLENIA MATEMATYCZNEGO MODELU WIERCENIA

Skład petrograficzny jak i miąższości przewarstwień w otworze zmieniały się wraz z głębokością, dlatego koniecznym było bieżące korygowanie parametrów technologii wiercenia.

Z uwagi na fakt, że prace wiertnicze na tej strukturze wykonywane były od dłuższego czasu, wstępne ustalenie parametrów wiercenia nie stanowiło poważniejszego problemu.

Nie wiadomo natomiast, czy były one optymalnymi parametrami, ponieważ w takich sytuacjach niezbędne jest przeprowadzenie procesu optymalizacji z matematycznym ujęciem problemu. W tym przypadku korzystano z polowego testu wiercenia. Ujęcie matematyczne pozwala, w zakresie przyjętych ograniczeń lub uproszczeń, na wyznaczenie optymalnych parametrów. Test polowy umożliwia natomiast wybranie najlepszych parametrów wiercenia, co nie znaczy, że będą one optymalne.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że wyznaczenie modelu wiercenia w sensie matematycznym wiąże się ze spełnieniem kilku warunków. Przede wszystkim wiercenie powinno odbywać się w warstwie o nieziennej litologii i jednorodnej makroskopowo oraz przy prawidłowym doborze narzędzia do przewierczanych warstw. Ponadto literatura [5] opisująca te zagadnienia wymienia dodatkowo warunek stałej wartości nacisku osiowego i prędkości obrotowej podczas wiercenia. Warunek ten w przypadku stosowania dużych nacisków na narzędzia wiernicze jest trudny do spełnienia. W takich przypadkach bezwładność układu wierzącego (hamulec wyciągu, olinowanie, przewód wierniczny) oraz osiowe drgania przewodu wierniczego pomimo użycia stabilizacji wzłużnej, przekładają się na rejestrowane parametry procesu wiercenia. Wiercenia z użyciem wgłębnych silników przyczyniają się dodatkowo do opóźnień w rejestracji rzeczywistych wartości obrotów. Analiza danych przemysłowych wskazuje, że spełnienie niektórych z wymagań jest kłopotliwe, a w warunkach wiercenia przemysłowego nie zawsze w pełni wykonalne. Dlatego autorzy, aby ograniczyć wpływ bezwładności układu wierzącego na końcowy wynik, wybrali do badań nowoczesne narzędzie, które wymaga niedużych nacisków osiowych.

Dla dokonania optymalizacji jakiegokolwiek procesu niezbędna jest jego identyfikacja, czyli jego opis matematyczny. Następnie przy użyciu kryterium optymalizacji przeprowadza się procedurę optymalizacyjną w zakresie decyzji dopuszczalnych, czyli zakresu parametrów sterujących procesem. W przypadku wiernictwa tymi parametrami są mechaniczne i hydrauliczne parametry wiercenia. Wybór kryterium optymalizacji jest teoretycznie prosty, jeśli wiemy, jaki jest cel optymalizacji. W przypadku wiercenia otworów, kryterium tym jest minimalizacja kosztów wiercenia, co zazwyczaj wiąże się z uzyskaniem maksymalnej prędkości wiercenia w danych warunkach geologicznych. Największym problemem przysparza opis matematyczny procesu. Bez niego przeprowadzenie optymalizacji z matematycznego punktu widzenia jest niemożliwe.

Procesu wiercenia zależy od wielu czynników bardzo często trudnych do zdefiniowania i matematycznego opisanie. Przyjmuje się zazwyczaj, że sterowalnymi parametrami wejściowymi wiercenia otworu są: nacisk osiowy na narzędzie wiernicze, jego prędkość obrotowa, strumień objętości i ciśnienie tłoczonej płuczki wierniczej. Nie wyczerpują one jednak listy parametrów wejściowych, które mają wpływ na proces wiercenia, czyli przewiert lub prędkość wiercenia. Wpływ na efektywność wiercenia ma również zestawienie dolnej części przewodu oraz jakość płuczki wierniczej.

Analizę matematyczną procesu zazwyczaj można przeprowadzić po zakończeniu prac i uzyskaniu wszystkich danych wejściowych i wyjściowych. Dane wejściowe rejestrowane są na bieżąco w trakcie wiercenia, natomiast wyjściowe (np. rzeczywisty profil litologiczny) otrzymuje się po zakończeniu prac wierniczych i przeprowadzeniu stosownych badań.

