

STANISŁAW DUBIEL*, BARBARA ULIASZ-MISIAK**

Analiza statystyczna parametrów zbiornikowych utworów jury górnej-kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego uzyskanych z testów RPZ i pomiarów geofizycznych

Wprowadzenie

Podłoże zapadliska przedkarpackiego jest wciąż strefą poszukiwań złóż węglowodorów, w której istotne znaczenie mają utwory węglanowe jury górnej-kredy dolnej. Wydzielone metodami geofizyki wiertniczej poziomy skał zbiornikowych w osadach wieku górnej jury-dolnej kredy, potencjalnie gazo- i roponośne, poddano testom złożowym rurowymi próbnikami złoża. Badania wykonywano najczęściej w nieorurowanych odcinkach otworów wiertniczych, a rzadziej w orurowanych – po wcześniejszej perforacji rur okładzinowych. Analizowane testy RPZ przeprowadzono w latach 1993–1997 w węglanowych utworach jury górnej-kredy dolnej, występujących w podłożu centralnej części zapadliska przedkarpackiego, w obszarze Bochnia–Dębica–Mędrzechów–Radwan.

Skały zbiornikowe górnej jury-dolnej kredy zawierają istotne nagromadzenia węglowodorów; odkryto w nich złoża ropy naftowej (Brzezówka, Korzeniów, Dąbrowa Tarnowska, Partynia-Podborze, Jastrząbka Stara) i gazu ziemnego (Dąbrowa Tarnowska, Tarnów i ostatnio Łapanów) (Kuśmierk 2004).

Zarówno odkryte już akumulacje węglowodorów, jak i interwały utworów jury górnej-kredy dolnej typowane na podstawie badań geofizyki wiertniczej do testów złożowych RPZ znajdują się w poziomach, których cechy zbiornikowe związane są ze sprzyjającą facją skał węglanowych, modyfikowaną procesami diagenetycznymi. Skały te charakteryzują się

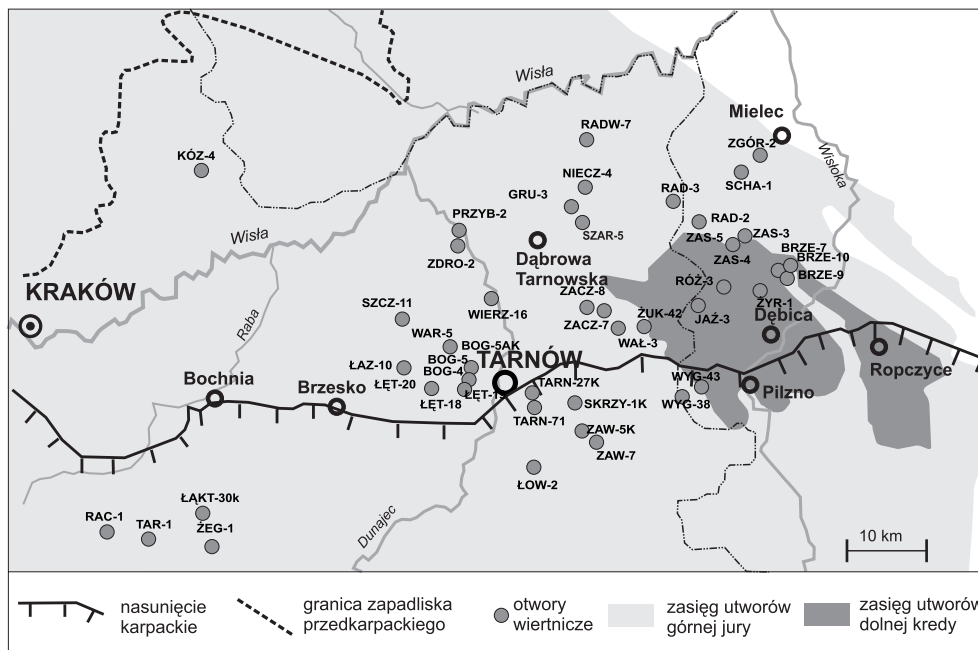
* Prof. dr hab. inż. ** Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Inżynierii Naftowej; e-mail: dubiel@wnaft.agh.edu.pl

