

Jadwiga Zalewska, Dariusz Cebulski
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Wyniki laboratoryjnych badań właściwości elektrycznych skał

Wprowadzenie

Analiza rdzeni wiertniczych, mająca na celu określenie właściwości elektrycznych skał, opiera się na dwóch empirycznych równaniach przedstawionych przez Archie'go [1]. Relacje te określają związki między opornością skały i wody złożowej oraz porowatością i nasyceniem wodą złożową. Poprzez zastosowanie tych związków można oszacować zasoby ropy i gazu – pod warunkiem, że prawidłowo scharakteryzowane są warunki złożowe, takie jak: temperatura, oporność wody złożowej i zwilżalność.

W interpretacji materiałów geofizyki wiertniczej, w przypadku braku informacji o wielkości parametrów Archie'go (wskaźnika struktury porowej m i zwilżalności n) przyjmowane są standardowo wartości m i n jako równe 2. Jednak badania laboratoryjne elektrycznych parametrów prowadzone na rdzeniach wiertniczych w różnych ośrodkach [4, 6, 7, 9] wykazały, że parametry te mogą

przyjmować wartości różne od 2. Na szczególną uwagę w tym względzie zasługuje praca LaTorraca i Hall [7], która podaje, że wykładniki nasycenia mogą wykazywać „anomalnie” niskie wartości – bliskie jedności, a nawet mniejsze. W pierwszym momencie nie uznano tych wyników, uważając je za błędne, ostatecznie jednak zrozumiano, że wyniki laboratoryjne nie były błędne i niskie wartości n (w szczególności w piaskowcach eolicznych) zostały zaakceptowane. Natomiast Herrick i Kennedy [4] twierdzą, że wykładnik nasycenia może być anomalnie duży i przyjmować wartość 4 lub większą.

Celem pracy było określenie wielkości wskaźników struktury porowej i zwilżalności skał zbiornikowych czerwonego spągowca rejonu Cicha Góra–Paproć na podstawie pomiarów elektrycznej oporności próbek skał, pobranych z rdzeni wiertniczych.

Metodyka badań

Badania elektrycznych parametrów skał, w tym elektrycznej oporności właściwej (ρ), parametru porowatości (Pp), wskaźnika struktury porowej (m) i zwilżalności (n) wykonano według metodyki opracowanej przez prof. Z. Bał [2]. W pomiarach zastosowano miernik ESCORT ELC 3131D. Jest to układ mostkowy, w którym jedną gałąź stanowi badana próbka, zaś drugą – opornik dekadowy, który służy do zrównoważenia mostka, a równocześnie wskazuje opór

elektryczny próbki. Parametr porowatości Pp wyznaczono z zależności $Pp = Ro/Rw$, (gdzie: Ro – oporność próbki w 100% nasyconej solanką, Rw – oporność solanki nasycającej próbkę). Wskaźnik struktury porowej m oceniono z relacji $Pp = Kp^m$ (gdzie: Kp – porowatość). Wskaźnik zwilżalności n określano z równania $Rt = Ro \times Sw^n$ (gdzie: Ro – oporność próbki w pełni nasyconej solanką, Rt – oporność próbki częściowo nasyconą solanką, Sw – nasycenie).

Wyniki badań

Pomiary wykonano na 226 próbkach reprezentujących utwory czerwonego spągowca, pochodzących z 8 otworów

wiertniczych (Cicha Góra-5, 9, Kościan-8, Paproć-28, Parzęczewo-1, Ujazd-8, Zielęcín-1 oraz Bonikowo-2) [10].

Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie walca o średnicy 1” i wysokości 30 mm, wysuszonych w temperaturze 110°C. Następnie próbki nasycono wodnym roztworem NaCl o stężeniu 250 g/l w komorze próżniowej, przy ciśnieniu 97 kPa, w czasie 24 godzin.

Wyniki pomiarów elektrycznych parametrów skał przedstawiono w tabelicy 1, z której wynika, że wszystkie wyznaczone parametry mieszczą się w granicach teoretycznych – co pozwala na wykorzystanie ich do obliczeń wartości nasycenia na podstawie danych profilowania otworowego.