Dlatego też w tym przypadku przyjęto dwuetapową procedurę. Pierwsza zakładała wykonanie kilku polowych testów wiercenia w interwałach wytypowanych na podstawie profilu założonego w PGTO. W drugim etapie zweryfikowano interwały na podstawie opi-

su prób okruchowych z jednoczesną weryfikacją uzyskaną z profilowania geofizycznego otworu.

Interwały dobrano w ten sposób, aby skład zarówno jakościowy jak i ilościowy był identyczny w danym interwale oraz zbliżony w badanych interwałach.

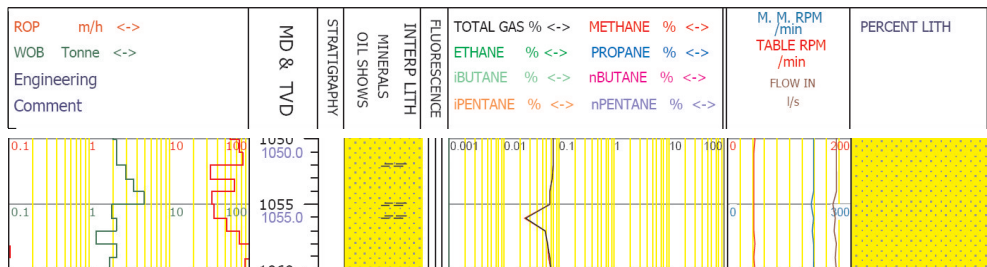
W efekcie przyjętych założeń wytypowano cztery interwały:

- I – 500–560 m, iłowce szare 70%, mułowce szare 30%,
- II – 720–760 m, iłowce szare 80%, mułowce szare 20%,
- III – 910–930 m, iłowce szare 100%,
- IV – 1140–1175 m – iłowce szare 80%, mułowce szare 10%, piaskowce 10%.

3. MATEMATYCZNE MODELE WIERCENIA DLA NARZĘDZI PDC

W matematycznym opisie procesu wiercenia narzędziami PDC najczęściej korzysta się z matematycznych modeli wiercenia stosowanych dla narzędzi skrawających.

Opis matematyczny procesu wiercenia tymi narzędziami jest dość dobrze rozpoznany i przedstawiony w literaturze [8]. Sprowadza się on do wyznaczenia funkcji chwilowej prędkości wiercenia w zależności od czasu pracy narzędzia wiertniczego. Najczęściej przyjmuje się, że funkcja ta ma postać funkcji wykładniczej lub hiperbolicznej rzadziej liniowej. Z matematycznego punktu widzenia stosowane postaci funkcji opierają się na szeregu współczynników uwzględniających oddziaływanie układu narzędzie-skała oraz wpływu nacisku osiowego i prędkości obrotowej narzędzia na prędkość wiercenia. Wyznaczenie tych współczynników jest obwarowane pewnymi wymogami, takimi jak: niezmienność warunków wiercenia, jednorodność skał podczas wiercenia, prawidłowy dobór narzędzia, płuczki a ich identyfikacja odbywa się po przeprowadzeniu chronometraży oraz testów wiercenia. Zastosowanie aparatu matematycznego w postaci statystyki i danych pochodzących z ciągłej rejestracji parametrów wiercenia pozwala na opracowanie modelu wiercenia dla danych warunków przy użyciu konkretnego narzędzia. Możliwość użycia statystyki z jednej strony ułatwia rozwiązanie zadania, z drugiej wymaga uwzględnienia bezwładności zarówno układu przeniesienia momentu obrotowego na narzędzie wiertnicze, jak i układu popuszczania przewodu, i skorelowania ich z głębokością przewierczanych warstw oraz ich petrografią. Wystarczy prześledzić zapis podstawowych parametrów wiercenia uzyskiwanych z aparatury kontrolno pomiarowej (rys. 3), aby zauważyć jak znaczne mogą być wahania parametrów w niewielkich przedziałach głębokości.