znaczną heterogenicznością, związaną ze zróżnicowaniem facjalnym wapieni i dolomitów. Ich systemy porowo-szczelinowe ukształtowane zostały przez różne, czasem nakładające się procesy geologiczne. Ostateczne wykształcenie facjalne tych poziomów zdecydowało o typie przestrzeni porowej skał zbiornikowych (Krajewski i in. 2011; Moryc E., Moryc W. 2007).

Przedstawione w pracy wyniki analiz statystycznych właściwości zbiornikowych i parametrów złożowych utworów jury górnej-kredy dolnej mogą być użyteczne na różnych etapach dowiercania, opróbowania i eksploatacji złóż węglowodorów w tych utworach w analizowanym obszarze geologicznym.

1. Analiza rozkładu wartości właściwości zbiornikowych i parametrów złożowych utworów górnej jury-dolnej kredy

Obszar badań obejmuje środkową część zapadliska przedkarpackiego, od Bochni po Dębice (rys. 1). Na wschód od tego obszaru brak jest utworów jury górnej, które stwierdzono ponownie w okolicach Lubaczowa. Na zachód strop utworów jury górnej podnosi się, tworząc w rejonie Krakowa wychodnie (Gutowski i in. 2011).



Rys. 1. Zasięg utworów jury górnej i kredy dolnej na obszarze środkowej części zapadliska przedkarpackiego (na podst. Gutowski i in. 2011 ze zmianami)

Fig. 1. Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation extend in the central part of the Carpathian Foredeep (after Gutowski et al. 2011, with changes)

Na analizowanym obszarze zwarty, węglanowy kompleks górnourajski zalega na utworach jury środkowej lub triasu albo niezgodnie na osadach paleozoiku lub prekambriu. Utwory kredy dolnej występują w rejonie Dębicy–Ropczyc.

Na utworach węglanowych jury i kredy zalegają niezgodnie osady miocenu. W okolicach Krakowa kompleks ten ma miąższość około 300 m, natomiast w rejonie Rzeszowa jego miąższość rośnie i wynosi nawet 1300 m. Węglanowe utwory jury górnej tworzą stosunkowo ciągłą sekwencję o wzrastających miąższościach kelowej-oksford około 150–250 m, kimeryd około 400 m, tyton około 500 m (Gutowski i in. 2007; Kossakowski i in. 2012; Krajewski i in. 2011; Maksym i in. 2001).

Utwory jury górnej reprezentowane są przez trzy główne sekwencje osadowe o różnej miąższości i zróżnicowanym udziale facji marglisto-węglanowych: oksfordu, kimerydu i tytonu-walanżynu. Górne części profilu większej części górnourajskich osadów, były poddane procesom dolomityzacji i dedolomityzacji (Krajewski i in. 2011).

Analizie poddano właściwości zbiornikowe (miąższość efektywną, porowatość, przepuszczalność) oraz parametry złożowe (gradient ciśnienia złożowego, wskaźnik wydobycia wody złożowej) utworów węglanowych górnej jury-dolnej kredy centralnej części zapadliska przedkarpackiego (tab. 1). Przebadano rozkład empiryczny poszczególnych wielkości sporządzając szeregi rozdzielcze i histogramy ich wartości liczbowych.

