

Robert Rado*, Jan Lubaś**

PRÓBA WYZNACZENIA MODELU WIERCENIA NARZĘDZIAMI PDC NA PRZYKŁADZIE WIERCENIA W WYBRANYCH STRUKTURACH GEOLOGICZNYCH***

1. WSTĘP

Narzędzia wiertnicze z polikrystalicznymi diamentami produkowane przez znanych producentów dają szerokie możliwości ich doboru do warunków wiercenia. Stosowanie tych narzędzi jest efektywne i przyczynia się do zwiększania prędkości wiercenia, a co za tym idzie, do obniżenia kosztów wiercenia. Aby zapewnić narzędziom PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*) wysokie postępy wiercenia i osiąganie znacznych przewiertów, niezbędne jest optymalizowanie mechanicznych i hydraulicznych parametrów wiercenia tymi narzędziami. Dokonanie optymalizacji związane jest przede wszystkim z identyfikacją procesu wiercenia, czyli jego matematycznym opisem dla danego narzędzia w danych warunkach geologicznych. Artykuł podejmuje próbę znalezienia matematycznego modelu wiercenia dla narzędzi PDC w warunkach wiercenia występujących na Przedgórzu Sudeckim.

2. WARUNKI WIERTNICZO-GEOLOGICZNE DLA WYZNACZENIA MODELU WIERCENIA NARZĘDZIAMI PDC

Wyznaczenie matematycznego modelu wiercenia wiąże się ze spełnieniem kilku warunków, aby uzyskany wynik był w pełni wartościowy. Przede wszystkim wiercenia powinno odbywać się w warstwie o niezmienniej litologii i makroskopowo jednorodnych, a dobór narzędzia do przewiercanych skał jest prawidłowy. Ponadto literatura [5] opisująca te zagadnienia wymienia dodatkowo warunek stałej wartości nacisku osiowego i prędkości obrotowej podczas wiercenia. Oczywiście muszą się one wahać w zakresie dopuszczalnych

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

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

*** Pracę wykonano w ramach badań własnych

wartości wynikających z zaleceń producentów narzędzi wiertniczych oraz wytrzymałości dolnej części przewodu wiertniczego (BHA – *bottomhole assembly*) oraz rur płuczkowych. Analizując dane przemysłowe, można stwierdzić że spełnienie niektórych z tych wymagań jest kłopotliwe, a w warunkach wiercenia przemysłowego nie zawsze w pełni wykonalne.

W celu dokonania optymalizacji jakiegokolwiek procesu, niezbędna jest identyfikacja tegoż procesu, czyli jego matematyczny opis. Następnie należy wybrać odpowiednie kryterium optymalizacji i przeprowadzić procedurę optymalizacyjną w zakresie decyzji dopuszczalnych, czyli zakresu parametrów sterujących procesem. Wybór kryterium optymalizacji jest teoretycznie prosty, jeśli wiemy, jaki jest cel optymalizacji. Największych problemów przysparza opis matematyczny procesu. Bez niego przeprowadzenie optymalizacji z matematycznego punktu widzenia nie jest możliwe. Proces wiercenia zależy od wielu czynników, często bardzo trudnych do zdefiniowania i matematycznego opisanie.

Przyjmuje się zazwyczaj, że sterowalnymi parametrami wejściowymi wiercenia otworu są:

- nacisk osiowy na narzędzie wiertnicze,
- jego prędkość obrotowa,
- strumień objętości,
- ciśnienie płuczki wiertniczej.

Powyższe nie wyczerpują listy parametrów wejściowych, które mają wpływ na proces wiercenia, czyli postęp lub prędkość wiercenia. Przy czym są one najczęściej poddawane optymalizacji pod kątem różnych kryteriów optymalizacyjnych.

Techniczny rozwój wiertnictwa wprowadził do użytku narzędzia typu PDC. Rozwój konstrukcji tych narzędzi umożliwił ich stosowanie w różnych warunkach wiercenia. Często przy użyciu jednego narzędzia wykonywane są marsze o długościach powyżej 1000 m, a w trakcie wiercenia przewiercane warstwy o różnym składzie litologicznym.

