

ZAGADNIENIE OPORNOŚCI WZGLĘDNEJ NIEKTÓRYCH WARSTW

I. WPROWADZENIE

Pojęcie „oporność względna skał” (the formation factor, le facteur de formation, odnoszitelnoje udielenije sprotiwlenije) zostało wprowadzone dla ułatwienia analizy oporu elektrycznego skał. Oporność względna skał (F , ρ_p) jest stosunkiem rzeczywistego elektrycznego oporu właściwego skały (R_o , ρ_{wp}), zwanego krótko „oporem właściwym”, do oporu właściwego wody tę skałę nasycającej (R_w , ρ_w),

czyli $F = R_p = \frac{R_o}{R_w} = \frac{\rho_{wp}}{\rho_w}$. Stosunek ten jest na-

zywany również (1) „parametrem porowatości” lub „strukturalnym parametrem” skały. Przy tym określeniu zakłada się, że badana formacja lub próbka skalna jest całkowicie nasycona wodą o oporze R_w , ρ_w . Przy całkowitym nasyceniu skały wodą zależność ta dla danej próbki jest wielkością stałą.

Oporność względna zależy od porowatości skały i na ogół wzrasta, gdy maleje porowatość skały (stosunek objętości por danego elementu skały do objętości tego elementu). Przy tych samych pozostałych parametrach jest ona odwrotnie proporcjonalna do potęgi „ m ” porowatości „ p ”.

$$F = R_p = \frac{a}{p^m}$$

Wartość stałych „ a ” i „ m ” zmienia się stosownie do typu skały i tak według Dachnowa „ a ” zmienia się od 0,45 dla słabo scementowanych piaskowców do 0,8 dla zbitych drobnokrystalicznych wapieni i dolomitów; „ m ” zmienia się w granicach od 1,85 dla ilastych wapieni do 2,3 dla wapieni i dolomitów gęstych, drobnokrystalicznych.

Oporność względna jest stała dla danej próbki skalnej niezależnie od wielkości oporu właściwego

nasycającego ją płynu. O elektrycznym oporze właściwym skały decyduje głównie zawartość w niej wody i opór tej wody. Wynika to stąd, że ziarna mineralne budujące szkielet skały stawiają na ogół o wiele większy opór niż roztwór elektrolityczny zawarty w porach między nimi, zwany „wodą pokładową” (l'eau interstitielle, the saturating fluid, płastowaja woda, wodnyj rastwor nasyszczajuszczyj porowoje prostranstwo).

Matryca skalna, zbudowana z minerałów stałych, jest praktycznie izolatorem i nie przewodzi prądu. Prąd elektryczny przepływa przez skałę głównie dzięki przewodnictwu wody pokładowej, którą ona zawiera. Opór elektryczny (R_o , ρ_{wp}), który stawia ta woda prądowi w elemencie skały o jednostkowym przekroju i długości, zależy w dużym stopniu od przekroju poprzecznego kanałów wypełnionych przez nią wewnątrz skały i od długości tych kanałów. Wynika stąd, że na wielkość oporu właściwego próbki skalnej czy danej formacji wpływa w dużym stopniu oprócz wielkości porowatości również forma przestrzeni wypełnionej przez pory.

Porowatość względna skał zależy więc od ich struktury, stopnia odsortowania ziaren i stopnia ich cementacji. Skałom o tej samej wielkości porowatości nie musi odpowiadać ta sama oporność względna, ponieważ obwody utworzone przez elektrolit wewnątrz różnych skał o tej samej porowatości mogą być różne. Wartość stosunku R_o/R_w lub ρ_{wp}/ρ_w pozostaje w związku z morfologią por niezależnie od absolutnej wartości oporu właściwego R_o lub ρ_{wp} . Jeżeli porównamy oporność względną piasku i wapienia, to okaże się, że przy jednakowej wartości porowatości oporność wapienia będzie znacznie większa niż piasku. W wapieniu bowiem liczne duże pory łączą się między sobą cienkimi kanałami, których opór jest duży.

Krętość i szybkie zmiany przekroju kanałów por są jedną z przyczyn podwyższenia elektrycznego oporu właściwego skał. Według S.J. Litwinowa i L.W. Archarowa oporność względna piasków przeważnie zbliża się do 10, oporność względna porowatych piaskowców znajduje się zwykle w granicach 15—40. Skały scementowane i skały z twardym szkieletem mineralnym (skały nieokruczowe) odznaczają się znacznie większą opornością względną. Dla porowatych skał węglanowych oporność względna zwykle wynosi od 40 do 100. Zależność między oporem właściwym a porowatością u skał węglanowych zaznacza się tylko przy wysokiej porowatości i przy równomiernym rozmieszczeniu porów. Już przy niewielkiej zmianie średnicy kanałów możliwa jest znaczna zmiana oporu właściwego skały, choć ogólna porowatość skały jako całości zmieni się nieznacznie.

Opór właściwy skał zmienia się również znacznie zależnie od zawartości materiału ilastego.

W rozważaniach tych jest mowa o „efektywnej porowatości”, tzn. o przestrzeni zajętej przez pory wzajemnie łączące się. Do por nie łączących się wzajemnie fluid nie może wpływać i nie może z odizolowanych por wypływać. Odizolowane pory nie powodują zwiększenia przewodnictwa skały.