1.1. Analiza parametrów złożowych uzyskiwanych z badań RPZ

Gradient ciśnienia złożowego obliczono na podstawie ciśnienia złożowego określonego metodą Hornera (Dubiel i in. 2003). Wartość gradientu ciśnienia złożowego w utworach jury górnej-kredy dolnej był analizowany na podstawie 68 wyników testów RPZ, waha się ona w zakresie 0,007745–0,011016 MPa/m. Średnia wartość gradientu ciśnienia w analizowanym zbiorze wynosi 0,009826 MPa/m, odchylenie standardowe 0,32, mediana 0,009889 MPa/m. Około 65% wartości gradientu ciśnienia (44) mieści się w granicach 0,009–0,01 MPa/m (rys. 2). Rozkład gradientu ciśnienia złożowego wykazuje umiarkowaną asymetrię lewostronną (skośność: $-1,11263$), większość obserwacji ma wartość większą niż średnia. Wartość kurtozy oszacowana dla gradientu ciśnienia złożowego wynosi 3,52, co świadczy o skupieniu wartości gradientu ciśnienia wokół średniej. Gradient ciśnienia badanych utworów jury górnej-kredy dolnej charakteryzuje się małą zmiennością, według klasyfikacji Baryszewa (Mucha 1994) – współczynnik zmienności wynosi 5,7%.

Wskaźnik wydajności wydobycia wody złożowej z utworów jury górnej-kredy dolnej określono na podstawie 55 testów RPZ, wartość tego parametru waha się w zakresie 0,001442–1,936594 m³/h. Średnia wielkość wskaźnika wydajności w analizowanym zbiorze wynosi 0,439501 m³/h, odchylenie standardowe 0,513329, mediana 0,211909 m³/h. Około 68% wartości wskaźnika (37) mieści się w granicach 0,001442–0,5 m³/h (rys. 3). Rozkład wartości wskaźnika wydajności wykazuje asymetrię prawostronną (skośność: 1,357066),

Zestawienie analizowanych otworów

Analyzed wells

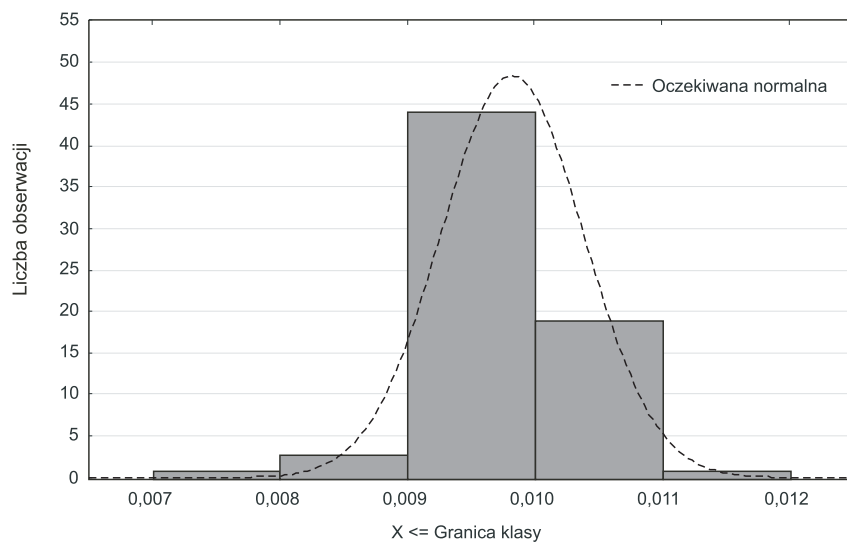
Lp.	Otwór wiertniczy	Numer zapięcia RPZ	Badany interwał [m]	Rodzaj płynu dopływającego do RPZ
1.	Bog-4	37/93	1578–1608	woda złożowa ze śladami gazu
2.	Bog-5	22/95	1533–1549	woda złożowa nagazowana z domieszką płuczki i ropy
3.	Bog-5	25/95	1549–1558	woda złożowa słabo nagazowana, z domieszką płuczki i ropy
4.	Bog-5	30/95	1558–1576	woda złożowa słabo nagazowana
5.	Brzeź-10	14/95	1366–1375	woda złożowa silnie nagazowana
6.	Brzeź-7	107/94	1318–1353	woda złożowa słabo nagazowana, z domieszką płuczki
7.	Brzeź-9	40/95	1501–1514	woda złożowa silnie nagazowana z domieszką płuczki
8.	Jaź-3	89/96	1494–1525	woda złożowa bez śladów gazu
9.	Kóz-4	114/96	657–702	woda złożowa z domieszką płuczki bez śladów gazu
10.	Łąk-30k	108/95	2954–2965	woda złożowa ze śladami gazu
11.	Łęt-18	145/93	1557–1590	woda złożowa nagazowana, zapach H ₂ S
12.	Łęt-19	76/95	1484–1503	woda złożowa słabo nagazowana
13.	Łęt-19	79/95	1516–1533	woda złożowa ze śladami gazu
14.	Łęt-20	12/98	1507–1542	woda złożowa lekko nagazowana
15.	Łow-2	139/93	2976–2993	woda złożowa ze śladami gazu
16.	Łow-2	141/93	2955–2966	woda złożowa nagazowana
17.	Łow-2	144/93	2675–2707	woda złożowa ze śladami gazu
18.	Łow-2	36/93	2652–2752	woda złożowa słabo nagazowana, z domieszką płuczki
19.	Przyb-2	73/97	1708–1728	woda złożowa lekko nagazowana
20.	Rad-2	146/93	1082–1125	woda złożowa nagazowana
21.	Rad-2	153/93	1139–1210	woda złożowa ze śladami gazu
22.	Radw-7	4/94	550–706	woda złożowa z domieszką płuczki, bez śladów gazu
23.	Róż-3	118/96	1409–1441	woda złożowa silnie nagazowana, z domieszką płuczki