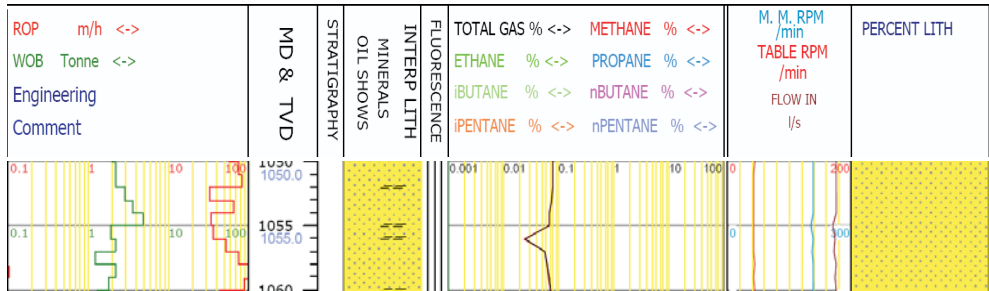
Przy opisie procesu wiercenia tymi narzędziami często korzysta się z matematycznych modeli stosowanych dla narzędzi skrawających. Proces wiercenia narzędziami skrawającymi jest dość dobrze rozpoznany i opisany w literaturze [9].

Zazwyczaj stosowanymi opisami procesu wiercenia jest wyznaczenie chwilowej prędkości wiercenia w funkcji czasu. Najczęściej przyjmuje się, że ma ona postać funkcji wykładniczej lub hiperbolicznej. Z matematycznego punktu widzenia stosowane postaci funkcji opierają się na szeregu współczynników uwzględniających oddziaływanie układ narzędzie – skała, wpływ nacisku osiowego na początkową prędkość wiercenia, współczynniki abrazywności etc. Wyznaczenie tych współczynników jest obwarowane pewnymi wymogami, takimi jak niezmienność warunków wiercenia, jednorodność skał podczas wiercenia, a identyfikacja odbywa się po przeprowadzeniu chronometraży oraz testów wiercenia.

Użycie matematycznych funkcji opisujących proces wiercenia w warunkach przemysłowych wymaga oparcia się na danych przemysłowych i wyznaczenia współczynników, o których wspomniano powyżej, na podstawie rzeczywistych warunków panujących w otworze.

Praca narzędzi PDC na dnie otworu podlega skomplikowanemu procesowi związaneemu z oddziaływaniem różnych czynników. Między innymi wpływ ma nacisk osiowy na narzędzie, prędkość obrotowa, parametry hydrauliczne oraz reologiczne płuczki wiertniczej,

oddziaływanie narzędzia na skałę oraz rodzaj przewierczanych warstw. W trakcie wiercenia rzadko się zdarza, aby wszystkie te parametry utrzymywały się na niezmiennym poziomie. Wystarczy spojrzeć na zapis podstawowych parametrów wiercenia z danych uzyskanych z aparatury kontrolno-pomiarowej (rys. 1). Przykład pokazuje zapis parametrów wiercenia przy przewiercaniu 15-metrowego odcinka piaskowca. Zmiany: prędkości wiercenia (m/s), nacisku osiowego (kN) (zanotowane w pierwszej kolumnie po lewej) oraz prędkości obrotowej (obr./min) i wydajności pomp płuczkowych (dm³/s) (wykres w drugiej kolumnie po prawej stronie), jak pokazuje przykład, są znaczne.



Rys. 1. Zapis parametrów wiercenia z aparatury kontrolno-pomiarowej zainstalowanej na wiertnicy

Utrzymanie podstawowych parametrów wiercenia na stałym poziomie jest trudne, a czasem niemożliwe, nawet podczas wiercenia w warstwach jednorodnych. Dlatego też wyznaczenie współczynników oraz matematycznego opisu wiercenia dla warstw, gdzie zmiany litologii są znaczne i występują przewarstwienia skał o niewielkich miąższościach, w warunkach przemysłowych jest trudne. W takich przypadkach należy korzystać z parametrycznych metod 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.

