

WPLYW RESZTKOWEGO NASYCENIA WODĄ NA WIELKOŚĆ STREFY PRZEMYTEJ PIASKOWCÓW WODONOŚNYCH

UKD 550.832.7:622.243.144.2:556.332.4:552.513

W czasie wiercenia ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki na ogół przewyższa ciśnienie złożowe i w związku z tym następuje przenikanie filtratu płuczki do warstw porowatych i przepuszczalnych. Prowadzi to do wytworzenia się wokół otworu wiertniczego tzw. strefy filtracji (6, 7). Cząstki ilaste płuczki osadzają się na ściance otworu tworząc zbitą warstwę osadu płuczkowego (ryc. 1 (3)). W efekcie do warstwy przenika tylko filtrat płuczki. W czasie powstawania osadu ilastego zmniejsza się stopniowo przenikanie filtratu płuczki wiertniczej ze względu na to, że przepuszczalność wytworzonego na ściankach otworu osadu jest znikoma, zwykle rzędu tysięcznych części miliardarcy (3).

Przy przenikaniu filtratu płuczki w głąb warstwy płyn złożowy czy gaz nasycający pory jest w pełni lub częściowo wypychany do ścianki otworu i zastępowany przez filtrat. W związku z tym własności fizyczne warstw przepuszczalnych, a zatem i oporność właściwa, w pobliżu ścianki otworu różnią się w sposób zasadniczy od własności badanej warstwy. Strefa filtracji silnie wpływa na wyniki pomiarów profilowań geofizyki wiertniczej wykonywanych sondami o niewielkim zasięgu śledzenia.

Charakter strefy filtracji zależy w głównej mierze od litologicznego składu warstwy, struktury porów i rodzaju medium nasycającego warstwę. Rozpatrzmy pokrótce budowę strefy filtracji w jednorodnych piaskowcach nasyconych wodą.

Jak już wspominałem powyżej bezpośrednio do ścianki otworu przylega warstwa osadu ilastego o grubości od kilku do kilkunastu milimetrów (3). Nie będziemy się nią tu bliżej zajmowali. Bezpośrednio za warstwą osadu ilastego znajduje się strefa przemyta. Stanowi ona tę część strefy filtracji, w której praktycznie zakłada się, że woda złożowa w całości jest usunięta przez filtrat płuczki. Wielkość oporności strefy przemytej e_{sp} jest zwykle obliczana w oparciu o oporność względną i oporność filtratu lub bierze się ją bezpośrednio z pomiarów. Grubość strefy przemytej dla piaskowców wynosi około 7 cm (3, 7), a czasami sięga nawet do 15 cm (6). Często jednak w strefie przemytej mamy do czynienia z mieszaniną filtratu i wody złożowej, przy czym objętość filtratu płuczki w stosunku do objętości wody

złożowej maleje ze wzrostem odległości od ścianki otworu. Uważa się, że wówczas ilość wody złożowej stanowi od 5 do 7,5%, a niekiedy nawet do 15% (5, 7, 9).

Pomiędzy strefą przemytą a niezmienioną częścią warstwy mamy jeszcze obszar strefy filtracji, w którym stopniowo ilość filtratu maleje ze wzrostem odległości od ścianki otworu na korzyść płynu złożowego, a oporność w tej strefie zmienia się w sposób ciągły od oporności strefy przemytej e_{sp} do oporności rzeczywistej warstwy e_{pw} (ryc. 1 (3)), która w naszym przypadku jest w 100% nasycona wodą złożową.

W artykule tym zajmiemy się bliżej strefą przemytą. Jak już wspomniano dosyć często filtrat nie w pełni wypiera wodę złożową, co przy przeprowadzaniu interpretacji ilościowej wyników pomiarów geofizyki wiertniczej może być przyczyną dosyć poważnych błędów. Rozważmy wpływ resztkowego nasycenia wodą złożową na wielkość oporności strefy przemytej.

Równanie Archiego (1, 4) dla czystych hydrofilnych skał o porowatości normalnego typu można zapisać w postaci:

$$k_w^2 = \frac{e_{pw}}{e} = \frac{P_p e_{wz}}{e} \quad [1]$$

gdzie k_w — współczynnik nasycenia skały wodą,

e_{pw} — oporność warstwy wodonośnej w 100% nasyconej wodą,

e — oporność rzeczywista warstwy,

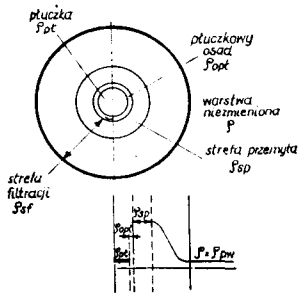
e_{wz} — oporność wody złożowej,

P_p — parametr porowatości.