Rys. 3. Zapis parametrów wiercenia z aparatury kontrolno-pomiarowej zainstalowanej na wiertnicy

Aparatura kontrolno-pomiarowa zazwyczaj rejestruje parametry wiercenia co 0,05 m lub 0,25 m. Jak wynika z analiz przeprowadzonych przez autorów najbardziej przydatny z punktu widzenia obróbki statystycznej jest przedział – co 0,5 m lub 1 m. Na dane uzyskiwane z rejestracji, co 0,05 m i 0,25 m, duży wpływ mają bezwładność układu popuszczania przewodu oraz opóźnienia w przenoszeniu momentu obrotowego na narzędzie wiertnicze. W przypadku większych przedziałów czynniki te również mają wpływ na wyniki, ale w ujęciu statystycznym zakłócają je w mniejszym stopniu.

Utrzymanie podstawowych parametrów wiercenia na stałym poziomie jest trudne, a czasem niemożliwe. Dlatego też wyznaczenie współczynników oraz matematycznego opisu wiercenia w takich przypadkach opiera się na parametrycznych metodach statystycznego wyznaczania współczynników równań nieliniowych. Ma to szczególne znaczenie podczas wiercenia długimi marszami po kilkaset metrów, w których zmieniają się przewiercane utwory i występują przewarstwienia.

4. MATEMATYCZNE MODELE WIERCENIA NARZĘDZIAMI WIERTNICZYMI

Zadaniem, jakie postawili sobie autorzy, było wyznaczenie matematycznego modelu, który najlepiej opisuje proces wiercenia narzędzia typu PDC w utworach miocenu oraz zbadanie czy istnieje statystyczna różnica w wartościach współczynników modelu dla warstw zbliżonych pod względem składu mineralogicznego niemniej różniących się pod względem udziału procentowego różnych minerałów.

Do analiz zastosowano procedury wbudowane w programie statystycznym Statistica [10], związane z testowaniem hipotez braku różnicy pomiędzy średnimi oraz estymację modeli nieliniowych w oparciu o znane matematyczne modele procesu wiercenia.

Modele opisujące pracę narzędzi skrawających są modelami jakościowo-ilościowymi uwzględniającymi kilka współczynników biorących pod uwagę efektywność urabiania dna otworu przez narzędzie i jego zużycie. Ich prawidłowe oszacowanie dla danego typu narzędzia wiertniczego i przewiercanej warstwy ma wpływ na adekwatność modelu teoretycznego w stosunku do rzeczywistego charakteru pracy narzędzia. To z kolei łatwo przełożyć na taki dobór podstawowych parametrów wiercenia, które spowodują wzrost wartości wskaźników efektywności wiercenia (np. obniżanie się kosztu wiercenia 1 m otworu, powiększenie udziału czasu wiercenia w stosunku do innych prac wiertniczych).

Matematyczne modele pracy narzędzi skrawających opisują dwa efekty ich pracy, tj.: efekt urabiania skały oraz efekt zużycia narzędzia. W przypadku narzędzi PDC, których trwałość jest znaczna i osiągają one przewierci do kilkuset metrów, przyjmuje się modele ze stałą prędkością wiercenia, dla których nie uwzględnia się zużycia narzędzia.

Poprzednie badania autorów wskazywały [11], że wpływ zużycia narzędzia na spadek prędkości wiercenia dla wierceń w skałach średnio twardych był statystycznie nieistotny, czyli nie udało się przyjąć hipotezy o wpływie zużycia narzędzia na chwilową prędkość wiercenia (dla przyjętego poziomu istotności) wobec hipotezy alternatywnej, czyli jego braku. W przypadku długich marszy nawet rzędu kilkuset metrów w skałach osadowych typu iły, muły, iłolupki wpływ zużycia narzędzia jest statystycznie nieistotny z punktu widzenia osiąganych postępów, a uzyskane różnice mieszczą się w przedziale błędów statystycznego. Natomiast w przypadku krótkich marszy lub badań prowadzonych na krótkich

odcinkach wiercenia praktycznie nie dochodzi do zużycia narzędzia, które miałyby istotny wpływ na osiągnięte wskaźniki.

Dlatego w badaniach przemysłowych dla wiercenia narzędziami PDC, zwłaszcza świdrami w warstwach osadowych typu ility, muły, mułowce, iłowce, itp. najlepsze dopasowanie otrzymuje się dla modelu, który nie uwzględnia zużycia.