Parametr porowatości Pp zmieniał się, jako funkcja porowatości Kp i wskaźnika struktury porowej m , który odzwierciedla geometrię porów i połączeń międzyporowych. Stwierdzono, że im większa jest wartość parametru porowatości, tym niższa jest porowatość, przy czym niedokładności tego trendu można przypisać zmienności krętości struktury porowej wskutek zmian średnic porów i przewężeń porowych. Parametr porowatości analizowanych próbek piaskowców czerwonego spągowca mieścił się w przedziale $Pp = 18,73–1233,23$ (przy wartości średniej równej 189,92) (tablica 1, rysunek 1).

Wskaźnik struktury porowej m , nazywany również wskaźnikiem zwięzłości lub cementacji (ang. *cementation exponent*), jest wielkością charakterystyczną dla danego typu skał i odzwierciedla wpływ struktury porowej na oporność elektryczną.

Wartości wskaźników m dla analizowanych utworów czerwonego spągowca badanego rejonu zmieniały się od 1,29 do 2,64, przy średniej równej 1,86 (tablica 1, rysunek 2), co jest zgodne z danymi przedstawionymi przez Dresser Atlas [3].

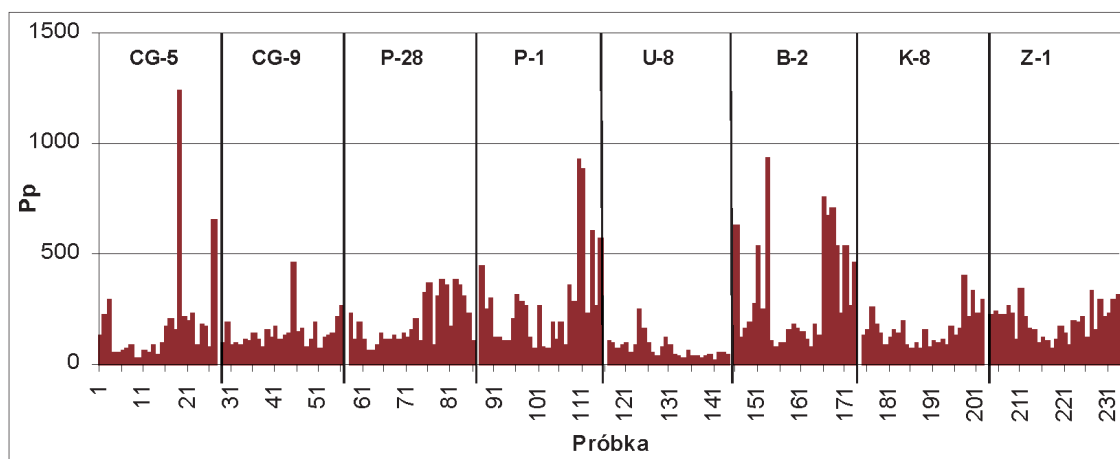
Wskaźnik zwilżalności n (ang. *saturation exponent*) charakteryzuje stopień zwilżenia skały wodą lub ropą.

Yong i Hong [8] twierdzą, że wykładnik nasycenia n jest zazwyczaj bardzo bliski 2, ale wartości uzyskane w ich pomiarach zmieniają się od 0,6 do 7,3. Huang i Brimhall [5] wykazali, że n dla skał zwilżanych wodą zmienia się w zakresie od 1,7 do 2,5, a dla skał zwilżanych ropą – od 2,5 do 20. Dla piaskowców czerwonego spągowca wskaźniki zwilżalności n przyjmowały wartości w granicach 1,22–4,36, a ich średnia wartość wynosiła 2,25 (tablica 1, rysunek 3).