Wyllie (5) oporność względną określa następująco: biorąc próbkę skalną o jednostkowym przekroju, otrzymamy porowatość (p) jako liczbową wartość przekroju poprzecznego tej próbki, zajętego przez pory. Przy przeciętnej długości (Le) drogi prądu przez kanały o przekroju „ p ” wypełnione roztworem o oporze właściwym R — opór skały (r_s) wyniesie

$$r_s = \frac{RLe}{p}$$

Opór r_r identycznej objętości roztworu solnego o tym samym oporze właściwym R i tym samym przekroju poprzecznym (l) wynosi wtedy:

$$r_r = \frac{RL}{l}$$

Stosunek między oporem skały a oporem roztworu jest opornością względną F — bardzo ważnym parametrem przy interpretacji profilowania elektrycznego otworów:

$$F = \frac{r_s}{r_r} = \frac{R}{L} \cdot \frac{Le}{p} \cdot \frac{l}{L} = \frac{Le}{L \cdot p}$$

Jak widać w wyrażeniu na F , nie występuje opór właściwy roztworu (R). Wynika więc z tego, że skała będzie miała tę samą wartość F niezależnie od przewodnictwa roztworu ją wypełniającego w czasie wykonywania pomiarów. Z równania tego wynika również, że F zależy nie tylko od porowatości, ale i od stosunku Le/L . Ponieważ na wielkość stosunku Le/L wpływa kształt por w skałce i sposób, w jaki one są rozłożone i między sobą połączone, to widać wyraźnie, że dwie skały o identycznej wielkości porowatości mogą mieć zupełnie różne oporności względne.

Istnieją różne metody określenia oporności względnej. Wśród tych metod możemy wyróżnić dwie zasadniczo różne. Będą to:

1) bezpośredni pomiar oporności względnej na próbkach

2) określenie oporności względnej warstw z danych profilowania geofizycznego.

Bezpośredni pomiar F

Dla scharakteryzowania danej warstwy pod względem wielkości oporności względnej (F) przez pomiar F na próbkach konieczne jest wykonanie pomiaru na stosunkowo dużej ilości próbek pobranych z danej warstwy. F. Lebreton w numerze XI „Revue de l'Institut Français du Pétrole” z 1958 r. proponuje dla tego celu dość szłąbką, dokładną i ekonomiczną metodę. Należy pamiętać, że próbka z danej warstwy, która została wydobyta na po-

wierzchnię w formie rdzenia z otworu wiertniczego, podlegała działaniu płuczki. Wskutek tego skład płynu wypełniającego jej pory w stanie naturalnym uległ zmianie. Ażeby więc z pomiarów otrzymać rzeczywistą wartość oporności względnej danej próbki, trzeba ją ponownie wypełnić płynem i to o znacznie większym przewodnictwie niż przewodnictwo matrycy skalnej zbudowanej z minerałów stałych. Ponadto płyn ten nie może wchodzić w reakcje chemiczne ze stałą matrycą.

Ważne jest również, aby izolujące fluidy takie jak ropa naftowa lub gaz zostały całkowicie usunięte i nie pozostawały w próbce, związane z matrycą.

Przy dążeniu do ustalenia związku między opornością względną a porowatością dla danej formacji należy porównywać pomiary obu tych parametrów fizycznych, wykonane na tych samych próbkach. Próbki, na których dokonuje się pomiarów, pobierane są w otworze na danym poziomie za pomocą specjalnego urządzenia — jedna w kierunku pionowym, druga w kierunku poziomym. Są one kształtu cylindra o objętości około 10 cm³ i pobierane są w regularnych odstępach co 30 cm przez całą miąższość złoża. Przed pomiarem oporności względnej należy z próbek ekstrahować wszelkie płyny w nich zawarte, pomierzyszki przednio ewentualne nasycenie próbek ropy, porowatość i przepuszczalność próbek.

Aby otrzymać opór właściwy (R) próbki w kształcie cylindra, przepuszcza się przez nią wzdłuż jej osi prąd elektryczny, doprowadzany do próbki za pomocą płaskich okrągłych elektrod przyłożonych do jej dwóch równoległych przekroi. Na ohmometrze odczytuje się wielkość oporu (r), jaki próbka stawia przepływowi prądu. Mając pomierzoną długość cylindra (l) i jego przekrój (s), wielkość oporu właściwego otrzymujemy z wzoru $R = r \frac{s}{l}$. Długość

i średnicę cylindra mierzy się z dokładnością do 0,5 mm. Wypłukiwania ropy z próbki dokonuje się za pomocą chloroformu. W suszarce pod próżnią 0,015 atm., w temperaturze nieco poniżej 105° w ciągu kilku godzin próbkę susza się. Dla próbek ze skał ilastych temperatura nie może przekraczać 50°. Po ekstrakcji i osuszeniu próbkę nasycy się elektrolitem, przeważnie roztworem chlorku sodu w wodzie destylowanej. Koncentrację roztworów dajemy różną, między innymi taką samą jak i wody złożowej. Wykonując kilka pomiarów przy nasycaniu próbek roztworami o różnej koncentracji chlorku sodu, rozpoczynamy od nasycenia próbki roztworem o największej koncentracji. Przy nasycaniu krystalizator z próbką pod próżnią i roztwór z solą w zbiorniku łączy się, podnosząc stopniowo ciśnienie powietrza na roztwór do wielkości ciśnienia atmosferycznego. Impregnacja trwa przez kilka dni. Kryterium dobrej impregnacji jest stałość oporu próbki z upływem czasu.

W celu uniknięcia wyparowywania elektrolitu na powierzchni próbki nasycy ją wewnątrz aparatu, który służy do pomiaru oporności. Po nasyceniu — próbkę na całej powierzchni cylindrycznej odpowiednio zabezpiecza się dla umożliwienia dalszej nią manipulacji. W tym celu daje się okładzinę z kauczuku, mieszaniny gipsu i plastyku lub z gumy. Okładzinę nakłada się tak, aby nie spowodować zmiany przepuszczalności i porowatości próbki.

Płaskie przekroje cylindrycznej próbki są przeznaczane do zapewnienia kontaktu między źródłem prądu a skałą. Przekroje te pokrywa się przewodzącą złotą farbą albo metalizuje się cyną.

