

OCENA MOŻLIWOŚCI PROSPEKCYJNYCH KWADRUPÓLOWYCH  
PROFILOWAŃ ODWIERTOWYCH

UKD 550.832.73/74.0

W pracach autora (4—9) oraz w dokumentacjach (1972—73, 74, 75 r.) problemu węzłowego 01.1.1 przedstawiono podstawy teoretyczno-metodyczno-interpretacyjne odwiertowych profilowań kwadrupolowych. Z prac tych wynika, że ze względu na zastosowania praktyczne profilowania kwadrupolowe mogą być zrealizowane w trzech wariantach metodycznych: stacjonarnym, niskoczęstotliwościowym i wysokoczęstotliwościowym.

Stacjonarny wariant profilowań został omówiony jako graniczny wypadek wariantu niskoczęstotliwościowego. Wydaje się, że tego rodzaju ujęcie jest najwłaściwsze z punktu widzenia ogólnej, polowej konstrukcji rozwiązania problemu, tj. określenia promieniowania liniowego kwadrupola elektrycznego, ogólnie w niejednorodnym i anizotropowym ośrodku skalnym. W tej sytuacji zostały podkreślone w sposób naturalny pewne analogie, jak i różnice metodyczno-interpretacyjne, jako oczywiste konsekwencje analizy asymptotycznej.

Z prac (6, 8, 9) oraz dokumentacji zadania 03 01d09 (p. 10) wynika, że stacjonarne profilowania kwadrupolowe mogą być zrealizowane w dwóch wariantach metodycznych: przewodnościowym (tzw. interwał I) i opornościowym (tzw. interwał II). Podział jest uwarunkowany specyficzną konfiguracją krzywych sondowań (por. 6). Z krzywych tych wynika, że w interwale I oporność pozorna —  $\rho_p$ , rejestrowana przez krótkie, kwadrupolowe sondy gradientowe, jest odwrotnie proporcjonalna (skala bilogarytmiczna) do oporności właściwej —  $\rho_w$  warstwy, w szerokim interwale zmian parametru  $v_{21} = \frac{\rho_w}{\rho_0}$  ( $\rho_0$  — oporność właściwa płuczki). Stąd wynika, że krótkie, kwadrupolowe sondy gradientowe są szczególnie korzystne w wypadku profilowań odwiertów wypełnionych zmineralizowaną płuczką (woda złożowa), przy wysokich opornościach właściwych warstw. Jest to sytuacja typowa (nie tylko zresztą u nas) przy przewiercaniu poziomów solonośnych.

Klasyczne profilowania oporności są w tym wypadku zupełnie nieprzydatne ze względów metodycznych, w następstwie zbyt małej rozdzielczości rejestrowanych krzywych —  $\rho_p$ , względem —  $\rho_w$ , przy dużych wartościach parametru  $v_{21}$ . Żeby się o tym przekonać wystarczy sobie uzmysłowić, że w omawianym przypadku (np. utwory cechsztynu) oporności płuczek mogą być około 0,01 ohmm, co przy np.  $v_{21} = 10\ 000$  odpowiada  $\rho_w = 100$  ohmm. Przy tak dużej wartości  $v_{21}$  krzywe BSE klasycznych profilowań oporności są już praktycznie nierozdzielcze, a przecież należy się liczyć z jeszcze wyższymi opornościami właściwymi warstw i tym samym wyższymi wartościami parametru  $v_{21}$ .

W tego typu wypadkach (płuczki zmineralizowane są u nas częstsze niż płuczki „słodkie”) najczęściej stosuje się sterowane, trójelektrodowe profilowania oporności (L-3). Należy jednak stwierdzić, że nomogramy interpretacyjne sond L-3, uzyskane w wyniku modelowań na elektointegratorze karotażowym (N. N. Sochranow, N. A. Pierkow, M. Bondarienko, N. N. Zefirow — 1965), względnie ogólnie w wyniku modelowań analogowych (H. Guyod — 1959, J. E. Owen, W. J. Green — 1951, W. T. Czukin — 1973) nie mogą być wykorzystane w omawianym wypadku, ze względu na ograniczoność parametru  $v_{21} < 2500$ . Przy tym uważa się, że przy  $v_{21} < 1000$  wyinterpretowane oporności właściwe warstw są obarczone błędem nie mniejszym niż 5%, natomiast przy  $1000 < v_{21} < 2500$  błąd ten jest nie mniejszy niż 10%. Przy  $v_{21} > 2500$  wyniki interpretacji ilościowej są już

mało dokładne, co jest następstwem stosowania w tym przypadku rozwiązań przybliżonych (tzw. rozwiązania elipsoidalne i sferoidalne). Rozwiązania te pozwalają na uzyskanie przy  $v_{21} > 2500$  jedynie orientacyjnych wyników.