Ponieważ założyliśmy, że rozpatrywana warstwa stanowi czysty piaskowiec w 100% nasycony wodą ($k_w = 1$) więc [1] można przepisać w postaci:

$$e_{pw} = P_p e_{wz} \quad [2]$$

Dla strefy przemytej równanie [1] przybierze postać



Ryc. 1 Schemat przenikania filtratu płuczki z warstwą wodonośną.

a — schemat budowy strefy przenikania filtratu płuczki w płaszczyźnie prostopadłej do osi otworu wiertniczego, b — schemat zmian oporności w strefie przenikania filtratu płuczki.

Oporność właściwa: e — warstwy, e_{sf} — strefy filtracji, e_{sp} — strefy przemytej, e_{opl} — osadu płuczki, e_{pl} — płuczki wiertniczej.

Fig. 1. Scheme of interpenetration of drilling-mud filtrate and water-bearing bed.

a — scheme of the penetration zone of drilling-mud filtrate at a plane perpendicular to the axis of bore hole, b — scheme of changes in resistance in the zone of penetration of drilling-mud filtrate.

Resistivity: e — of a bed, e_{sf} — of the filtration zone, e_{sp} — of the washed-out zone, e_{opl} — of the drilling-mud sediment, e_{pl} — of the drilling mud.

$$k_{wp}^2 = \frac{P_p e_f}{e_{sp}} \quad [3]$$

gdzie k_{wp} jest współczynnikiem nasycenia skały w strefie przemytej. Przy pełnym nasyceniu $k_{wp} = 1$ i wówczas

$$e_{sp} = P_p e_f \quad [4]$$

Jak widać w równaniu [4] (1, 2, 4) zakłada się, że filtrat w strefie przemytej w całości wypiera wodę złożową, ale jak już napisano wyżej w większości przypadków jest to źródłem błędów przy przeprowadzaniu interpretacji ilościowej materiałów geofizyki wiertniczej. W rzeczywistości oporność strefy przemytej spełnia równanie

$$e_{sp} = P_p e_z \quad [5]$$

gdzie e_z jest opornością mieszaniny filtratu i wody złożowej. Jak wiadomo (5, 7, 8) można przyjąć, że oba składniki mieszaniny są połączone równolegle, a zatem

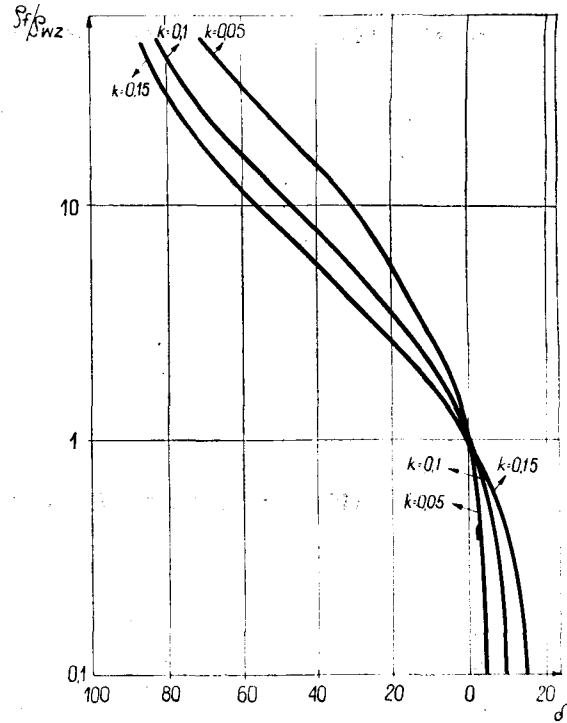
$$\frac{1}{e_z} = \frac{k}{e_{wz}} + \frac{1-k}{e_f} \quad [6]$$

gdzie k — resztkowe nasycenie wodą złożową w strefie przemytej. Jeżeli [6] podstawimy do [5], to otrzymamy po przekształceniu

$$e_{sp} = \frac{P_p e_{wz} e_f}{k e_f + (1-k) e_{wz}} \quad [7]$$

Po wyrażeniu e_{sp} i e_f w stosunku do e_{wz} [7] będzie mogli zapisać w postaci:

$$\frac{e_{sf}}{e_{wz}} = \frac{P_p \frac{e_f}{e_{wz}}}{k \frac{e_f}{e_{wz}} + (1-k)} \quad [8]$$



Ryc. 2. Wykres zależności błędów δ obliczonego z zależności (9) od wartości stosunku q_f/q_{wz} . Parametrem krzywych jest resztkowe nasycenie k wodą złożową w strefie przemytej.