Matematyczny model procesu wiercenia otworu narzędziami skrawającymi jest najczęściej opisywany chwilową prędkością wiercenia w jednej z trzech postaci [3, 11]:

$$V = (V_0)^{-bt}; \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

$$V = V_0 \cdot (e^{-at}); \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

$$V = \frac{V_0}{1 + mt}; \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

gdzie:

- V – chwilowa prędkość wiercenia; m/s,
- V_0 – początkowa prędkość wiercenia; m/s,
- b, a, m – współczynniki spadku prędkości wiercenia,
- t – czas wiercenia; s.

Jeśli przyjmiemy założenie o minimalnym wpływie zużycia narzędzia na prędkość wiercenia wówczas podstawowe modele procesu wiercenia sprowadzają się do postaci: $V = V_0$.

Na początkową prędkość wiercenia V_0 wpływ mają mechaniczne parametry wiercenia, czyli nacisk osiowy na narzędzie i jego prędkość obrotowa oraz fizycznomechaniczne własności zwiercanych skał i oddziaływanie układu narzędzie-przewiercana warstwa. Dlatego najczęściej początkowa prędkość wiercenia V_0 opisywana jest wzorami uwzględniającymi tzw. współczynnik zwiercalności charakteryzujący oddziaływanie układu narzędzie-przewiercana warstwa oraz wpływu nacisku osiowego i obrotów [5]:

$$V_0 = Z \cdot P^k \cdot n^r; \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

$$V_0 = Z \cdot P \cdot n^\alpha; \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

$$V_0 = A \cdot P^\beta; \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

gdzie:

- Z – współczynnik zwiercalności,
- P – nacisk osiowy na świder; N,
- n – prędkość obrotowa świdra; 1/s,
- k, β – współczynniki wpływu nacisku osiowego na początkową prędkość wiercenia,
- r, α – współczynniki wpływu prędkości obrotowej na początkową prędkość wiercenia.

Uwzględniając $V = V_0$ otrzymujemy odpowiednio dla wzorów (4), (5) i (6):

$$V = Z \cdot P^k \cdot n^r \quad (7)$$

$$V = Z \cdot P^k \cdot n^\alpha \quad (8)$$

$$V = A \cdot P^\beta \quad (9)$$

W przypadku narzędzi PDC, dla których obserwuje się postępy rzędu kilkudziesięciu i więcej metrów na godzinę, nie bez znaczenia jest uwzględnienie wpływu oczyszczania dna otworu na prędkość wiercenia. W badanym przypadku i stosowanych naciskach rzędu 10 kN (1 T) uzyskiwano postępy rzędu kilkunastu m/h, a przy zwiększeniu nacisku do 20 kN (2 T) osiągnano nawet kilkadziesiąt m/h. Dalszy wzrost nacisku był niecelowy i zupełnie nieefektywny z powodu trudności z oczyszczaniem otworu oraz koniecznością ponownego przerabiania i płukania w związku z generowaniem dużych ilości urobku. Dlatego klasyczne modele opisujące pracę tych narzędzi uzupełnia się o czynnik wpływu oczyszczania dna otworu poprzez uwzględnienie mocy hydraulicznej świdra PDC lub wpływu strumienia nateżenia przepływu płuczki w dyszach świdra. Wówczas modele przybiorą postać:

$$V = Z \cdot P^k \cdot n^r \cdot N_j^c; \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

$$V = Z \cdot P^k \cdot n^r \cdot \left(\frac{Q}{d_e} \right)^d; \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

gdzie:

- N_j – jednostkowa moc w dyszach narzędzia; W/m^2 ,
- Q – strumień objętości tłoczzonej płuczki; m^3/s ,
- d_e – średnica ekwiwalentna dysz świdra; m,
- c, d – współczynniki wpływu hydrauliki na dnie otworu na prędkość wiercenia.