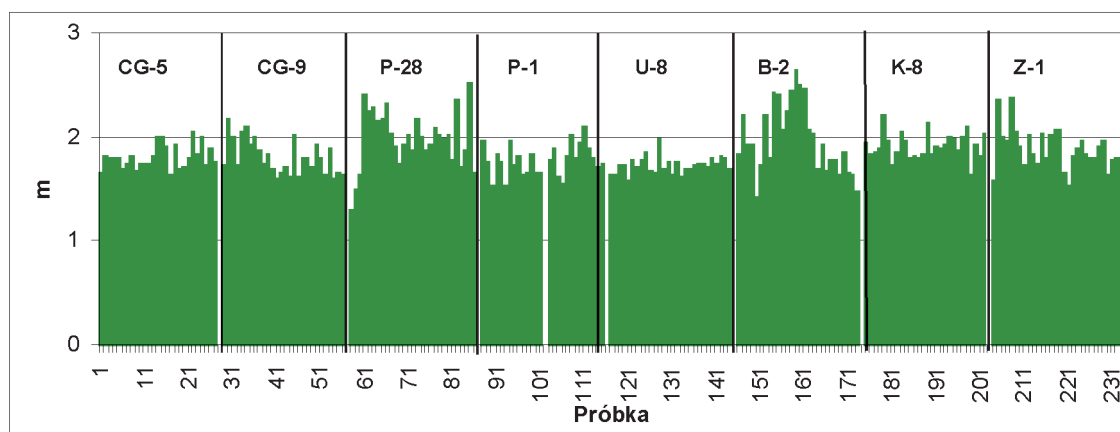
Na rysunku 4 przedstawiono histogramy średnich wartości parametru porowatości oraz wskaźników struktury

Tablica 1. Zakresy zmian i średnie wartości elektrycznych parametrów skał w poszczególnych otworach

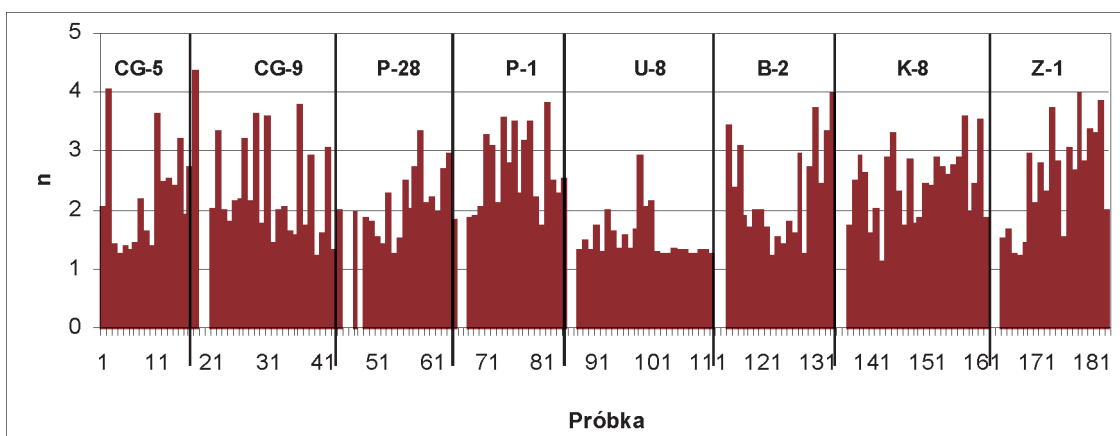
Parametr	Ilość próbek	Zakres zmian parametru	Średnia wartość	Ilość próbek	Zakres zmian parametru	Średnia wartość
	CICHA GÓRA-5			CICHA GÓRA-9		
Elektryczna oporność właściwa [$\Omega \cdot m$]	27	0,93–49,33	7,24	28	2,75–18,14	5,66
Parametr porowatości, Pp	27	23,33–1233,23	180,94	28	68,85–453,55	141,44
Wskaźnik struktury porowej, m	27	1,64–2,04	1,80	28	1,60–2,17	1,80
Wskaźnik zwilżalności, n	18	1,26–4,36	2,29	24	1,23–3,79	2,26
	KOŚCIAN-8			PAPROĆ-28		
Elektryczna oporność właściwa [$\Omega \cdot m$]	28	2,58–15,95	6,26	29	2,29–15,34	7,59
Parametr porowatości, Pp	28	64,50–398,80	156,56	29	57,23–383,40	189,81
Wskaźnik struktury porowej, m	28	1,64–2,21	1,91	29	1,29–2,52	1,98
Wskaźnik zwilżalności, n	25	1,61–3,58	2,48	18	1,26–3,33	2,11
	PARZĘCZEWO-1			UJAZD-8		
Elektryczna oporność właściwa [$\Omega \cdot m$]	28	2,75–36,87	11,08	28	0,75–9,79	2,76
Parametr porowatości, Pp	28	68,65–921,74	276,96	28	18,73–244,81	69,00
Wskaźnik struktury porowej, m	27	1,52–2,11	1,78	28	1,58–1,98	1,73
Wskaźnik zwilżalności, n	18	1,72–3,80	2,67	25	1,25–2,91	1,52
	ZIELEŃCIN-1			BONIKOWO-2		
Elektryczna oporność właściwa [$\Omega \cdot m$]	30	2,67–13,61	7,72	28	3,01–37,12	12,44
Parametr porowatości, Pp	30	66,63–340,14	193,13	28	75,32–928,10	310,98
Wskaźnik struktury porowej, m	30	1,53–2,38	1,88	28	1,42–2,64	1,98
Wskaźnik zwilżalności, n	20	1,23–3,97	2,52	20	1,22–3,96	2,30