Fig. 2. Diagram of dependence of error δ calculated from the dependence (9) upon the ratio q_f/q_{wz} . Residual saturation k with depositional water in the washed-out zone is here the parameter of curves.

Łatwo zauważyć, że dla $k = 0$ zależność [8] przechodzi w zależność [4].

Korzystając z [8] obliczono wielkość q_{sf}/q_{wz} w zależności od P_p i q_f/q_{wz} dla $k = 0; 0,05; 0,1; 0,15$ (tab. I—IV). Wprawdzie przypadek kiedy $k = 0,15$ jest niezmiernie rzadki niemniej wzięto go pod uwagę. Z wyników widać wyraźnie, że ze wzrostem k obliczona wielkość stosunku q_{sf}/q_{wz} różni się coraz bardziej od wartości tegoż stosunku dla $k = 0$ (tab. I). W celu ilościowego przebadania tych różnic obliczono błąd, wynikający z nieuwzględnienia resztkowego nasycenia wodą złożową w strefie przemytej z zależności:

$$\delta = \frac{\left(\frac{e_{sf}}{e_{wz}}\right)_{k=0} - \left(\frac{e_{sf}}{e_{wz}}\right)_{k=x}}{\left(\frac{e_{sf}}{e_{wz}}\right)_{k=0}} \quad (9)$$

gdzie x wynosi kolejno 0,05; 0,1; 0,15.

Wyniki obliczeń podaje tabela V. Są w niej zamieszczone wartości błędów δ obliczonych z zależności [9] dla trzech przypadków, kiedy $P_p = 10; 50; 500$ oraz trzech wartości $k = 0,05; 0,1; 0,15$. Dla lepszego zilustrowania wyników obliczeń wykonano wykres zależności δ od stosunku q_f/q_{wz} dla różnych wartości k (ryc. 2). Widać z niego, że dla niskich mineralizacji wody złożowej ($q_f/q_{wz} < 1$) lub słonych płuczek wyznaczona z zależności [4] wielkość e_{sp} , bądź wzięta z zależności [7] przy $k = 0$, jest większa od oporności rzeczywistej strefy przemytej. Niemniej jednak dla $q_f/q_{wz} < 1$ błędy są stosunkowo niewielkie. Natomiast dla wysokich mineralizacji wody zło-

Tabela I

Wartości q_{sf}/q_{wz} obliczone wg wzoru [8] dla $k = 0$ w zależności od ustalonych wartości P_p i q_f/q_{wz}

	P_p						
	1	5	10	20	50	100	500
0,1	0,1	0,5	1	2	5	10	50
0,2	0,2	1	2	4	10	20	100
0,5	0,5	2,5	5	10	25	50	250
1	1	5	10	20	50	100	500
q_f/q_{wz} 2	2	10	20	40	100	200	1000
5	5	25	50	100	250	500	2500
10	10	50	100	200	500	1000	5000
20	20	100	200	400	1000	2000	10000
50	50	250	500	1000	2500	5000	25000

Tabela II

Wartości q_{sf}/q_{wz} obliczone wg wzoru [8] dla $k = 0,05$ w zależności od ustalonych wartości P_p i q_f/q_{wz}

	P_p						
	1	5	10	20	50	100	500
0,1	0,105	0,524	1,047	2,094	5,236	10,471	52,356
0,2	0,208	1,042	2,083	4,167	10,417	20,833	104,167
0,5	0,513	2,564	5,128	10,256	25,641	51,282	256,410
1	1	5	10	20	50	100	500
q_f/q_{wz} 2	1,905	9,524	19,048	38,095	95,238	190,476	952,381
5	4,000	10,000	40,000	80,000	200,000	400,000	2000,000
10	6,897	34,483	68,966	137,931	344,828	689,655	3448,276
20	10,256	51,282	102,564	205,128	512,821	1025,641	5128,205
50	14,493	72,464	144,928	289,855	724,638	1449,275	7246,377