Opór właściwy roztworu, którego używamy do nasycania próbki, mierzymy przed zanurzeniem próbki celem jej nasycenia jak i po zanurzeniu. W czasie wykonywania pomiarów oporności względnej temperaturę mierzy się z dokładnością do 1°. Ma to na celu zmniejszenie do minimum stosunkowego błędu pomiaru oporności względnej, zamknięcie go w granicach 6 do 13,4%. Z dyskusji wzoru na oporność

względnej wynika, że dla zmniejszenia stosunkowego błędu wymiary próbki powinny być jak największe, a elektrolit powinien być możliwie o niskiej koncentracji.

Zabezpieczenia cylindrycznej powierzchni próbki przed wyparowywaniem płynu dokonuje się też przez zanurzenie jej w kadzi z plastikową mgłą wytworzona z polietylenu. Kadź ma porowate dno, przez które przechodzi sprężone powietrze lub azot pod ciśnieniem około 1 kg/cm². Tego rodzaju zabezpieczenie stosuje się przede wszystkim dla próbek piasków i wapieni o porowatości międzyziarnowej. Na powierzchni cylindrycznej próbki tworzy się gładka błonka o grubości 0,5 mm. Proszek nie przenika w pory próbki dzięki temu, że ciśnienie gazu wynosi poniżej 1 atmosfery. Przed plastyfikacją próbka jest w suszarce przesuszona całkowicie aż do temperatury 80°. Po plastyfikacji notuje się lekki spadek przepuszczalności próbki z powodu większej szczelności między próbka a izolacją kauczukową używaną w permeametrze.

Iły i szelinowate wapienie zabezpiecza się przed wyparowywaniem płynu przez metalizację cyną.

Dedukcja oporności względnej

Oporność względną warstwy można otrzymać również z danych profilowania geofizycznego. Trzeba jednak podkreślić, że za pomocą dotychczas stosowanych w tym celu metod geofizycznych nie jest to sprawa prosta i że w dalszym ciągu poszukuje się doskonalszych metod i robi doświadczenia nad rozwojem metod dotychczas znanych.

Według Wylliego do metod znanych i obecnie stosowanych należą metody takie, jak:

- metoda analogii;
- wykorzystanie „nomogramów różnicowych oporu” (palećki bokowego kamotażnego zondирования, resistivity departure curves, abaques d'écarts);
- wykorzystanie krzywych różnicowych oporu dla mikrosond (mikrosondy, contact logging devices, microlog);
- wykonanie pomiarów przy użyciu mikrolaterologu (soprotiwlenije ekranirowanego mikrozazemlenija, microlaterolog);
- profilu neutronowego;
- profilu gamma — gamma;
- profilu prędkości akustycznej.

a. Przez analogię ustala się oporność względną, na przykład: 1) dla warstwy, co do której wiadomo, że jest całkowicie nasycona wodą, a która towarzyszy warstwie badanej. Oporność względną całkowicie nasyconej wodą warstwy obliczamy jako iloczyn jej rzeczywistego elektrycznego oporu właściwego, ustalonego na podstawie pomiarów oporów pozornych i oporu właściwego wody nasycającej tę warstwę, ustalonego na podstawie profilu potencjałów własnych. Przez analogię z sąsiednimi otworami możemy założyć, że oporności względne badanej warstwy i warstwy, co do której wiadomo, że jest całkowicie nasycona wodą, są takie same;

2) jeżeli tę samą warstwę przewiercono dwoma otworami, przy czym w jednym otworze jest ona niskooporowa, bo zawiera wodę, a w drugim wysokooporowa z powodu zawartości węglowodorów; 3) gdy mamy do czynienia z grubą warstwą z kontaktem w niej (w obrębie jednego otworu) górnej ławy z ropą i dolnej zalanej wodą. Przyjmujemy, że oporności względne górnej i dolnej ławy są takie same. Jest to prawdopodobne, jeżeli pozorny opór właściwy tych ław, pomierzony sondą potencjałową o rozstawie 25 cm lub 40 cm, jest prawie stały nad i pod kontaktem.

b. Stosując nomogramy różnicowe oporów dla znalezienia rzeczywistego oporu właściwego danej warstwy na podstawie pomierzonych pozornych oporów właściwych, możemy określić również rzeczywisty opór strefy całkowicie zalanej przez filtrat płuczki (R_i). Znając oporność filtratu (R_m , ρ_o), możemy wyliczyć wielkość oporności względnej. Trze-

ba jednak zauważyć, że trudne jest odróżnienie strefy zalanej o małym zasięgu a wysokim oporze od strefy zalanej o dużym zasięgu a niskim oporze.

c. Opór pozorny zarejestrowany za pomocą urządzenia do profilowania kontaktowego (mikrosond) częściowo zależy od oporu właściwego strefy zalanej przez płuczkę. Przy dużej pionowej przepuszczalności danej warstwy (np. nie uwarstwione piaski o wysokiej porowatości) profil wykonany mikrosondą rejestruje tylko opór pozorny warstwy w stanie naturalnym — nie zalanej przez filtrat płuczki. Spotykamy się tu ze zjawiskiem pozornej nieobecności strefy zalanej przez płuczkę. Zjawisko to występuje, gdy płuczka jest słodka, a woda pokładowa bardzo słona. Wówczas pomiary mikrolaterologiem i mikrosondą nie pozwalają na określenie oporności względnej. Za pomocą profili oporu pozornego zdjętych tymi urządzeniami uzyskuje się dobre wyniki w określeniu oporności względnej, jeżeli jest ona rzędu $F = 6$ do 20, a więc przy porowatości 22 do 40%. Przy $F = 20$,

$$p = \sqrt{1/20} = 22 \quad \text{przy } F = 6, \quad p = \sqrt{1/6} = 0,40$$

d. Określenie wielkości oporności względnej przy użyciu mikrolaterologu opiera się na tym, że efektywna penetracja prądu, wypływającego z elektrody umieszczonej koncentrycznie w pierścieniu w gumowej okładce, jest mała i wynosi około 3". Filtrat płuczki na ogół penetruje głębiej, zalewając daną warstwę. Pomiar oporności strefy zalanej mikrolaterologiem można wykonywać przy grubości „plastra” iltu (mud cake, glinistaja koroczka) nie przekraczającej 1/2". Nadaje się do profilowania warstw o porowatości poniżej 20%, a więc warstw, które nie mogą być profilowane mikrosondami.