Rys. 1. Parametr porowatości P_p – zmierzony na próbkach skał w badanych otworach wiertniczych



Rys. 2. Wskaźnik struktury porowej m – zmierzony na próbkach skał w badanych otworach wiertniczych



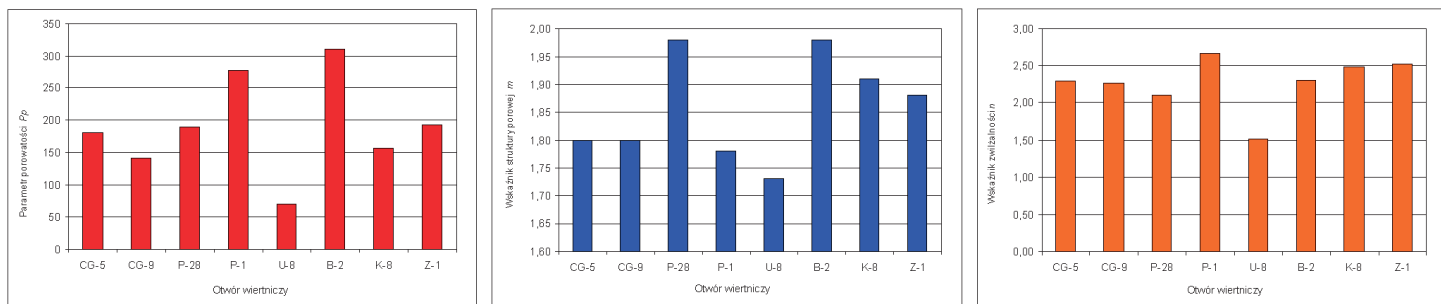
Rys. 3. Wskaźnik zwilżalności n – zmierzony na próbkach skał w badanych otworach wiertniczych

porowej m i zwilżalności n w poszczególnych otworach wiertniczych.

