

Referat wygłoszony na posiedzeniu Komisji Nauk Geologicznych PAN w Krakowie w dniu 03.12.2003

**Prof. dr hab. inż. Maria Bała, dr hab. inż. Adam Cichy, prof. AGH**

Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geofizyki

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: bala@geolog.geol.agh.edu.pl

cichy@geolog.geol.agh.edu.pl

## **OKREŚLANIE PRĘDKOŚCI FAL PODŁUŻNYCH I POPRZECZNYCH PRZY WYKORZYSTANIU MODELI TEORETYCZNYCH ORAZ DANYCH GEOFIZYKI OTWOROWEJ**

### **Wstęp**

W pracy zaprezentowano metodę określenia parametrów sprężystych skał zbiornikowych na podstawie teoretycznych modeli ośrodków porowatych, wiążących własności sprężyste skały z parametrami takimi jak: porowatość, spectrum przestrzeni porowej, nasycenie porów wodą, ropą lub gazem, składem mineralnym szkieletu, zawartością frakcji ilastej. Porównanie wyestymowanych prędkości  $V_p$  i  $V_s$  z modelu z obliczonymi z akustycznych obrazów falowych pozwoliło na opracowanie metody umożliwiającej uzyskanie, w sposób ciągły, prędkości różnych fal, a w szczególności fali poprzecznej ( $V_s$ ) w przypadku braku rejestracji tego parametru w otworze. Ma to szczególnie duże znaczenia przy interpretacji danych sejsmicznych AVO (*amplitude versus offset*) czy analizie *bright spotów* oraz ocenie dynamicznych modułów sprężystości skał w warunkach *in situ*. Metoda została opracowana w ramach projektu badawczego nr 8 T12B046 20 realizowanego w latach 2001 – 2003 pod kierunkiem M. Bały [Bała et al., 2003].

### **Omówienie programów ESTYMACJA**

Opracowano pakiet programów pod wspólną nazwą „ESTYMACJA”, który umożliwia obliczanie w sposób ciągły z głębokością parametrów sprężystych skał takich jak:

- czasy interwałowe fal podłużnych i poprzecznych (P i S) oraz prędkości tych fal,
- moduły sprężystości Younga,
- moduły odkształcenia objętości (Kirchoffa) i postaci (ścianania),
- współczynniki Poissona
- stosunki prędkości fali P do S
- gęstości objętościowe

ESTYMACJA, stanowi spójny moduł, który korzysta z niektórych aplikacji systemu interpretacyjnego danych geofizyki wiertniczej GeoWin opracowanego w ramach projektów badawczych nr 9T12B015017 i nr Nr: 9T12B 019 98C/4202 przez zespół specjalistów geofizyków i informatyków z Zakładu Geofizyki WGGiOŚr AGH oraz pracowników Geofizyki Kraków Sp. z o.o. pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. Jadwigi Jarzyny. Szczegółowy opis funkcjonowania systemu i poszczególnych aplikacji znajduje się w pracy Jarzyna et al. 2002.

Przy obliczaniu parametrów sprężystych zastosowano następujące modele teoretyczne i półempiryczne : *model Biota-Gassmanna* (BG), **model Kustera i Toksöza** (KT), *model Wylliego* (W) oraz *model Raymera-Hunta\_Gardnera* (RHG). Dwa pierwsze pozwalają na

określanie prędkości i czasów interwałowych fal podłużnych i poprzecznych (P i S), dwa pozostałe estymują tylko parametry fali P. Szczegółowy opis relacji i algorytmów w programach ESTYMACJA znajduje się w pracy [Bała, Cichy, 2003]

W modelu Biota-Gassmana przy obliczaniu  $V_P$  i  $V_S$  zastosowano współczynnik  $\beta$ , wyprowadzony przez Biota, który wiąże moduły odkształcenia objętości  $K$  i postaci  $\mu$  (formacji skalnej) z porowatością ośrodka  $\Phi$  oraz odpowiednimi modułami szkieletu ( $K_{ma}$ ,  $\mu_{ma}$ ), matrycy skalnej w stanie suchym ( $K_{dr}$ ,  $\mu_{dr}$ ) i cieczy nasycającej pory ( $K_f$ ). Współczynnik ten w relacjach Biota jest funkcją porowatości.

Można zauważyć, że :

$$\beta \rightarrow 0 \quad \text{dla } \Phi \rightarrow 0 \quad \text{i} \quad \beta \rightarrow 1 \quad \text{dla } \Phi \rightarrow 1.$$

Jego związek z porowatością jest postaci [Krief et al,1990]:

$$(1 - \beta) = (1 - \Phi)^{m(\Phi)}$$

Wykładnik  $m$  jest funkcją  $\Phi$  [Goldberg, Gurevich, 1999, Lee, 2002].

W zmodyfikowanym modelu Kustera-Toksöza ośrodek jest definiowany przez dwie fazy jednorodne o różnych własnościach. W fazie stałej (sprężysta matryca) rozpatruje się przypadkowo ułożone wtarcenia drugiej fazy.