TABELA 1 cd.

TABLE 1 cont.

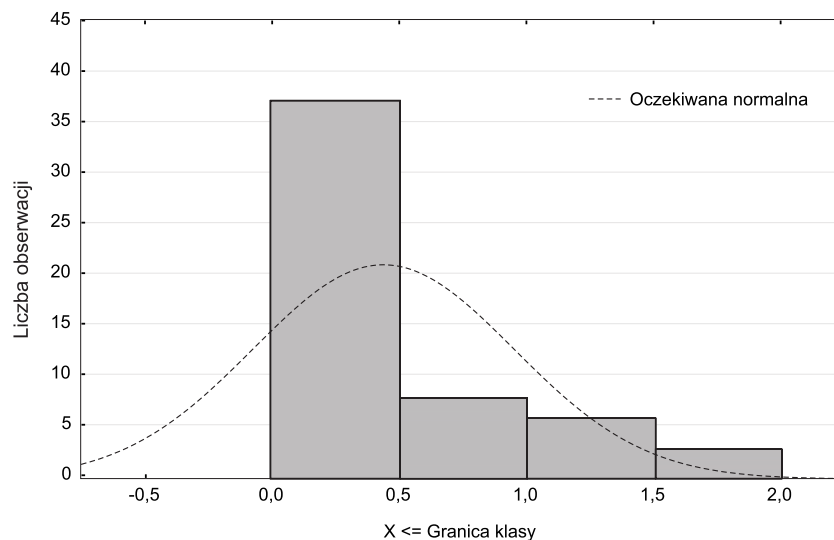
Lp.	Otwór wiertniczy	Numer zapięcia RPZ	Badany interwał [m]	Rodzaj płynu dopływającego do RPZ
24.	Schab-1	49/93	1054–1150	woda złożowa słabo nagazowana z domieszką płuczki
25.	Skrzy-1k	33/94	2002–2048	woda złożowa z domieszką płuczki, ze śladami gazu
26.	Skrzy-1k	35/94	2002–2048	woda złożowa silnie nagazowana, z domieszką płuczki
27.	Skrzy-1k	46/94	2002–2015	woda złożowa słabo nagazowana
28.	Szar-5	160/94	830–843	woda złożowa słabo nagazowana
29.	Tarna-1	77/96	2692–2710	woda złożowa nagazowana
30.	Tarn-71	23/95	1841–1864	woda złożowa silnie nagazowana z domieszką płuczki i śladami ropy
31.	Wary-5	21/94	1524–1565	woda złożowa z domieszką płuczki ze śladami gazu
32.	Wierzch-16	52/97	1868–1904	woda złożowa lekko nagazowana
33.	Wyg-38	142/93	2207–2241	woda złożowa ze śladami gazu
34.	Wyg-38	150/93	2286–2332	woda złożowa nagazowana z domieszką płuczki
35.	Wyg-38	157/93	2337–2379	woda złożowa nagazowana
36.	Wyg-38	166/93	2305–2314	woda złożowa nagazowana
37.	Wyg-43	135/94	2069–2088	woda złożowa ze śladami gazu i ropy
38.	Zacz-7	147/94	1234–1319	woda złożowa słabo nagazowana, z domieszką płuczki
39.	Zacz-8	47/96	1280–1299	woda złożowa z domieszką płuczki bez śladów gazu
40.	Zas-4	114/95	1324–1376	woda złożowa średnio nagazowana, z domieszką płuczki
41.	Zas-5	8/96	1178–1230	woda złożowa średnio nagazowana, z domieszką płuczki
42.	Zaw-5k	110/93	2238–2248	woda złożowa słabo nagazowana
43.	Zaw-5k	81/93	2422–2489	woda złożowa średnio nagazowana
44.	Zaw-5k	99/93	2360–2382	woda złożowa silnie nagazowana, z domieszką płuczki
45.	Żuk-42	49/97	1483–1492	woda złożowa lekko nagazowana
46.	Żuk-42	53/97	1635–1701	woda złożowa słabo nagazowana
47.	Żyr-1	63/93	1491–1540	woda złożowa ze śladami gazu