Tabela III

Wartość q_{sf}/q_{wz} obliczone wg wzoru [8] dla $k = 0,1$ w zależności od ustalonych wartości P_p i q_f/q_{wz}

	P_p						
	1	5	10	20	50	100	500
0,1	0,11	0,55	1,1	2,2	5,49	10,99	54,95
0,2	0,22	1,09	2,17	4,35	10,87	21,74	108,70
0,5	0,53	2,63	5,26	10,53	26,32	52,63	263,16
1	1	5	10	20	50	100	500
q_f/q_{wz} 2	1,82	4,55	9,09	18,18	45,45	90,91	454,55
5	3,57	17,86	35,71	71,43	178,57	357,14	1785,71
10	5,26	26,32	52,63	105,26	263,16	526,32	2631,58
20	6,90	34,48	68,97	137,93	344,83	689,66	3448,28
50	8,47	42,37	84,75	169,49	423,73	847,46	4237,29

Tabela IV

Wartości q_{sf}/q_{wz} obliczone wg wzoru [8] dla $k = 0,15$ w zależności od ustalonych wartości P_p i q_f/q_{wz}

	P_p						
	1	5	10	20	50	100	500
0,1	0,12	0,58	1,16	2,31	5,78	11,56	57,80
0,2	0,23	1,14	2,27	4,54	11,36	22,73	113,64
0,5	0,54	2,70	5,40	10,81	27,03	54,05	270,27
1	1	5	10	20	50	100	500
q_f/q_{wz} 2	1,74	8,70	17,39	34,78	86,96	173,91	869,56
5	3,12	15,62	31,25	62,50	156,25	312,50	1562,50
10	4,25	21,28	42,55	85,11	212,77	425,53	2127,66
20	5,19	25,97	51,95	103,90	259,74	519,48	2597,40
50	5,99	29,94	59,88	119,76	299,40	598,80	2994,01

Tabela V

Wartości błędu δ popełnionego przy obliczaniu stosunku ρ_{sp}/ρ_{wz} . Obliczenia wykonano trzykrotnie dla $P_p = 10; 50; 500$; wg zależności [9] w %

	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50
$P_p = 10$									
$\delta_{k=0,05}$	4,70	4,15	2,56	0	4,76	20,00	31,03	48,72	71,01
$\delta_{k=0,1}$	10,00	8,50	5,20	0	9,10	28,58	47,37	65,52	83,05
$\delta_{k=0,15}$	15,60	13,65	8,10	0	13,05	37,50	57,45	74,03	88,02
$P_p = 50$									
$\delta_{k=0,05}$	4,72	4,17	2,56	0	4,76	20,00	31,03	48,72	71,01
$\delta_{k=0,1}$	9,80	8,70	5,28	0	9,10	28,57	47,37	65,52	83,05
$\delta_{k=0,15}$	15,60	13,64	8,11	0	13,04	37,50	57,45	74,26	88,02
$P_p = 500$									
$\delta_{k=0,05}$	4,71	4,17	2,56	0	4,76	20,00	31,03	48,72	71,01
$\delta_{k=0,1}$	9,90	8,70	5,26	0	9,10	28,57	47,37	65,52	83,05
$\delta_{k=0,15}$	15,61	13,64	8,11	0	13,04	37,50	57,45	74,02	88,02

zowej ($\rho_f/\rho_{wz} > 1$) wartości obliczonych błędów są bardzo wysokie. Wahają się one w dosyć szerokich granicach i tak np. dla niskich mineralizacji wynoszą one odpowiednio dla $k = 0,05$ do 5%, dla $k = 0,1$ do około 10%, a dla $k = 0,15$ do 16%. Przy przejściu od wartości $\rho_f/\rho_{wz} < 1$ do wartości $\rho_f/\rho_{wz} = 1$ błąd maleje do zera, aby następnie dla wysokich mineralizacji wzrastać i osiąga nawet dla $k = 0,15$ i $\rho_f/\rho_{wz} = 50$ około 88%. Oczywiście najczęściej resztkowe nasycenie jest rzędu 5–7,5% niemniej jednak i przy takiej wartości ($k = 0,05$) błąd jest bardzo duży i dochodzi dla $\rho_f/\rho_{wz} = 50$ do około 71%. Z tabeli V wynika również, iż wielkość błędu popełnionego przy określaniu ρ_{sp} w przybliżeniu nie zależy od parametru porowatości P_p , ale tylko od wielkości k i stosunku ρ_f/ρ_{wz} .