Przestrzeń porową wyraża się przy pomocy współczynników kształtu porów  $\alpha_m$  oraz „gęstością porów”  $C(\alpha_{m,n})$  (koncentracja porów):

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C(\alpha_{m,n})$$

gdzie :  $C(\alpha_{m,n})$  - koncentracja porów o zadanych współczynnikach kształtu  $\alpha_m$ ,  $m = 1 \dots M$  i nasyconych różnymi mediami  $n = 1 \dots N$ ,

Moduły sprężystości  $K^*$  i  $\mu^*$  dla efektywnego ośrodka porowatego można obliczyć ze wzorów (8) - (10) zamieszczonych w pracy Toksöza et al [1976]. Przy opisie rozkładu przestrzeni porowej skały w naszej pracy zastosowano aproksymację spectrum porowego zaproponowaną przez Tao, King [1993]. Przy pewnym rozkładzie przestrzeni porowej opisanej przez parametry fraktalne i moduły sprężystości wiąże się estymowane wartości prędkości fali podłużnej  $V_p^*$  z rejestrowaną prędkością przy profilowaniu akustycznym i porowatością, stosując metodę optymalizacyjną.

W modelu Wylliego zakłada się liniową zależność pomiędzy czasem interwałowym fali podłużnej, a sumą iloczynów poszczególnych składników skały i odpowiednimi dla nich czasami interwałowymi.

Model Raymera - Hunta - Gardnera jest podobnie wyrażony jak poprzedni, ale uwzględnia nieliniową zależność czasu interwałowego fali podłużnej, a sumą iloczynów poszczególnych składników skały i odpowiednimi dla nich czasami interwałowymi.

## Dane wejściowe do pakietu programów ESTYMACJA i wyprowadzenie wyników

Po zalogowaniu się do bazy danych należy wprowadzić dane, na podstawie których są obliczane parametry sprężyste skał w profilu otworu. Dane te można podzielić na dwie grupy:

### • Profilowania rejestrowane

- profilowanie akustyczne PA poprawione na wpływ otworu i przeskoki fazy (cycle skipping),
- profilowanie gamma-gamma gęstościowe (RHOB),

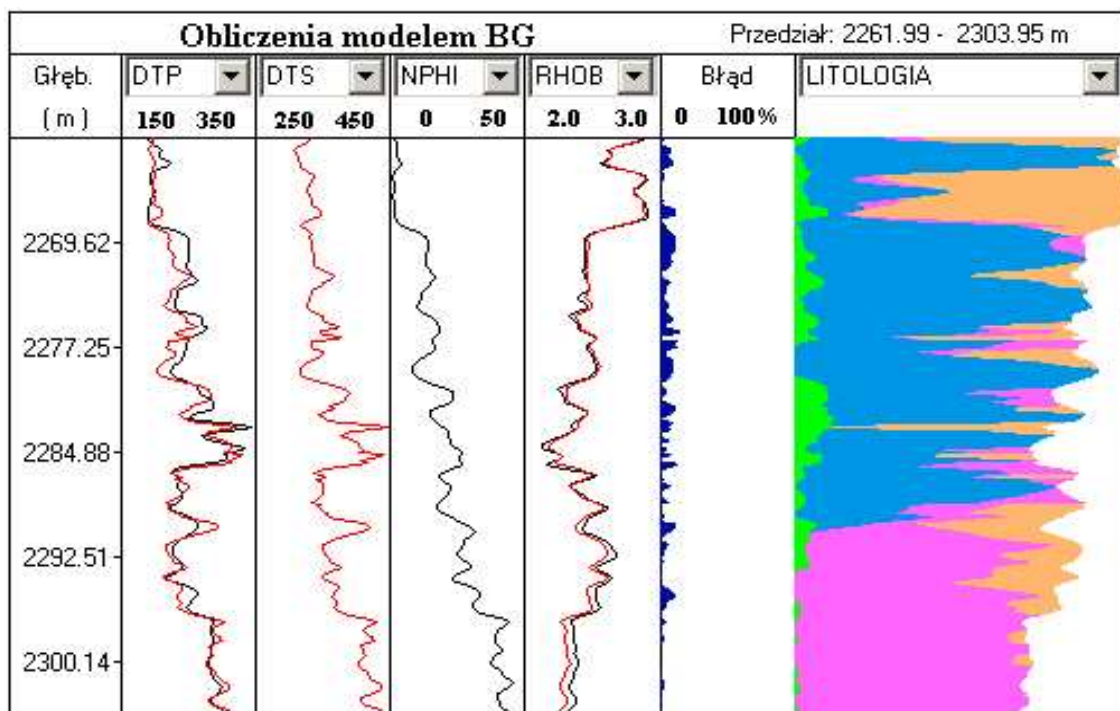
- profilowania inne traktowane jako „korelacyjne” np. gamma (GR), czy średnicy (CAL)

- **Profilowania z interpretacji** – dane konieczne przy obliczeniach parametrów sprężystych na podstawie różnych modeli teoretycznych. Do tych wielkości należą wyniki interpretacji litologiczno-porowatościowej wykonanej przy zastosowaniu dowolnych systemów interpretacyjnych. Będzie to porowatość (PHI), zawartość frakcji ilastej (zailenie – VSH), objętość poszczególnych minerałów tworzących szkielet skały (np. VSAND, VDOLO, VLIME itp) oraz nasycenie wodą (SWXO lub ewentualnie SW).