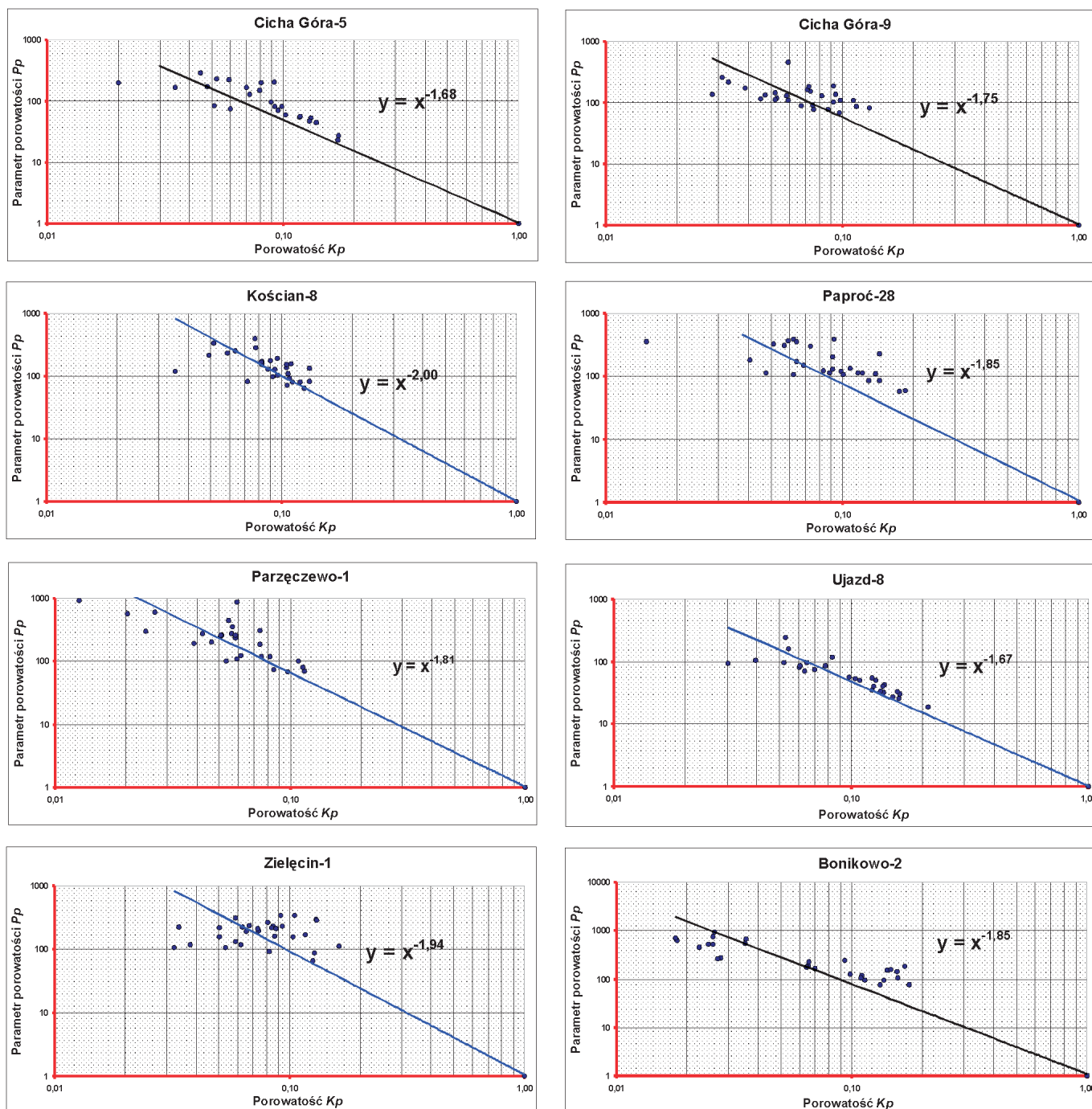
Średnie wartości parametru porowatości P_p w analizowanych otworach wiertniczych są zróżnicowane i zmieniają się od 69 do 311. Najniższą wartość tego parametru wykazują próbki z otworu Ujazd-8, zaś najwyższą – próbki

z otworów: Parzęczewo-1 oraz Bonikowo-2 (odpowiednio średnio $P_p = 277; 311$). W pozostałych otworach średnie wielkości P_p przyjmują wartości z zakresu 141–190.

Średnie wartości wskaźników struktury porowej m w badanych otworach statystycznie nie różniły się od siebie, mieszcząc się w przedziale od 1,73 (Ujazd-8)



Rys. 4. Histogramy średnich wartości parametru porowatości oraz wskaźników struktury porowej m i zwilżalności n w badanych otworach wiertniczych



Rys. 5. Wyznaczenie wskaźnika struktury porowej m metodą regresji liniowej

do 1,98 (Bonikowo-2, Paproć-28), a więc były nieco niższe niż 2.