W celu wyznaczenia resztkowego nasycenia k wodą złożową w strefie przemytej możemy skorzystać z zależności [8] przekształconej do postaci:

$$k = \frac{\rho_{pw}\rho_f - \rho_{sp}\rho_{wz}}{\rho_{sp}(\rho_f - \rho_{wz})} \quad [10]$$

WNIOSKI

1. W strefie przemytej zawsze zostaje pewna ilość wody złożowej i należy to uwzględnić przy interpretacji ilościowej wyników pomiarów geofizyki wiertniczej. Najczęściej resztkowe nasycenie wodą złożową w strefie przemytej wynosi 5–10%.

2. Błąd wynikający z nieuwzględnienia resztkowego nasycenia wodą złożową w strefie przemytej powoduje, że wyznaczona wartość oporności strefy przemytej dla niskich mineralizacji przewyższa wartość rzeczywistą, a dla wysokich mineralizacji jest od niej niższa (obszar ujemnych błędów na ryc. 2. Znak ujemny wskazuje na to, że wartość rzeczywista jest wyższa od wartości pozornej). Powoduje to błędy w określaniu współczynnika porowatości i współczynnika nasycenia wodą w oparciu o parametry strefy przemytej.

3. Wielkość błędu popełnionego przy określaniu ρ_{sp} w przybliżeniu nie zależy od wartości parametru porowatości, lecz od resztkowego nasycenia wodą złożową w strefie przemytej i wielkości stosunku ρ_f/ρ_{wz} .

4. Współczynnik resztkowego nasycenia wodą w strefie przemytej można obliczyć z zależności [10].

LITERATURA

1. Archie G. E. — The electrical resistivity log as an aid in determination some reservoir characteristics. Trans. AIME 146, 54 (142), 1942.

- Martin M. — Sowriemienyje sostojanije i ispolzowanije metodow elektriceskogo i radio-aktywnogo karotaża. Prom. Geofiz., 1960, wyp. 3.
- Perkow N. A. — Interpolacija riezultatow karotaża skważin. Moskwa, 1963.
- Pirson S. J. — Ocienka płastow po danych karotaża. Prom. Geofiz., 1960, wyp. 3.
- Pirson S. J. — Uczienije o nieftianom płastie. Moskwa, 1961.
- Plewa S. — Geofizyka wiertnicza. Wyd. Geol., 1970.
- Sprawocznik geofizika. T. II, Moskwa, 1961.
- Witte L. — Relations between resistivities and fluid contents of porous rocks. Oil a. Gas Journ. 1950, No. 8.
- Wendelsztejn B. J. — Niekotoryje swiedeniya o metodach opriedieleniya parametrov nieftiegazonosnych płastow po dannym promysłowo-geofiziceskich issledowanij primieniajemych za rubieżom. Geofiz. i gidrodinamicz. issled. płastow i skważin. Moskwa, 1960.

SUMMARY

It has been shown experimentally (5), that about 5–10 per cent and sometimes more of the original connate water is not replaced by the mud filtrate in the invaded zone. It may lead to errors during quantitative interpretation of the results of the well log measurements. In the case, when this error caused by the presence of the original connate water in the invaded zone is not taken into consideration, the determining value of the resistivity ρ_{sp} of the invaded zone for low mineralization is higher than the negative sing points to the fact, that the true value is lower (zone of negative errors shown in Fig. 2. The negative sing points to the fact, that the true value is higher than the apparent one). It leads to serious errors in computations of the coefficients of porosity and water saturation basing on the parameters of the invaded zone.

The value of the error which was made by appointing ρ_{sp} is almost independent from the resistivity formation factor P_p . It depends only on the presence of the original connate water in the invaded zone and on the ratio ρ_f/ρ_{wz} .

The coefficient of residual water saturation in the invaded zone can be calculated from the formula (10).

РЕЗЮМЕ

В статье приведены правила вычисления коэффициента остаточного водонасыщения пластовой водой в промытой зоне. Пренебрежение этим ко-

эффициентом в количественной интерпретации данных каротажа скважин может привести к довольно крупным ошибкам (автор определяет их величину), вызывающим значительные расхождения между интерпретируемыми и действительными условиями.