Jak już wspomniano – podstawowym problemem optymalizacji jest prawidłowy opis matematyczny optymalizowanego procesu. Natomiast samo rozwiązanie zadania optymalizacji polega na przeprowadzeniu badania monotoniczności funkcji celu. W praktyce polega to na wyznaczeniu ekstremum funkcji celu (o ile takie istnieje). W wiertnictwie za kryteria optymalizacji przyjmuje się np.: marszową prędkość wiercenia (12) lub koszt wiercenia 1 m otworu (13). Pierwsze z kryteriów jest kryterium typu maksimum, dla którego poszukuje się maksimum funkcji, drugie z kryteriów należy do typu minimum i poszukuje się minimum tej funkcji.

$$V_m = \frac{H}{(T + T_{zw})}; \quad [\text{m/s}] \quad (12)$$

$$K = \frac{(T + T_{zw}) \cdot Q + q}{H}; \quad [\text{zł/s}] \quad (13)$$

gdzie:

H – przewiert narzędzia w marszu; m,

T – czas wiercenia; s

T_{zw} – czas zapuszczania i wyciągania przewodu; s,

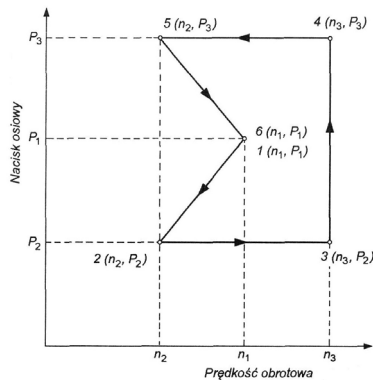
Q – koszt eksploatacji wiertnicy; zł/s,

Q – cena narzędzia wiertniczego; zł.

Wiedząc, że $H = \int_0^T V \cdot dt$ oraz znając postać chwilowej prędkości wiercenia, która może być opisana jednym ze wzorów (1)÷(3) lub (7)÷(11) po odpowiednich przekształceniach uzyskuje się optymalne parametry nacisku i obrotów (P_o i n_o), dla których funkcja celu (kryterium optymalizacji) osiąga ekstremum (minimum lub maksimum).

5. MATEMATYCZNY MODEL WIERCENIA DLA ŚWIDRA PDC M519

Do wyznaczenia matematycznego modelu pracy świdra PDC M519 użyto wstępnie testu wiercenia według schematu przedstawionego na rysunku 4. W trakcie jego trwania mierzono czas wiercenia odcinka o długości 1 m lub 2 m.



Rys. 4. Schemat polowego testu wiercenia z sześcioma punktami pomiarowymi

Wstępne opracowanie wyników nie dało zadowalających rezultatów w trzech z czterech zakresów pomiarowych. Interwały do przeprowadzenia testu wytypowano na podstawie PGTO. Jak wykazały badania geofizyczne wykonane po zakończeniu wiercenia, przekrój litologiczny przewierczanych warstw był niejednorodny. Po dokonaniu konfrontacji zakresu głębokościowego testu wiercenia z rzeczywistym profilem geologicznym okazało się, że uzyskane wyniki nie były reprezentatywne z uwagi na wykonanie testów w takich przedziałach głębokości, w których profil charakteryzował się znaczną zmiennością i niejednorodnością składu mineralogicznego.

Posiadając powyższą wiedzę do wyznaczenia modelu, użyto danych pochodzących z aparatury kontrolno-pomiarowej zainstalowanej na wiertni. Aby wyeliminować ewen-

tualny wpływ przewarstwień o małej miąższości oraz stref zmiany profilu litologicznego na model wiercenia, przeanalizowano zapis profilowania geofizycznego wykonanego w otworze, korelując go z opisem prób okruchowych. Porównując dane z sondowania gamma i opisu prób okruchowych pobieranych w sposób ciągły, co 10 m wytypowano cztery interwały, które różniły się udziałem procentowym ilu szarego, mułowca szarego oraz w przypadku jednego z interwałów zawartością piaskowca.