3. WYTYPOWANIE INTERWAŁÓW W OTWORACH WIERTNICZYCH PRZEZNACZONYCH DO WYZNACZENIA MODELU WIERCENIA NARZĘDZIAMI PDC

Możliwość wyznaczenia współczynników równań matematycznych, bazując na danych przemysłowych, jest krokiem na drodze do ustalenia matematycznego modelu opisującego proces wiercenia narzędziami PDC w warunkach przemysłowych. Zebranie danych dotyczących prac wiertniczych z kilku otworów wierconych, w bardzo bliskiej odległości, na strukturze geologicznej należącej do Przedgórze Sudeckiego, pozwoliło na wyznaczenie, za pomocą metod statystycznych, współczynników niezbędnych do zbudowania modelu wiercenia. Bazując na danych z pięciu otworów wiertniczych, autorzy przeprowadzili stosowną analizę. Przy wyborze danych do analiz, autorzy kierowali się przede wszystkim ich porównywalnością, a do obliczeń wybrano różne interwały tej samej struktury geologicznej, które

były zbliżone pod względem przekroju litologicznego. Wszystkie dane niezbędne do analiz uzyskano z otworów o takiej samej konstrukcji i przy stosowaniu podobnej technologii wiercenia.

Wytypowane do analizy otwory wiertnicze wykonywane były na płaskim terenie w obrębie tej samej struktury geologicznej o następującej budowie geologicznej:

- czwartorzęd i trzeciorzęd do głębokości ok. 260÷280 m,
- jura od głębokości ok. 280 m do 650 m,
- retyk (trias) w przedziale głębokości od ok. 650 m do 950 m,
- kajper (trias) od 950 m do 1250 m,
- piaskowiec pstry (trias) 1250÷2150 m,
- cechsztyń od 2150 m do końcowej planowanej głębokości wiercenia, czyli ok. 2800 m.

Projekt geologiczno-techniczny otworów zakładał następującą konstrukcję otworów.

Pierwszy etap obejmował przewiercenie czwartorzędu. Wiercenie pod kolumnę wstępną rur okładzinowych 20" odbywało się świdrem produkcji polskiej (Glinik – BM1) o średnicy 24". Etap ten kończono na głębokości ok. 30 m.

Etap drugi to przewiercenie jury do głębokości przeciętnie ok. 320 m, świdrem o średnicy 17 $\frac{5}{8}$ ", następnie otwory rurowano rurami 13 $\frac{3}{8}$ " (kolumna przewodnikowa) i cementowano do wierzchu (cdw). Otwory w tej części odwiercono świdrem Glinik – BM1X.

Następny odcinek otworów, wiercono świdrem 12 $\frac{1}{4}$ " i orurowano rurami okładzinowymi 9 $\frac{1}{2}$ " (kolumna techniczna) (cdw). Do wiercenia używano świdrów Glinik BM1ZXC do głębokości ok. 930 m, a następnie zapuszczano świdry PDC: Hughes ATX536HA oraz Security FM2743 do końcowej głębokości wiercenia pod tę kolumnę, czyli ok. 2250 m.

Następnie otwory wiercono świdrem o średnicy 8 $\frac{1}{2}$ " do głębokości ok. 2600 m i rurowano rurami okładzinowymi 7" (cdw). Ten odcinek, poza zwierceniem korka cementowego świdrem gryzowym, wiercono narzędziami PDC firm Hughes BX535 (IADC M123) oraz Security FM2845 (IADC M433).

Ostatni interwał wiercono koronką rdzeniową o średnicy 6" w przedziale głębokości od 2600 m do 2800 m i prawie w całości rdzeniowano. Odcinek ten był przewidziany do zarurowania rurami okładzinowymi 5".

Przewiercane profile nie były jednolite pod względem litologicznym, dlatego wyselekcjonowano te przedziały głębokości, w których wiercenie w skałach jednorodnych odbywało się na długości przynajmniej 25÷30 m. W takich przypadkach pomijano pierwsze i końcowe 2÷3 m wiercenia. Następny zakres badań przewidziano dla interwałów z przewarstwieniami warstw o różnym składzie litologicznym i w tym przypadku wybrano interwały, w których zmiany litologii następowały, co ok. 1,0÷1,5 m. Dane do analiz rejestrowane były co 0,5 m, przeciętnie dawało to od 45 do 150 punktów pomiarowych.