e. Mając do dyspozycji profil neutron-gamma, wykreślamy wychylenia w standardowych jednostkach krzywej neutron-gamma w funkcji porowatości. Przy wykreśleniu tej krzywej uwzględniamy tę okoliczność, że najmniejsze wychylenia na profilu neutron-gamma występują w łażach i łupkach ilastych, którym możemy przypisać porowatość równą 30 do 35%, największe natomiast w anhydrytach lub zbitych wapieniach, którym przypisujemy porowatość 1 do 2%. Jeżeli porowatość będziemy nanosili na wykres w skali logarytmicznej a odchylenia neutronowe w zwykłej skali, to zależność między porowatością a odchyleniami profilu neutron-gamma od zera przedstawiać się powinna na ogół w formie linii prostej. Po ustaleniu dzięki temu wykresowi porowatości, z kolei ze związku między porowatością i opornością względną dla piaskowców $F = 0,75/p^2$ i dla wapieni $F = 1/p^2$ znajdujemy oporność względną.

\) Jak z tego wynika, ogólnie na profilu neutronowym otrzymujemy takie same różnice wychyleń, gdy porowatość zmienia się z 1% na 2% jak i wtedy, gdy porowatość zmienia się z 10 na 20%. Dlatego profilowanie neutronowe stosuje się przede wszystkim dla oceny porowatości niskich w zakresie od 1 do 10%.

f. Natężenie rozproszonego promieniowania gamma zarejestrowane w funkcji głębokości redukuje się zwykle do natężenia, jakie otrzymalibyśmy, gdyby źródło promieniowania miało moc standardową. Istnieją specjalne krzywe wiążące standardowe wychylenia na profilu (γ , γ) z gęstością skał. Tej metody określania oporności względnej używa się przy porowatościach powyżej 10%, a więc przede wszystkim dla określenia oporności względnej piaskowców.

g. Prędkość dźwięku w skale zależy od prędkości dźwięku w wodzie nasycającej daną skałę i od prędkości dźwięku w szkielecie stałym — w matrycy. Wzrost temperatury wywołuje wzrost prędkości dźwięku w płynie aż do temperatury 78°, powyżej której prędkość dźwięku maleje ze wzrostem temperatury. Jeżeli ilość milisekund na jednostkę długości przebiegu dźwięku w skale — dla różnego typu skał (piaskowców, anhydrytów, wapieni, do-

lomitów) przy przyjętej prędkości dźwięku w płynie skałę nasycającym (przeważnie 4900 stop/sek. = 4900 × 0,3048 = 1493,5 m/sek.) — pomnożymy przez rozstaw między źródłem dźwięku a jego detektorem w przyrządzie pomiarowym, i tak otrzymane czasy przebiegu wykreśliły w funkcji porowatości, to otrzymamy metodę interpretacji profilu akustycznego w jednostkach porowatości i oporności względnej (współczynnika warstwowego). Warstwa o wysokiej porowatości nasycona ropą ma niską prędkość i wysoką oporność.

Profil prędkości akustycznej jest szczególnie przydatny przy płucze na bazie ropnej, ponieważ wówczas nie ma możliwości zastosowania elektrycznej metody dla oceny porowatości. Dla oceny porowatości piaskowców profil akustyczny jest lepszy od profilu neutronowego, a w skałach węglanowych odwrotnie.

II. PRÓBA ZWIĄZANIA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH

Rozpoczęte przez Zakład Geologii Niżu IG systematyczne badania parametrów fizycznych próbek z rdzeni z otworów oporowych oraz badania wybranych horyzontów wodnych przewierconych tymi otworami tak co do wielkości przyływu, jak i składu chemicznego wód pokładowych, pozwalają na próbę związania tych parametrów z geofizycznie pomierzonymi profilami elektrycznych oporów pozornych, potencjałów polaryzacji własnej, naturalnego i wzbudzonego neutronami promieniowania gamma. Do próby takiego związania wykorzystano prace: K. Pawłowskiej „Profil otworu Magnuszew na odcinku permu”, J. Kuchcińskiego „Profil litologiczny utworów karbońskich (Magnuszew)”. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych próbek z odwiertu Magnuszew, opracowanych pod kierunkiem J. Calikowskiego w Laboratorium Skał Bitumicznych IG, prace A. Krassowskiej i S. Depowskiego „Wyniki badania horyzontów wodnych w wierceniu Magnuszew IG” część I i część II.