Badania przeprowadzono z użyciem dwóch skali pomiarowych, co 0,25 m i 1 m. Jak wspomniano na wstępie, zapis parametrów wiercenia, co 0,25 m, był bardzo czuły na inercję układu oraz pracę wiertacza. Na wykresie bez problemu udawało się wychwycić moment popuszczania hamulca a następnie krótkotrwały wzrost zapisu nacisku osiowego o 40–50% w stosunku do przeciętnego równoczesny spadek obrotów z jednoczesnym dużym wzrostem prędkości wiercenia. Po czym wartość nacisku spadała do wartości ustalonych technologią wiercenia z jednoczesną stabilizacją obrotów oraz prędkości wiercenia. Analiza statystyczna takich danych wejściowych powodowała, że matematyczny model wiercenia wykazywał wzrost prędkości wiercenia wraz ze wzrostem nacisku oraz spadkiem prędkości obrotowej narzędzia, co jest trudno wytłumaczalne zwłaszcza przy niskich naciskach osiowych (maks. 20 kN) oraz prędkościach obrotowych rzędu 4–5,5 1/s (240–330 obr./min). Powodem, dla którego otrzymano taki wynik, była najprawdopodobniej krótkotrwała bezwładność zestawu wierzącego w trakcie popuszczania przewodu i niewłaściwy zapis danych. Następnie zapis parametrów wiercenia wracał do wartości, jakie wynikały z założeń technologii wiercenia.

Tu pojawia się pytanie – czy należy uwzględniać cały proces wiercenia włączając w to czynnik ludzki, czy też pomijać z analiz tego typu zaburzenia? Z punktu widzenia badania i rozpoznania samego procesu fizycznego oraz budowania jego opisu matematycznego należałoby wyeliminować te czynniki, które zakłócają parametry procesu. Z drugiej jednak strony proces wiercenia opiera się na osprzęcie o dużych masach i określonej bezwładności. Ponadto dochodzi czynnik ludzki, czego nie możemy pominąć w warunkach przemysłowych. W przypadku optymalizacji procesu najczęściej korzystamy z funkcji celu, które bazują na przemysłowych wskaźnikach (kryteriach) wiercenia. W takich przypadkach np. czynnik ludzki jest jego integralną częścią składową. Z powyższych rozważań wynika, że wyznaczone optymalne parametry wiercenia (np. nacisk osiowy i prędkość obrotowa) będą się różniły dla obydwu tych przypadków. Po pierwsze może być to spowodowane różną postacią funkcji opisujących te dwa przypadki, po drugie, jeśli nawet opis matematyczny będzie identyczny, co do postaci funkcji to współczynniki najprawdopodobniej będą się różniły. Opracowanie modelu w ogólnym ujęciu musiałyby się odbyć z użyciem dużej liczby danych pochodzących z otworów o podobnym profilu litologicznym, średnicy wiercenia, zestawie BHA, typie narzędzia, etc.

Ostatecznie autorzy zdecydowali się wziąć pod uwagę dane „niezakłócone” i wyeliminowali te, które ewidentnie odbiegały wartościami od pozostałych. Dodatkowo zawężono badane interwały w stosunku do pierwotnie założonych tak, aby można było wyeliminować wpływ zmian litologicznych w przewiercanym profilu.

Po przeanalizowaniu danych statystycznych z przewierczanych interwałów okazało się, że wpływ zużycia narzędzi PDC na postać funkcji prędkości wiercenia miał statystycznie niezauważalny wpływ. W tym przypadku testowano hipotezę, H_0 , że współczynnik spadku prędkości wiercenia jest różny od zera ($a \neq 0$; $b \neq 0$) wobec alternatywnej H_1 , że współczynnik ten jest równy zero ($a = 0$; $b = 0$). Na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ należało odrzucić hipotezę zerową H_0 na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 . Choć nie udało się przyjąć założonej hipotezy, to z punktu widzenia statystyki nie jest to równoznaczne z przyjęciem hipotezy alternatywnej, czyli braku wpływu zużycia narzędzia na prędkość wiercenia. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, że przewiert uzyskany omawianym narzędziem w tym otworze wyniósł 788 m, co dla narzędzia PDC wierzącego w średnio twardych warstwach osadowych nie jest zbyt dużym przewierciem. Narzędzia te w takich warunkach wiercenia osiągają przewierthy rzędu 3000 m. W przypadku analizowanego otworu jest to ok. 25% ich żywotności. Po wyciągnięciu narzędzia z otworu nie stwierdzono żadnych uszkodzeń ostrzy PDC oraz objawów zużycia.