Do badań przyjęto interwały wiercone świdrem o średnicy 12 $\frac{1}{4}$ ". W interwałach tych występowały: wapienie szare, margle, iłowce szare. Stratygraficznie należą one do triasu.

Drugi zakres badań obejmował wiercenie narzędziami o średnicy 8 $\frac{1}{2}$ ". Wiercenie odbywało się w cechszynie o składzie litologicznym: iłowce przejściowe w górnej jego części, natomiast anhydryty i sól kamienna w końcowych głębokościach wiercenia (ok. 2600 m).

4. NARZĘDZIA PDC PRZEZNACZONE DO WYZNACZANIA MODELU WIERCENIA

Narzędzia typu PDC zastosowano po raz pierwszy w 1973 roku, przy czym były one konstrukcyjnie podobne kształtem do świdrów utwardzanych diamentami naturalnymi. Kolejnym etapem rozwoju narzędzi PDC było wprowadzenie narzędzi z ostrzami skrawającymi wykonanymi z płytek z węgliku wolframu z warstwowo wykrystalizowanymi syntetycznymi diamentami. Ostrza te mocowane były w gniazdach stalowego kadłuba. Nowoczesna konstrukcja świdrów PDC składa się z kadłuba matrycowego, odlanego z węgliku wolframu (rzadziej stalowego), do którego przymocowane są ostrza z polikrystalicznych diamentów. Rozmieszczenie ostrzy o kształcie cylindrycznym na matrycy może być segmentowe, żebrowe lub skrzydłowe.

Wyróżnia się trzy podstawowe kształty geometryczne profili roboczych powierzchni kadłubów świdrów:

- 1) płaski lub lekko wygięty,
- 2) stożkowy lub bardzo wygięty (charakteryzuje się bardziej równomiernym rozłożeniem nacisku osiowego na elementy skrawające oraz zapewnia lepszą stabilność pracy),
- 3) paraboliczny (stosowane głównie do wiercenia silnikami w głębinami).

Projekty wiercenia otworów przewidywały, że wiercenie narzędziami PDC prowadzone będzie w przedziale głębokości od ok. 1300 m do ok. 2200 m. W tym interwale wiercono świdrami PDC o średnicy $12 \frac{1}{4}$ ". Następny przedział głębokości, w którym używano pełnoprzekrojowych narzędzi PDC to wiercenie pomiędzy głębokościami 2200 m a 2600 m. Ten przedział głębokości wiercono narzędziami PDC o średnicy $8 \frac{1}{2}$ ". W analizowanych interwałach wiercenia otworów pracowały narzędzia firm Hughes Christensen Co.: serii BX 5xx (rys. 2) i DBS Security (DBS): serii FM 2000 (rys. 3).



Rys. 2. Świder serii BX 5xx firmy Hughes Christensen Co.



Rys. 3. Świder serii FM 2000 firmy Security DBS

5. MATEMATYCZNE MODELE WIERCENIA DLA NARZĘDZI PDC

Zadaniem, jakie postawili sobie autorzy artykułu, było wyznaczenie podstawowych współczynników charakteryzujących spadek chwilowej prędkości wiercenia w różnych typach narzędzi. Realizacja tak postawionego zadania odbywała się za pomocą analizy statystycznej, gdyż dysponowano znaczną liczbą danych. Do przeprowadzenia analiz statystycznych autorzy użyli procedur wbudowanych do pakietów statystycznych Statgraphics i Stastica [6, 7].

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

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

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

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

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].

Najczęściej do opisu przyjmuje się równania (2) oraz (3). Jak wynika z przytoczonych wzorów, podstawą wyznaczenia modelu jest wyznaczenie początkowej prędkości wiercenia V_0 oraz współczynników a oraz m . Na początkową prędkość wiercenia wpływ mają mechaniczne parametry wiercenia, czyli nacisk osiowy na narzędzie i jego prędkość obrotowa oraz fizyczno-mechaniczne własności zwiercanych skał i oddziaływanie układu narzędzie – przewiercana warstwa.