Szczegółowe profilowanie gamma i neutron-gamma w skali głębokościowej 1:200 zostało wykonane w otworze Magnuszew na głębokości od 2000 do 2663 m w dniu 7 stycznia 1959 r. To profilowanie jest podstawą próby związania wymienionych parametrów. Profile neutronowe pozostałych części otworu w skali głębokościowej 1:500 są z natury rzeczy mniej dokładne. Moc źródła neutronów była za mała i stosunek sztucznie wzbudzonego promieniowania gamma do naturalnego jest za niski dla całości profilu. Stosunek ten jest i na odcinku otworu od 2000 do 2563 m również za niski, aby nie trzeba było redukować profilu natężenia promieniowania neutron-gamma ze względu na naturalne promieniowanie. Wynik takiej redukcji przeprowadzonej co 2 metry przedstawia krzywa oznaczona na załączonej tablicy jako $(n - \gamma)$ — (γ) . Amplituda zmian natężenia sztucznie wzbudzanego promieniowania wynosi 4640 imp/min; samo natężenie waha się od 4980 imp/min do 340 imp/min. Moc źródła neutronów w chwili wykonywania pomiarów nie została ustalona. Do profilowania użyto źródła polonowo-berylowego o początkowej radioaktywności 6 Cu. Okres półrozpadu polonu wynosi 139 dni. Minimum natężenia naturalnego promieniowania gamma wynosi 1320 imp/min. na głębokości 2056 m i maksimum 3170 imp/min. na głębokości 2116,5 m. Jak widzieliśmy w części ogólnej, odchylenia krzywej neutron-gamma od zera można próbować łączyć z porowatością. Na ogół wykresy: porowatość w funkcji odchylenia neutron-gamma: $p = f(n, \gamma)$ wykonuje się na papierze ze skalą logarytmiczną dla porowatości i ze zwykłą skalą dla odchylenia (n, γ) .

Obydwa te parametry tak porowatość, jak i odchylenia (n, γ) — przy sporządzaniu załączonego wykresu $p = f(n, \gamma)$ — również w półlogarytmicznej skali wzięte są dla punktów położonych na tej samej głębokości w otworze. Trzeba jednak zaznaczyć, że

nie można przyjąć, iż dane odchylenie na profilu neutron-gamma odpowiada dokładnie głębokości, z której pobrano rdzeń i próbkę do pomiaru porowatości z rdzenia. Możliwe są pewne wzajemne przesunięcia. Dla wyrównania głębokości odpowiadających danym odchyleniom krzywej na profilu (n, γ) z głębokościami zaznaczonymi przy pobieraniu rdzeni — oparto się na ostrej granicy wyraźnie zaznaczonej przy przejściu od anhydrytów w stropie do dolomitów w spągu na głębokości 2091,6 m. Anhydrytom odpowiada na profilu (n, γ) natężenie sztucznie wzbudzanego przez bombardowanie neutronami promieniowania gamma o wielkości do 5000 imp/min., na przeciwko dolomitów natężenie to spada poniżej 3600 imp/min. Przyczyną dużego natężenia promieniowania (n, γ) w anhydrycie jest niska zawartość w nim wodoru i słabe wskutek tego spowalnianie neutronów, które dopiero w pobliżu detektora promieniowania gamma są pochłaniane. Wyemitowane przy tym promienie gamma docierają nie pochłonięte do licznika Geigera-Müllera i powodują w efekcie zwiększenie przepływu prądu. Zwiększona zawartość wodoru w dolomicie powoduje spowolnienie neutronów na mniejszej odległości od ich źródła. Wyemitowane (dość blisko od źródła) przy pochłanianiu spowolnionych neutronów promieniowanie gamma zanim dotrze do detektora, ulega rozpraszaniu i pochłanianiu.

Pomiary porowatości przeprowadzono na próbkach pobranych nie w regularnych odstępach. Wyników więc tych pomiarów nie można było uśredniać, lecz brano do sporządzenia wykresu $p = f(n, \gamma)$, tak jak je podano we wspomnianym zestawieniu wyników badań laboratoryjnych.

Należy podkreślić, że warunki techniczne na całym omawianym odcinku otworu od 2000 do 2563 m w dniu wykonywania profilowania γ i neutron-gamma (7.I.1959 r.) były takie same. Otwór na tym odcinku był zarurowany rurami o średnicy 6 5/8" i wypełniony wodą.

Głębokościom podanym w zestawieniu J. Calikowskiego przyporządkowano petrograficzne oznaczenie typu skały zgodnie z pracami K. Pawłowskiej i J. Kuchcińskiego. Poszczególne typy skał na wykresie wyodrębniono różnymi oznaczeniami, a poszczególnym punktom przyporządkowano kolejne numery od 1 do 71, odpowiadające liczbie porządkowej od 195 do 264 w zestawieniu J. Calikowskiego.

Obszar zajęty przez punkty na wykresie przedstawia formę trójkąta. Linia prosta pełna (u góry) na tym wykresie przechodzi przez punkty o współrzędnych $p = 0,01$ i $(n, \gamma) = 4250$ imp/min., którymi można scharakteryzować anhydryt, i przez punkt o współrzędnych $p = 0,3$ i $(n, \gamma) = 350$ imp/min., charakterystyczny na ogół dla skał ilastych. Linia środkowa pełna przechodzi równoległe do górnej mniej więcej przez środek ciężkości obszaru zajętego przez punkty. Liniami przerywanymi zaznaczono odchylenia od średniej, mieszczące się w granicach $\pm 100\%$ błędów.

W obszarze między liniami przerywanymi zawarte jest 38 punktów poniżej dolnej linii przerywanej — 14 punktów i powyżej górnej linii przerywanej — 18 punktów.