Najlepiej dopasowanym modelem do wszystkich przewierczanych warstw okazał się model w postaci (7) $V = Z \times P^a \times n^b$. W większości analiz uzyskiwano wyjaśnienie dla $R = 89,8\%$ do $R = 95,3\%$ przypadków. Do badań użyto również postaci funkcji opisanej wzorami (10) i (11). Niestety nie uzyskano lepszego dopasowania funkcji teoretycznej do danych rzeczywistych. Podczas połowego testu wiercenia jak i podczas przewiercania całego interwału strumień objętości tłoczenia płuczki był praktycznie niezmienny i wynosił ok. $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ (30 l/s) a ponadto utrzymywano stałą moc hydrauliczną w dyszach świdra. Najprawdopodobniej dlatego nie udało się potwierdzić istnienia takiego wpływu.

W następnym etapie autorzy skupili się na wyznaczeniu wartości współczynników funkcji opisującej prędkość wiercenia narzędziami PDC $8\frac{1}{2}$ " z jednoczesnym testowaniem hipotezy o statystycznie istotnej różnicy wartości współczynników dla poszczególnych badanych interwałów. Postawili więc pytanie, czy różny procentowy udział skał ilastych ma wpływ na funkcję opisującą prędkość wiercenia oraz, czy istnieje statystyczna istotna różnica w wartości współczynników w funkcji głębokości dla interwału I i III.

Jeśli chodzi o powyższe hipotezy, to w przypadku pierwszej, dla interwału IV (z zawartością piaskowca) zanotowano różnicę wartości współczynników i udało się udowodnić, że różnica ta jest statystycznie istotna. Wszystkie hipotezy testowano na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

W wyniku analiz ustalono, że nie ma statystycznie istotnych różnic w wartościach współczynników funkcji (7) przy różnym procentowym udziale poszczególnych minerałów ilastych sprawdzono więc czy istnieją takowe różnice, jeśli porównać głębokość zalegania warstwy. W tym przypadku również nie udało się udowodnić, że taka różnica istnieje (testując hipotezę H_0) że różnica wartości współczynników jest różna od zera ($k_1 - k_2 \neq 0$; $r_1 - r_2 \neq 0$) wobec alternatywnej, H_1 , że jest równa zero ($k_1 - k_2 = 0$; $r_1 - r_2 = 0$). Na przyjętym poziomie istotności należało odrzucić hipotezę zerową H_0 o na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 .

Ze względu na ograniczoną możliwość prezentacji rozważań statystycznych wyniki analiz zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 1 i 2) Pozostałe analizy skomentowano w tekście i we wnioskach końcowych.

Tabela 1
Zestawienie analiz statystycznych dla chwilowych prędkości wiercenia świdrami PDC 8½"

Postać funkcji	Przewiercany interwał	Głębokość zalegania [m]	Estymowana wartość współczynników			Odchylenie standardowe			R
			Z_s	k	r	Z_s	k	r	
$V = V_0 = Z_s \cdot P^k \cdot n^r$	I	500–560	$3,27 \cdot 10^{-8}$	0,745	0,962	$0,131 \cdot 10^{-10}$	0,0390	0,042	0,9307
$V = V_0 = Z_s \cdot P^k \cdot n^r$	II	720–760	$3,36 \cdot 10^{-8}$	0,698	0,932	$0,051 \cdot 10^{-10}$	0,0225	0,0103	0,8984
$V = V_0 = Z_s \cdot P^k \cdot n^r$	III	910–930	$3,18 \cdot 10^{-8}$	0,802	0,877	$0,065 \cdot 10^{-10}$	0,0230	0,0034	0,9534
$V = V_0 = Z_s \cdot P^k \cdot n^r$	IV	1140–1175	$8,98 \cdot 10^{-8}$	0,855	0,701	$0,085 \cdot 10^{-9}$	0,0095	0,2110	0,947

Tabela 2
Zestawienie analiz statystycznych dla porównania współczynników modelu dla prędkości wiercenia świdrami PDC 8½"