Większe zróżnicowanie wykazywał wskaźnik zwilżalności n . W otworze Ujazd-8 stwierdzono, że średnia wielkość tego parametru jest najniższa (średnio $n = 1,52$), w porównaniu do pozostałych otworów, w których jego wartość zmieniała się od 2,11 (Paproć-28) do 2,67 (Parzęczewo-1) i tym razem była generalnie wyższa niż zakładane w interpretacji 2.

Zestawiając wartości parametru porowatości Pp i współczynnika porowatości Kp na wykresie logarytmicznym, metodą regresji liniowej można wyznaczyć wartość wskaźnika struktury porowej m , jako stopień nachylenia najlepiej dopasowanej linii funkcji $Pp = f(Kp)$. Wskaźnik ten obliczany jest z równania Archie'go ($Pp = Kp^{-m}$, $m = \log Pp / \log Kp$). Tą metodą określono także wskaźnik m dla badanych otworów formacji czerwonego spągowca, co zostało przedstawione na rysunku 5. Na wykresach tych obserwowany jest dość duży rozrzut punktów, powstaje zatem pytanie – dlaczego? Podobne wykresy sporządzone dla parametru n dawały znacznie lepsze dopasowanie. Oczywiście te ostatnie wartości były określane na podstawie bardziej kontrolowanego eksperymentu, wykonywanego na próbce rdzeniowej.

Tablica 2. Zestawienie wartości wskaźnika struktury porowej m , wyznaczonego różnymi metodami

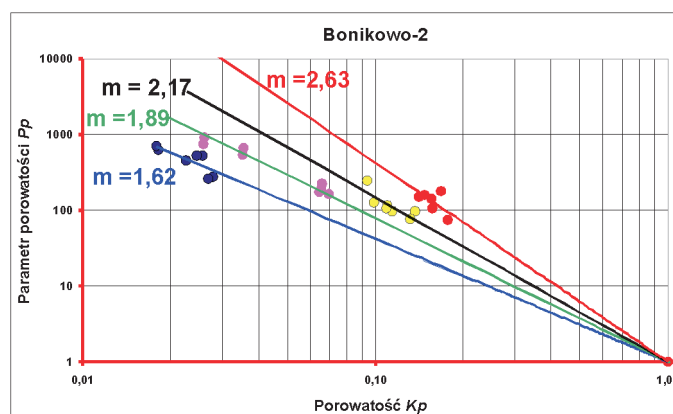
Otwór wiertniczy	Wskaźnik struktury porowej m	
	wyliczony jako średnia arytmetyczna	wyznaczony z regresji
Cicha Góra-5	1,80	1,68
Cicha Góra-9	1,80	1,75
Kościan-8	1,91	2,00
Paproć-28	1,98	1,85
Parzęczewo-1	1,78	1,81
Ujazd-8	1,73	1,67
Zielęcín-1	1,88	1,94
Bonikowo-2	1,98	1,85

W tablicy 2 zestawiono wartości wskaźnika struktury porowej m – wyliczonego jako średnia arytmetyczna z pomiarów laboratoryjnych i wyznaczonego z nachylenia prostej na wykresie funkcji $Kp = f(Pp)$. Analizując tabli-

cę 2 można zauważyć pewne różnice – wyniki otrzymane metodą regresji wydają się być dokładniejsze, gdyż dają lepsze matematyczne dopasowanie.

W otworze Bonikowo-2 wartość wskaźnika struktury porowej m wyznaczonego z badań laboratoryjnych i wyliczonego jako średnia arytmetyczna wynosi 1,98, natomiast wyznaczona z funkcji $Pp = f(Kp)$ przyjmuje wartość 1,85. Niemniej jednak, po szczegółowym przeanalizowaniu otrzymanych wyników, obserwuje się znaczne zróżnicowanie tego parametru – wyraźnie wydzielają się 4 grupy skał, co przedstawiono na rysunku 6.