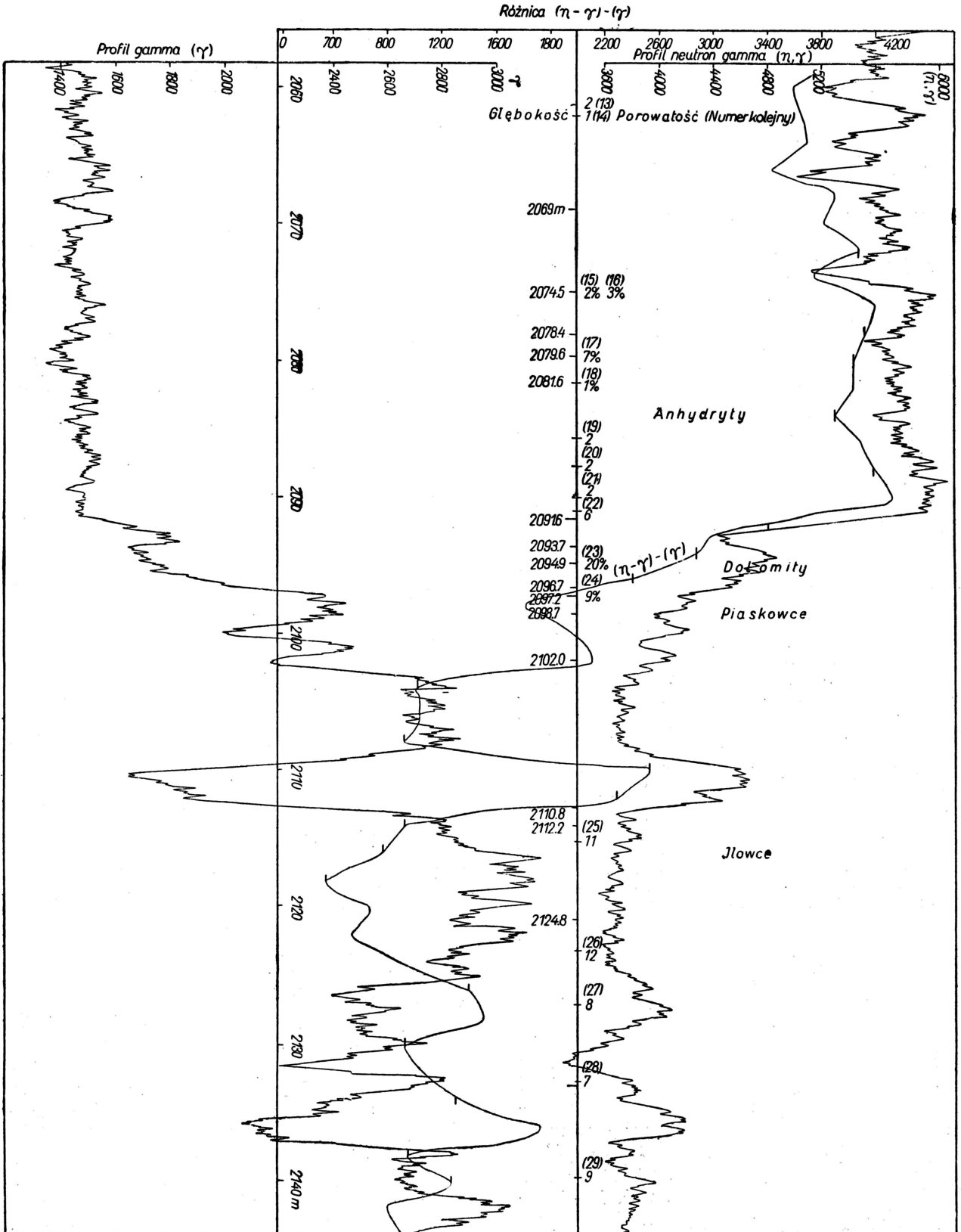
Odchylenia neutron-gamma dla skał występujących powyżej górnej granicy linii stu procentowego błędów są znacznie mniejsze od przeciętnych wychyleń dla skał danego typu o danej porowatości lub przy danych wychyleniach neutron-gamma pomierzona ich porowatość jest za mała w stosunku do przeciętnej. Do 18 skał tej grupy należy 10 mułowców, 6 ilowców i 2 anhydryty.

Odchylenia neutron-gamma dla skał występujących poniżej dolnej granicznej linii stu procentowego błędów są w stosunku do przeciętnych dla skał o danej porowatości za wysokie albo przy danych odchyleniach ich pomierzona porowatość wypada za duża. Do 16 skał tej grupy należy 6 piaskowców, 3 mułowce, 3 dolomity, 1 anhydryt i 1 zlepieniec.

Wykreślona zależność średnich wartości porowatości w funkcji odchyień neutron-gamma wykorzystano dla ustalenia wielkości oporności względnej w funkcji odchyień neutron-gamma. Do tego celu wykorzystano podany w części ogólnej związek między opornością względną a porowatością $F = R_p =$

$$= \frac{a}{p^m} \cdot \text{Dla konkretnego analizowanego przypadku}$$

przyjęto, że dla wapieni i dolomitów $a = 1$, dla piaskowców $a = 0,75$. W jednym i drugim przypadku przyjęto $m = 2$. Dla wapieni i dolomitów



Profile geofizyczne z otworu Magnuszew.