Porównywany zakres głębokości	Hipoteza H_0	Hipoteza alternatywna H_1	Wniosek statystyczny	
I	II	$k_1 - k_2 \neq 0$	$k_1 - k_2 = 0$	Odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej
		$r_1 - r_2 \neq 0$	$r_1 - r_2 = 0$	Odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej
II	III	$k_2 - k_3 \neq 0$	$k_2 - k_3 = 0$	Odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej
		$r_2 - r_3 \neq 0$	$r_2 - r_3 = 0$	Odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej
I	III	$k_1 - k_3 \neq 0$	$k_1 - k_3 = 0$	Odrzucić hipotezę H_0 na rzecz alternatywnej
		$r_1 - r_3 \neq 0$	$r_1 - r_3 = 0$	Przyjąć hipotezę H_0
I	IV	$k_1 - k_4 \neq 0$	$k_1 - k_4 = 0$	Przyjąć hipotezę H_0
		$r_1 - r_4 \neq 0$	$r_1 - r_4 = 0$	Przyjąć hipotezę H_0

6. WNIOSKI

- 1) W przypadku korzystania z danych zapisanych przez aparaturę kontrolno-pomiarową zainstalowaną na wiertnicy należy weryfikować uzyskane dane pod względem: jej dokładności i kalibracji oraz pracy obsługi.
- 2) Dla opracowania danych najbardziej przydatny jest zapis parametrów wiercenia, co 0,25 m lub 1 m.
- 3) Dla narzędzia PDC M519 wierzącego w warstwach osadowych średniej twardości nie udało się wykazać spadku prędkości wiercenia w funkcji przewiertu.
- 4) Z punktu widzenia statystyki nie można dać jednoznacznej odpowiedzi, że nie istniał wpływ zużycia narzędzi na chwilową prędkość wiercenia.
- 5) Dla świdra wiertniczego PDC M519 prędkość wiercenia przy wierceniu w skałach osadowych średniej twardości najlepiej opisywana jest równaniem ze stałą prędkością wiercenia w postaci $V = Z \cdot P^k \cdot n^r$.
- 6) Uwzględnienie wpływu hydraulicznych parametrów wiercenia nie dało lepszego dopasowania funkcji teoretycznej do danych rzeczywistych. Najprawdopodobniej spowodowane to było niezmiennością ich wartości podczas przewiercania całego interwału, co zaburzyło testowanie odpowiednich hipotez.
- 7) W wyniku analiz ustalono, że nie ma statystycznie istotnych różnic w wartościach współczynników funkcji opisującej prędkość wiercenia przy różnym procentowym udziale poszczególnych minerałów ilastych.
- 8) Zwiększenie zawartości skał o większej twardości powoduje statystycznie zauważalną zmianę współczynników funkcji opisującej prędkość wiercenia.

LITERATURA

- [1] Katalog narzędzi firmy Hughes Christensen Company „Drill Bit Catalog”
- [2] Katalog narzędzi firmy Security DBS
- [3] Gonet A., Zięba A., Pawlikowska J., Wójcik M.: *Technika i technologia rdzeniowania otworów*. Kraków, Wydawnictwo AGH, skrypty uczelniane 1451, 1996
- [4] Gonet A., Rzyczniak M., Stryczek S.: *Zadania do ćwiczeń z wiertnictwa*. Kraków, Wydawnictwo AGH, skrypty uczelniane 1506, 1997
- [5] Gonet A.: *Optymalizacja mechanicznych parametrów technologii wiercenia otworów świdrami skrawającymi*. Przegląd Górniczy nr 5, 1995
- [6] Greń J.: *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*. Warszawa, Wydawnictwo PWN 1999
- [7] Lubaś J., Rado R.: *Porównanie efektywności pracy różnych typów narzędzi wiertniczych*. Materiały IX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej na temat: „Nowe Metody i Technologie w Geologii Naftowej, Wiertnictwie, Inżynierii Złóżowej i Gazownictwie”, Wydawnictwo AGH, Kraków 2–3 lipiec 1998
- [8] Miska S.: *Identyfikacja procesu wiercenia narzędziami skrawającymi*. Archiwum Górnictwa, vol. 2, 1975

- [9] Szostak L., Chrzęszcz W., Wiśniowski R.: *Narzędzia wierzące*. Kraków, Wydawnictwo AGH 1996
- [10] Podręcznik użytkownika pakietu statystycznego „Statystyka”, StatSoft, Kraków, 2005
- [11] Rado R., Lubaś J.: *Próba wyznaczenia modelu wiercenia narzędziami PDC na przykładzie wiercenia w wybranych strukturach geologicznych*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz (półrocznik AGH), t. 24, z. 1, Kraków, 2007