Po wczytaniu danych należy wybrać teoretyczny model, przy pomocy którego będą liczone parametry sprężyste. Następnym krokiem jest zdefiniowanie składu mineralnego (model litologiczno-porowatościowy). Po wybraniu odpowiednich składników mineralnych i mediów nasycających przestrzeń porowatą (woda, woda-gaz, woda-ropa) automatycznie są wprowadzane stałe szkieletowe minerałów i mediów z tabel stanowiących integralną część aplikacji ESTYMACJA. Wynik obliczeń można oglądać na ekranie w postaci graficznej bądź zapisywać w postaci cyfrowej do odpowiedniej bazy uprzednio zdefiniowanej.

Wynikowe krzywe można przetworzyć do formatu \*.las korzystając z aplikacji Sys2las systemu GeoWin.

Na rys. 1 przedstawiono fragment wyników obliczonych czasów interwałowych i prędkości fal podłużnych i poprzecznych w grafice wewnętrznej pakietu programów ESTYMACJA



Litologia:

- IŁ
- WAPIEŃ
- DOLOMIT
- ANHYDRYT

Profilowania:

- profilowania zmierzone
- profilowania teoretyczne
- zakres zmian
- porowatość

Rys. 1 Fragment obliczonych, przy użyciu modelu Biot-Gassmanna, czasów interwałowych fali podłużnej (DTP) i poprzecznej (DTS) (ścieżka 2 i 3) oraz gęstości (RHOB) (ścieżka 5) – *krzywe czerwone* i pomierzonych profilowań – *krzywe czarne*. Zaznaczono również błąd estymacji czasów fali P (ścieżka 6) oraz skład litologiczny i współczynnik porowatości (ścieżka 7) w otworze K-6.

### **Zakończenie**

Uzyskane wyniki testowania, w przedziałach występowania skał zróżnicowanych litostratygraficznie, są wysoce obiecujące. Pokazują, że estymowane modelami Biot-Gassmanna oraz Kustera i Toksöza czasy interwałowe i prędkości fal P i S, dobrze zgadzają się z parametrami sprężystymi określonymi na podstawie rejestrowanych w otworach akustycznych obrazów falowych. Modele Wylliego oraz Raymera, Hunta, Gardnera pozwalają na poprawne określenie czasów interwałowych i prędkości fal podłużnych.

Pakiet programów ESTYMACJA posiada wewnętrzną grafikę, a uzyskane wyniki mogą być przetworzone przy pomocy aplikacji Sys2.las występującej w systemie GeoWin i kompatybilnej z ESTYMACJĄ do postaci zapisu z rozszerzeniem \*.las, który jest standardowym zapisem profilowań geofizyki otworowej.

*Praca była finansowana przez KBN w ramach projektu badawczego nr 8T12B 046 20 w latach 2001 - 2003.*

### **Literatura**

- Bała M., Jarzyna J., Cichy A. 2001 – 2003 – Modelowanie prędkości propagacji i tłumienia fal sprężystych podłużnych i poprzecznych w skałach porowatych w powiązaniu z otworowymi badaniami geofizycznymi. Projekt badawczy KBN. Nr 8T12B 046 20.
- Bała M., Cichy A., 2003 - Estymacja prędkości fal podłużnych i poprzecznych przy wykorzystaniu modeli teoretycznych oraz danych geofizyki wiertniczej. Przegląd Geologiczny. Tom 51, nr 12.
- Goldberg I., Gurevich B., 1999 –A semi-empirical velocity-porosity-clay model for perrophysical interpretation of P- and S-velocities. Geoph. Prosp. Vol. 46, no 3, pp. 271 – 285
- Jarzyna J., Bała M., Cichy A., Karczewski J., Marzencki K., Zorski T., Gądek W., Stadtmuller M., Twaróg W., Gąsior I., 2002 – Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej systemem GeoWin. Wydawca WGGiOŚ AGH, Wydawnictwo „Arbor” Kraków, (monografia, str.136).
- Krief M., Garat J., Stellingwerff J.,Ventre J., 1990 – A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (Full-waveform sonic). The Log Analyst. Vol. 31, no 8, p. 355-369
- Lee M. W., 2002 – Biot-Gassmann theory for velocities of gas hydrate-bearing sediments. Geophysics vol. 67, No. 6, 1711 – 1719.
- Tao G., King M. S., 1993 – Porosity and pore structure from acoustic well logging data. Geophysical Prospecting 41, 435 – 451.
- Toksöz M.N., Cheng C.H., Timur A., 1976 - Velocities of seismic waves in porous rocks. Geophysics vol. 41, p. 621 - 645