Początkowa prędkość wiercenia V_0 opisywana jest najczęściej wzorami [5]:

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

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

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

gdzie:

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

Modele matematyczne pracy narzędzi skrawających opisują dwa efekty ich pracy, tj.:

- 1) efekt urabiania, skały,
- 2) efekt zużycia świdra.

Dlatego w badaniach przemysłowych przyjmuje się dwa modele wiercenia:

- 1) z malejącą prędkością wiercenia uwzględniającą zużycie narzędzia;
- 2) ze stałą prędkością wiercenia, dla których model nie uwzględnia zużycia, wówczas $V = V_0$.

W przypadku narzędzi PDC, których trwałość oparta jest wyłącznie na trwałości elementów roboczych, ostrzy (brak części ruchomych) i odznaczających się ponadkilkusetmetrowymi przewiertami, można przyjąć, że na krótkich odcinkach wiercenia praktycznie nie dochodzi do zużycia. Dlatego wyznaczenie modelu wiercenia dla tych narzędzi w warunkach przemysłowych na podstawie jednorodnej warstwy bywa trudne, ponieważ uzyskanie danych z długich marszy, podczas których dochodzi do zużycia narzędzia mającego wpływ na zmniejszenie prędkości wiercenia, jest nieczęste.

Również w przypadku omawianych badań, dla modelu o wykładniczej postaci chwilowej prędkości wiercenia (2), autorzy nie zaobserwowali statystycznie istotnych różnic dla parametru a podczas wiercenia w różnych warstwach różnymi narzędziami PDC. Dla kilkunastu przypadków testowano hipotezę H_0 , że współczynnik spadku prędkości wiercenia jest różny od zera ($a \neq 0$), wobec alternatywnej H_1 , że współczynnik ten jest równy zero ($a = 0$). Na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ należało odrzucić hipotezę zerową H_0 na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 [6].

Dlatego dysponując danymi z otworów, w których utwory ilaste, sól kamienna i anhydryt były podstawą przewiercanych interwałów, można stwierdzić, że wpływ zużycia narzędzi PDC na prędkość wiercenia w wytypowanych do badań interwałach wiercenia miał statystycznie niezauważalny wpływ.

Należy jednak zaznaczyć, że choć nie udało się odrzucić założonych hipotez, to z punktu widzenia statystyki nie jest to przyjęciem hipotez alternatywnych, czyli nie można dać jednoznacznej odpowiedzi, że nie istniał wpływ zużycia świrdrów w krótkich marszach.

W rozważaniach nie uwzględniono też wstępnego zużycia używanych świrdrów zapuszczanych do otworu, z powodu trudności z odtworzeniem historii ich pracy.

Autorzy skupili się więc na wyznaczeniu wartości współczynników dla określenia początkowej prędkości wiercenia i tam, gdzie to było możliwe, próbowali wyznaczyć model wiercenia na podstawie wyminienionych powyżej postaci chwilowej prędkości wiercenia dane wzorami (1) i (2).

Niniejszy artykuł jest wskazaniem i wstępem do opracowania metodyki statystycznej analizy danych przemysłowych w konfrontacji z badaniami laboratoryjnymi. Metodyka ta będzie rozwijana i pozwoli na precyzyjne wyznaczenie modeli matematycznych wiercenia dla różnych typów litologicznych skał oraz narzędzi PDC.

Ze względów na ograniczoną możliwość prezentacji rozważań statystycznych, tylko niektóre wyniki analiz zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 1), a pozostałe skomentowano we wnioskach końcowych.