Nomogramy uzyskane w wyniku modelowań analogowych i rozwiązań przybliżonych (W. N. Dachnow, E. A. Nejmán — 1955, G. A. Czieriemski — 1961, L. Witte, K. P. Fournier, H. Tajade-Flores — 1957) praktycznie nie różnią się przy  $v_{21} < 100$ , czyli są tym samym w tym interwale wystarczająco dokładne. Jednak np. w wypadku trójwarstwowości środowiska skalnego obserwuje się istotne różnice rozwiązań modelowych i elipsoidalnych. Przy głębokiej filtracji płuczki różnice te obserwuje się ze wzrostem  $\frac{\rho_w}{\rho_{sf}}$  (gdzie  $\rho_{sf}$  jest opornością właściwą strefy filtracji). Tak np. (N. N. Zefirow — 1966) przy  $D/d_0 = 8$  i  $\rho_w/\rho_{sf} = 10$  rozbieżności omawianych rozwiązań wynoszą 35%, natomiast przy  $\rho_w/\rho_{sf} = 20$  około 60%. Analogicznie obserwuje się rozbieżności rozwiązań elipsoidalnych i sferoidalnych ze wzrostem  $\rho_w/\rho_{sf}$ . Tak więc dochodzimy do wniosku, że wyinterpretowane oporności właściwe z trójelektrodowych profilowań sterowanych są przy  $v_{21} > 2500$  określone mało dokładnie i że interpretacja może mieć w tym wypadku jedynie charakter orientacyjny.

Z pracy autora (9) oraz dalszych prac wynika, że sondy kwadrupolowe (zarówno potencjałowa, jak i gradientowa) charakteryzują się znacznie większymi możliwościami detalizacyjnymi niż sondy klasycznych profilowań oporności. Z bezpośrednich pomiarów wykonanych w kilkunastu otworach wiertniczych wynika, że są również korzystniejsze pod tym względem od sond trójelektrodowego profilowania sterowanego. Istotnym ograniczeniem sond kwadrupolowych (szczególnie gradientowych) jest znacznie mniejszy zasięg głębokościowy niż sond L-3 i sond profilowań indukcyjnych. Znacznie większe możliwości detalizacyjne, łatwość wykonania sond oraz możliwość zrealizowania tego typu pomiarów standardową aparaturą karotażową, skłaniają do stosowania profilowań kwadrupolowych w omawianych warunkach.

Rozdzielczość krzywych  $\rho_p$  względem  $\rho_w$  jest znacznie korzystniejsza w wypadku kwadrupolowych sond gradientowych niż sond potencjałowych. Tak np. przy  $z/d = 4$  ( $z$  — długość sondy,  $d$  — promień odwiertu) wartości  $\rho_p/\rho_0$ , odpowiadające kwadrupolowej sondzie gradientowej, są dla  $v_{21} = 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10\ 000$  odpowiednio równe: 0,2852, 0,1520, 0,0793, 0,0334, 0,0177, 0,0097. Ponieważ interwał przewodnościowy I ma miejsce w wypadku kwadrupolowych sond potencjałowych dla krótszych sond i jest znacznie mniej rozdzielczy, wynika stąd wniosek, że profilowania w tym interwale powinny być wykonywane tylko sondami gradientowymi. W pierwszych, próbnych pomiarach, profilowania wykonywano sondą: M0,37A0, 04B0,04A.

Interwał opornościowy II ma podobny charakter jak w klasycznych profilowaniach oporności. Interwał II jest ograniczony wartością parametru  $v_{21}$ . Tak np. przy  $z/d = 40$  w omawianym powyżej wypadku dwuwarstwowym, dla  $v_{21} = 2, 5, 10, 20, 40, 100, 250, 500$  otrzymuje się następujące wartości  $\frac{\rho_p}{\rho_0}$ : 2,1322, 5,9310, 14,5505, 41,0375, 111,6009, 290,7839, 477,6241, 547,7782. Powyższe obliczenia zostały wykonane dla sondy potencjałowej, która, jak to wynika z zestawionych charakterystyk, jest korzystniejsza od sondy

gradientowej. Z analizy wykresów dwuwarstwowych wynika, że minimalne długości sond, jakie mogą być przyjęte w praktyce pomiarowej, są uwarunkowane wielkością  $v_{21}$ . Jeżeli  $v_{21}$  nie przekracza orientacyjnie 500, to w celu zapewnienia kontrastowości i jednoznaczności krzywych profilowań powinno się przyjmować długości sond z przedziału (20÷30) d. Maksymalne długości sond są uwarunkowane dopuszczalnym obciążeniem prądowym aparatury.