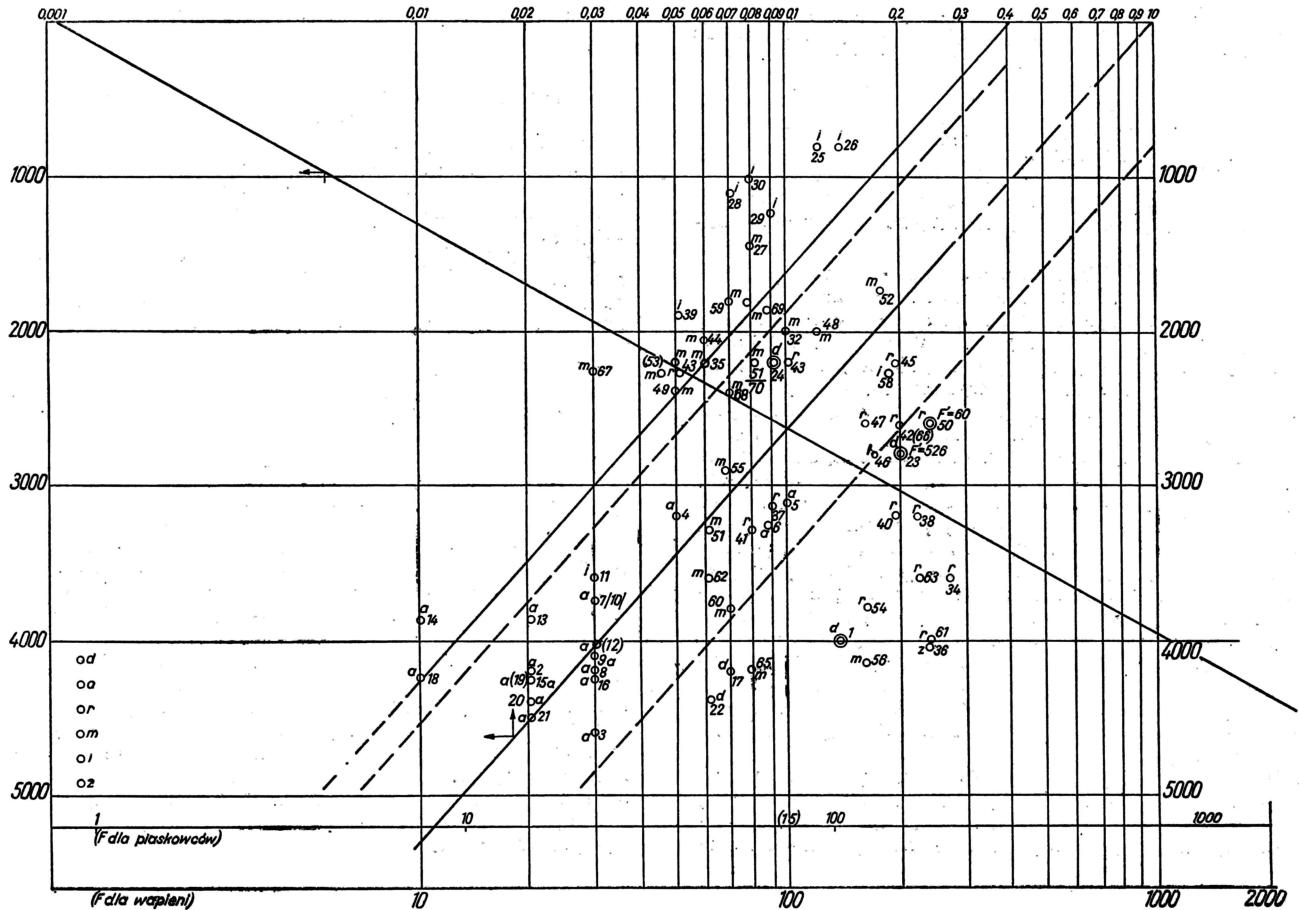
Geophysical profiles of the Magnuszew bore-hole

posłużono się więc zależnością $F = 1,0/p^2$ i dla piaskowców $F = 0,75/p^2$. Linia prosta przechodząca przez punkty $p_1 = 0,1$ i $F_1 = 100$ oraz $p_2 = 0,01$ i $F_2 = 10\,000$ dla wapieni i dolomitów, a przez punkty $p'_1 = 0,1$ i $F'_1 = 75$ oraz $p'_2 = 0,01$ i $F'_2 = 7500$ dla piaskowców, daje nam zależność średnich wartości oporności względnej od odchyień neutronowych.

Z wykresu widać, że iłowcom, mułowcom, anhydrytom i piaskowcom z analizowanego odcinka otworu o tej samej wielkości porowatości nie odpowiada tej samej wielkości oporność względna. Oporność względna, jak to podawano w części ogólnej, zależy bowiem nie tylko od wielkości porowatości, ale i od struktury por, ich przekroju poprzecznego, długości i krętości. Obwody elektryczne, utworzone przez

Wśród skał okruchowych mułowce grupują się na lewo od piaskowców, mając na ogół porowatość niższą niż piaskowce.

Mułowce oznaczone numerami 59, 68, 60 leżą pionowo pod sobą, gdyż mają tę samą porowatość (7%). Różnią się więc między sobą opornością względną. Według J. Kuchcińskiego mułowiec oznaczony numerem 59 jest masywny, miejscami piaskowcowy, numerem 68 — masywny, drobnowarstwowany, miejscami iłowcowy, 55 — miejscami iłowcowy, 60 z kongrecjami żelaziaka ilastego. Oporność względna piaskowca masywnego z głębokości 2340,2 m, oznaczonego nr 45, przy porowatości 19% jest najmniejsza ze wszystkich piaskowców występujących na głębokości od 2000 do 2563 m. Świadczy to może o prostej strukturze por tego piaskowca, o stosunkowo małej ich krętości. Przeciwnie, oporność pia-



Oporność względna w zależności od porowatości.

Relative resistivity depending on porosity

d — dolomity, a — anhydryty, r — piaskowce, m — mułowce, i — iłowce, z — zlepniec

d — dolomites, a — anhydrites, r — sandstones, m — mudstones, i — siltstones, z — conglomerates

elektrolit wypełniający pory skał wewnątrz różnych skał o tej samej porowatości, mogą być różne.

Trzy główne klasy skał, występujące na głębokości od 2000 m do 2563 m: chemiczne, okruchowe i ilaste — dość wyraźnie wyodrębniają się. Anhydryty i dolomity leżą na ogół w lewej dolnej partii obszaru zajętego przez punkty, mułowce i piaskowce na prawo i w górę od nich, iłowce nad tą grupą. Anhydryty oznaczone na wykresie numerami 5 i 6, występujące na głębokości 2015,7 m, 2018,7 m, położone wewnątrz grupy skał okruchowych, nie są to czyste anhydryty, lecz jak to wyraźnie podkreśla K. Pawłowska, anhydryty zailone i jakby zwierzęce. Dolomit oznaczony numerem 1 jest poprzerastany iłami, a dolomit 22 ma niższą porowatość i anhydrytowe wpryski. Dolomity 23 i 24 zawierają solankę.

skowca, drobnziarnistego, drobnowarstwowanego z głębokości 2498,3 m (nr 63) o większej porowatości (21%) jest znacznie większa. Struktura por tego piaskowca byłaby więc bardziej skomplikowana.