Tabela 1
Zestawienie statystycznych analiz dla wyznaczonych chwilowych prędkości wiercenia świdrami PDC

Postać funkcji	Przewiercana warstwa	Głębokość zalegania [m]	Typ świdra	Estymowana wartość współczynników				Odchylenie standardowe				R
				Z_s	k	r	a lub b	Z_s	k	r	a lub b	
$V = Z^s P^k n^r$	Howce, mulowce margliste	2070÷2145	BX535	$2,19 \cdot 10^{-8}$	0,945	0,562	0	$0,081 \cdot 10^{-9}$	0,0940	0,042	–	0,9837
$V = Z^s P^k n^r - bt$	Wapień mikrytowy	1380÷1405	ATX536	$7,85 \cdot 10^{-9}$	1,737	0,332	$2,156 \cdot 10^{-6}$	$0,15 \cdot 10^{-10}$	0,0670	0,0103	$1,58 \cdot 10^{-9}$	0,964
$V = Z^s P^k n^r - bt$	Piaskowiec	1820÷1845	FM22743	$5,63 \cdot 10^{-10}$	1,990	0,877	$8,195 \cdot 10^{-7}$	$0,353 \cdot 10^{-10}$	0,0030	0,0034	$7,51 \cdot 10^{-9}$	0,9545
$V = V_0 = Z^s P^k n^r$	Sól	2185÷2270	BX535	$8,98 \cdot 10^{-7}$	0,632	0,971	0	$1,85 \cdot 10^{-9}$	0,0043	0,2110	–	0,967
$V = V_0 = Z^s P^k n^r$	Anhydryt	2415÷2480	BX535	$4,56 \cdot 10^{-7}$	0,773	0,663	0	$0,019 \cdot 10^{-8}$	0,1030	0,0670	–	0,898
$V = Z^s P^k n^r e^{(-at)}$	Howce, margle, wapień dolomityczne, piaskowiec drobno-ziarnisty	1725÷1800	FM2845	$4,18 \cdot 10^{-8}$	1,131	0,745	$0,1519 \cdot 10^{-5}$	$0,18 \cdot 10^{-9}$	0,1210	0,1003	$0,11 \cdot 10^{-6}$	0,991

6. WNIOSKI

- 1) Dla niektórych badanych narzędzi wiertniczych typu PDC chwilowa prędkość wiercenia malała wykładniczo wraz z przewiertem dla długich marszy. Dotyczyło to wiercenia w przewarstwieniach o zmiennej twardości.
- 2) W części przypadków liniowa zależność chwilowej prędkości wiercenia dawała lepszy wynik korelacji, wszędzie tam, gdzie wiercono długimi marszami w twardych i jednorodnych warstwach.
- 3) W przypadku krótkich marszy statystycznie nie zaobserwowano zmniejszania chwilowej prędkości wiercenia wraz z przewiertem. W takich przypadkach można zastosować model wiercenia ze stałą chwilową prędkością wiercenia.
- 4) Z punktu widzenia statystyki nie można dać jednoznacznej odpowiedzi, że nie istniał wpływ zużycia narzędzi na chwilową prędkość wiercenia w krótkich marszach.

LITERATURA

- [1] Company Drill Bit Catalog. Katalog narzędzi firmy Hughes Christensen
- [2] Katalog narzędzi firmy Security DBS
- [3] Gonet A., Zięba A., Pawlikowska J., Wójcik M.: *Technika i technologia rdzeniowania otworów*. Kraków, Wyd. AGH 1996
- [4] Gonet A., Rzyczniak M., Stryczek S.: *Zadania do ćwiczeń z wiertnictwa*. Kraków, Wyd. AGH 1997
- [5] Gonet A.: *Optymalizacja mechanicznych parametrów technologii wiercenia otworów świdrami skrawającymi*. Przegląd Górniczy, nr 5, 1995
- [6] *Podręcznik użytkownika pakietu statystycznego Statystyka*. Kraków, StatSoft 2005
- [7] Greń J.: *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1999
- [8] Lubaś J., Rado R.: *Porównanie efektywności pracy różnych typów narzędzi wiertniczych*. Materiały IX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Nowe Metody i Technologie w Geologii Naftowej, Wiertnictwie, Inżynierii Złożowej i Gazownictwie”, Kraków, Wydawnictwo AGH, 2–3 lipca 1998
- [9] Miska S.: *Identyfikacja procesu wiercenia narzędziami skrawającymi*. Archiwum Górnictwa, vol. 2, 1975
- [10] Szostak L., Chrzęszcz W., Wiśniowski R.: *Narzędzia wierzące*. Kraków, Wyd. AGH 1996