Pomiary terenowe wykonano sondami o różnych rozstawach elektrod. Najkorzystniejszą okazała się sonda M 2,4 A 0,25 B 0,25 A. Wykonywano również pomiary sondą równoważną, w sensie twierdzenia o wzajemności, A 2,5 M 0,25 N 0,25 M. Wyniki pomiarów porównywano z sterowanym profilowaniem trójelektrodowym oraz klasycznym profilowaniem oporności (A 2,5 M 0,25 N). Kwadrupolowe sondy potencjałowe oraz równoważne w sensie twierdzenia o wzajemności (przy „gładkim” spięciu elektrod MN) charakteryzują się w następstwie symetryczności kwadrupola (w części pomiarów stosowano symetryzator) symetrycznymi anomaliami krzywych  $\varphi_p$ . Sonda A x M y N y M niewiele różni się od sondy diwertentnej Ł. M. Alpina (1), która w następstwie spięcia elektrod MN oporem R ( $R_1, R_2$ ) jest równoważna „niesymetrycznej” sondzie kwadrupolowej (potencjałowej), nie będącej przedmiotem rozważań wspomnianych prac. Pomiary terenowe potwierdziły, że nawet długie sondy kwadrupolowe charakteryzują się większymi możliwościami detalizacyjnymi od sterowanych sond trójelektrodowych.

Najszerzej omówiono wariant niskoczęstotliwościowy profilowań kwadrupolowych, ze względu na pewne analogie i, co należy podkreślić, istotne zalety w porównaniu z profilowaniami podatności magnetycznej i profilowaniami indukcyjnymi. Tak np. z przedstawionych charakterystyk cechowania sond kwadrupolowych (4) wynika, że niskoczęstotliwościowy wariant profilowań jest szczególnie predestynowany do określania podatności magnetycznej, co zresztą potwierdziły próby na otworze wiertniczym Krzemianka — 22.

Wariant niskoczęstotliwościowy może być również zastosowany do określania przewodności właściwej, biorąc jednak pod uwagę łatwość cechowania sond indukcyjnych i ich większy zasięg głębokościowy należy stwierdzić, że mimo mniejszych możliwości detalizacyjnych metoda H. G. Dolla jest prospekcyjnie korzystniejsza. Wydaje się, że to zagadnienie przedstawiono wyczerpująco w pracy (4). Praktyczne sondy kwadrupolowe zrealizowano w wariantcie induk-

cyjnym. Wykonano wiele pomiarów modelowych w warunkach laboratoryjnych, stosując specjalnie skonstruowaną aparaturę o zmiennym zakresie częstotliwości, które potwierdziły wnioski uzyskane za pomocą rozważań teoretycznych.

Wysokoczęstotliwościowy wariant profilowań został jedynie zasygnalizowany. Ograniczono się do podania odpowiednich wyrażeń określających rozkład pola elektromagnetycznego, wzbudzonego przez wysokoczęstotliwościowy kwadrupol w odwiercie i anizotropowym ośrodku skalnym (7, 8) oraz w ośrodku o płaskorównoległych granicach rozdziału (7). Z przedstawionej analizy asymptotycznej wynika celowość praktycznego stosowania również tego wariantu profilowań, w aspekcie określania przenikalności elektrycznej skał.

Jednoczesna dyskusja kilku różnych wariantów profilowań kwadrupolowych okazała się możliwa w związku z dużą idealizacją nadajników sond, tj. liniowego kwadrupola elektrycznego.

#### LITERATURA

1. Alpin Ł. M. — Diwertentnyj karotaż. Prikl. Geof., wyp. 32, 1962.
2. Doll H. G. — The laterolog a new resistivity logging method with electrodes using an automatic focusing system. J. of Petrol. Tech., vol. 3, 1951, no. 11.
3. Doll H. G. — Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base mud. Ibidem, 1946, no. 6.
4. Gawin A. — Charakterystyki cechowania sond kwadrupolowych. Acta geoph. pol., vol. 22, 1974, nr 4.
5. Gawin A. — Odwiertowe profilowania elektromagnetyczne w anizotropowym ośrodku skalnym. Pr. geol. Komis. Nauk geol. PAN Oddz. w Krakowie, 1972, nr 71.
6. Gawin A. — Odwiertowe profilowania kwadrupolowe w jednorodno-anizotropowym ośrodku skalnym. Acta geoph. pol., vol. 19, 1971, no. 4.
7. Gawin A. — Odwiertowe profilowania kwadrupolowe w warstwach o ograniczonej miąższości. Ibidem, vol. 23, 1975, no. 2.
8. Gawin A. — Podstawy teoretyczne odwiertowych profilowań kwadrupolowych. Ibidem, vol. 19, 1971, no. 2.
9. Gawin A. — Wpływ poziomych granic rozdziału ośrodków skalnych na konfigurację krzywych profilowań kwadrupolowych. Ibidem, vol. 20, 1972, no. 2.

#### SUMMARY

The applicability of quadrupole logging in a complex of electrometric logging methods of identifying, recognition, and determination of electromagnetic rock parameters is discussed. Its differences, similarities, advantages and shortcomings in relation to classic and remote resistance, induction and magnetic susceptibility logging techniques are emphasized.

#### РЕЗЮМЕ

Анализируется пригодность квадрупольного каротажа в комплексе методов скважинной электрометрии для детального определения электромагнитных параметров пород. Отмечаются преимущества и недостатки, сходства и различия этого метода в сопоставлении с классическими методами каротажа сопротивлений, индукции и магнитной восприимчивости.