Najwyżej na wykresie położone iłowce cechuje, jak na skały ilaste, stosunkowo niska porowatość. Należy jednak mieć na uwadze, że pochodzą one z dość znacznej, bo ponad 2000 m liczącej głębokości.

Zgodnie z opracowywaniami S. Depowskiego i A. Krassowskiej na omawianym odcinku otworu Mag-nuszew zbadano w pięciu miejscach horyzonty wodne. Wyipywy wód po perforacji uzyskane z trzech horyzontów na głębokościach: a) od 2377 m do 2382 m, b) od 2159,5 m do 2162 m i c) od 2093,7 m do 2098,7 m. We wszystkich trzech przypadkach wo-

da była silnie zmineralizowana i tak w przypadku „a” zawierała około 200 g soli na litr, w przypadku „b” 212 gramów soli na litr i w „c” 186 gramów soli na litr. Były to solanki o znacznie przeważającej zawartości chlorku sodu. Elektryczny opór właściwy tych solanek w temperaturze 18° otrzymano z odpowiednich tablic i wynosi on dla „a” i „b” 0,05 Ω m, a dla „c” — 0,053 Ω m.

Średnia temperatura skał według termogramu z dnia 31.XII.1958 wynosiła

58°	w interwale	2377,0—2382,0
53,5°	„	2159,5—2162,5
51,8°	„	2093,7—2098,7

Uwzględniając zmiany oporu właściwego z temperaturą, otrzymano na opór właściwy wód pokładowych następujące wielkości:

0,0025 Ω m	w interwale	2377,0—2382,0
0,0265 Ω m	„	2159,5—2162,5
0,0285 Ω m	„	2093,7—2098,7

Według pomiarów elektrycznych, przeprowadzonych w otworze na interesującym nas odcinku w dniach 29.XII.1957 r. i 10.VI.1958 r., elektryczny opór właściwy skał wynosił:

piaskowców	od 2373,1 do 2382,5	— 1,5 Ω m
„	od 2158,2 do 2162,2	— 7,5 Ω m
dolomitów	od 2091,6 do 2097,2	— 15,0 Ω m

Pozorna oporność względna (F') warstw skalnych będzie się więc według tych danych kształtować następująco:

piaskowców	od 2373,1 do 2382,5 m	— 60
„	od 2158,2 do 2162,2 m	— 282
dolomitów	od 2091,6 do 2097,2 m	— 526

Rzeczywista oporność względna ustalona na podstawie wykresu $F' = f(n, \gamma)$ dla próbki piaskowca nr 30 z głębokości 2377,6 m wynosi 73, dla piaskowców od 2158,2 do 2162,2 (średnia ze wszystkich piaskowców) około 200 i dla dolomitów średnia 290.

Analiza już tych stosunkowo nielicznych danych wykazuje, że na wielkość oporności względnej wpływa nie tylko wielkość porowatości ale i strukturalne właściwości skały i jej skład chemiczny. Zgodnie z Dachnowem w rozważaniach nad opornością względną skał należy brać pod uwagę współczynnik odsortowania ich ziaren i stopień cementacji. Według tegoż autora współczynnik określający zależność oporu właściwego skały od strukturalnych jej właściwości dla skał o porowatości powyżej 10% zmienia się w granicach od 1 do 5. Im bardziej jest skała scementowana, mniej odsortowana i im mniejsza jest porowatość, tym wyższy jest ten współczynnik.

Skład chemiczny skały wpływa na profil neutron-gamma nie tylko ze względu na zawartość w niej wodoru, ale jak to widzieliśmy i w otworze Gorzów (4), w dużym stopniu i ze względu na zawar-

tość pierwiastków, które swymi przekrojami pochłaniania i rozpraszania oraz własnościami spowalniania neutronów znacznie różnią się od otoczenia.

LITERATURA

1. Dachnow W. N. — Intierprietacija riezultatow geofiziceskich issledowanij razriezow skwaziń. Moskwa 1955.
2. Litwinow S. J., Archarow L. W. — Promysłowaja geofizyka. Moskwa 1954.
3. Lebreton F. — Une mesure pratique du facteur de formation des roches. „Revue de l'Institut Français du Pétrole” 1958, nr 11.
4. Roman L. — Profilowanie neutron-gamma. „Przegląd Geologiczny” 1960, nr 4.
5. Wyllie M. R. J. — The fundamentals of electric log interpretations. New York 1957.
6. Turnau-Morawska M. — Petrografia skał osadowych. Warszawa 1954.

SUMMARY

In the first part of paper the author analyses an idea of „relative resistivity of rocks” and gives its genesis. Moreover, two methods of determination of relative resistivity are discussed, viz: direct measurements on samples and determination of the resistivity on the basis of various data of geophysical logging.

In the second part of the work, the author, using materials of the bore-hole Magnuszew IG-I, attempts to relate the physical parameters measured on the core samples of this bore-hole with the diagrams of apparent electric resistances, of self-polarization potentials and of natural gamma radiation as well as of gamma radiation excited by neutrons and obtained as a result of geophysical loggings.

РЕЗЮМЕ

Во вступлении автор рассматривает понятие «относительного сопротивления горных пород» и его происхождение. Затем описывает два метода определения относительного сопротивления: путем непосредственных измерений на образцах и на основании данных геофизических профилирований разного типа.

Во второй части работы, основываясь на материалах из скважины Манушев ИГ I, автор произвел попытку увязки физических параметров, измеренных на пробах из керна этой скважины, с диаграммами кажущегося электрического сопротивления потенциалов собственной поляризации, естественного и возбужденного нейтронами излучения гамма, полученными в результате геофизического профилирования.