GRUPA 1; $m = 1,62$; $Kp = 1,78-2,78$ [%] ($n = 7$),
 GRUPA 2; $m = 1,89$; $Kp = 2,61-6,96$ [%] ($n = 8$),
 GRUPA 3; $m = 2,17$; $Kp = 9,36-13,66$ [%] ($n = 7$),
 GRUPA 4; $m = 2,63$; $Kp = 14,09-17,61$ [%] ($n = 6$).



Rys. 6. Zróżnicowanie wskaźnika struktury porowej m w otworze Bonikowo-2

Próbki z omawianego otworu charakteryzowały się zróżnicowanym składem mineralogicznym – we wszystkich głównym minerałem skałotwórczym był kwarc i niekiedy skalenie, zaś minerały akcesoryczne zmieniały się. Grupy 1 i 2 – o najniższych wartościach zarówno wskaźnika m (odpowiednio $m = 1,62$ i $1,89$), jak i porowatości (Kp) – zawierały w swym składzie minerały akcesoryczne kalcyt i miki oraz minerały z grupy illitu, chloryt, dolomit i hematyt. Prawdopodobnie obecnością hematytu należy tłumaczyć zmniejszenie elektrycznej oporności właściwej skał, a tym samym i parametru m . Próbki z grupy 3 ($m = 2,17$) nie zawierały hematytu. Grupa 4 ($m = 2,63$) nie zawiera ani kalcytu, ani hematytu.

Artykuł nadesłano do Redakcji 01.04.2009 r. Przyjęto do druku 15.02.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Archie G.E.: *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 146, p. 54–62, 1942.
- [2] Bal Z.: *Eksperymentalne określenie wskaźników struktury i zwilżalności skał zbiornikowych paleozoiku na podstawie pomiarów elektrycznej oporności próbek*. Prace Instytutu Naftowego, Wyd. Śląsk, Katowice 1975.
- [3] Dresser Atlas: *Well logging and interpretation techniques*. Dresser industries, INC, USA, p. 286–289, 1982.
- [4] Herrick D.C., Kennedy W.D.: *Electrical properties of rocks*. Effects of secondary porosity, laminations, and thin beds, paper C, Society of Professional Well Log Analysts, 1996.
- [5] Huang L.J., Brimhall R.M.: *Influence of wettability of rocks on logging parameters*. 94th International Logging Conference, p. 14–21, 1994.
- [6] Kennedy W.D., Herrick D.C.: *Conductivity Anisotropy in Shale-Free Sandstone*. Petrophysics, vol. 45, no. 1, p. 38–58, 2004.
- [7] LaTorraca G.A., Hall C.G.: *Observations of rock fabric controls on the electrical properties of sandstone*. SCA Conference Transactions Society of Core Analyst, Paper 9116, p. 1–16, 1991.
- [8] Yong S.H., Hong Y.M.: *Integrated interpretation and numerical processing of logging data*. Petroleum Industry Press, p. 24–33, 1982.
- [9] Zaafran Z.M.: *Studying the effect of sandstone anisotropy on the quantitative interpretation of resistivity sounding and logging*. SPWLA, paper BB, June p. 23–26, 1981.
- [10] Zalewska J., Gąsior I., Klaja J., Cebulski D., Przelaskowska A.: *Wyznaczanie rozkładów nasycenia wodą skał w rejonie Cicha Góra–Paproc z wykorzystaniem metody jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR)*. Archiwum INiG, zlec. 522/SW, 2005.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.



Mgr inż. Dariusz CEBULSKI – absolwent Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, specjalność geofizyka. Obecnie pracuje w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Zajmuje się badaniem petrofizycznych własności skał zbiornikowych.

ZAKŁAD GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Zakres działania:

- trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
- określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek skał i kamienia cementowego metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR);
- oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- interpretacja profilowań geofizycznych w zakresie oceny stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach wiertniczych;
- wyznaczanie kategorii zwiercalności skał na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, w korelacji z fizyko-mechanicznymi i sprężystymi właściwościami rdzeni wiertniczych.

Kierownik: mgr inż. Jadwiga Zalewska

Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków

Telefon: 12 653-25-12 wew. 132 lub 165

Faks: 12 650-67-70, 12 653-16-65

E-mail: jadwiga.zalewska@inig.pl