większość obserwacji ma wartość mniejszą niż średnia. Wartość kurtozy oszacowana dla wskaźnika wydajności wody złożowej wynosi 0,894484; świadczy to o rozproszeniu wartości wokół średniej. Wskaźnik wydajności wody złożowej uzyskiwanej z badanych utworów jury górnej-kredy dolnej charakteryzuje się bardzo dużą zmiennością, według klasyfikacji Baryszewa (Mucha 1994) – współczynnik zmienności wynosi 116,8%.



Rys. 2. Rozkład wartości gradientu ciśnienia złożowego utworów jury górnej-kredy dolnej

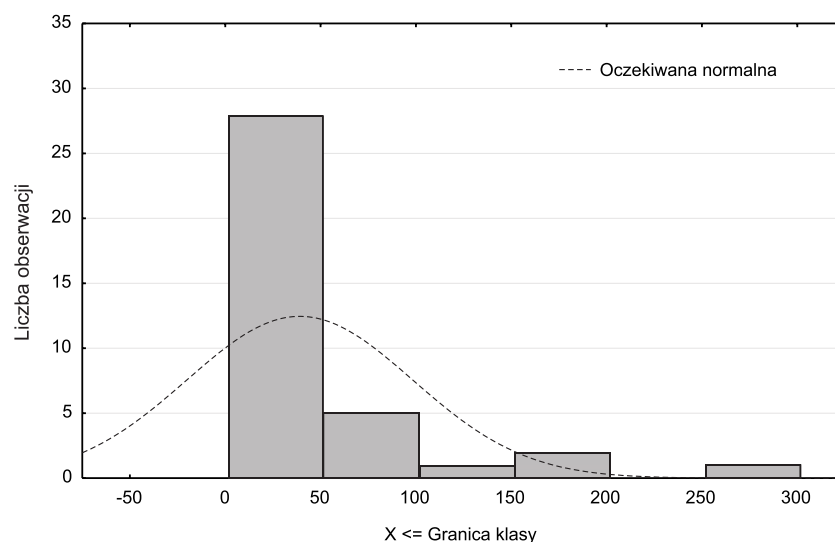
Fig. 2. Reservoir pressure gradient histogram, Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation



Rys. 3. Rozkład wartości wskaźnika wydajności wydobycia wody złożowej z utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 3. Water production coefficient histogram, Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation

Przepuszczalność efektywna utworów jury górnej-kredy dolnej, określona na podstawie 37 testów RPZ waha się w zakresie 0,15–255 mD. Średnia przepuszczalność efektywna w analizowanym zbiorze wynosi 39,09 mD, odchylenie standardowe 59,26, mediana 17 mD. Około 73% wartości przepuszczalności (28) mieści się w granicach 0,15–50 mD (rys. 4). Rozkład przepuszczalności wykazuje silną asymetrię prawostronną (skośność: 2,39), większość obserwacji ma wartość mniejszą niż średnia. Wartość kurtozy oszacowana dla przepuszczalności wynosi 5,54, co świadczy o skupieniu wartości przepuszczalności wokół średniej. Przepuszczalność efektywna badanych utworów charakteryzuje się skrajnie dużą zmiennością, według klasyfikacji Baryszewa (Mucha 1994) – współczynnik zmienności wynosi 151,6%. Należy zauważyć, że to może być spowodowane między innymi szkodliwym wpływem warunków dowiercania i oprobowania na przepuszczalność efektywną (Dubiel, Falkowicz, 2001).

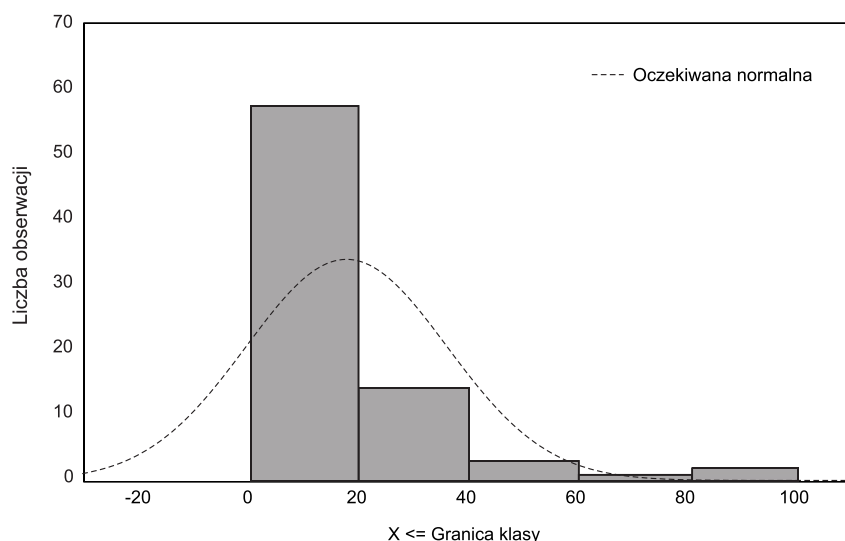


Rys. 4. Rozkład wartości przepuszczalności efektywnej utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 4. Effective permeability histogram, Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation

1.2. Analiza właściwości zbiornikowych uzyskiwanych z pomiarów geofizyki wiertniczej

Rozkład wartości miąższości efektywnej utworów węglanowych przebadano opierając się na danych z 77 odwiertów. Miąższość efektywna zmienia się w granicach od 2 do 96 m. Średnia miąższość efektywna w analizowanym zbiorze wynosi 17,92 m, odchylenie standardowe 18,19, mediana 11 m. Większość wartości miąższości (57) mieści się w granicach 2–20 m, drugi pod względem liczności (14) jest przedział miąższości pomiędzy 20–40 m (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład wartości miąższości efektywnej utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 5. Effective thickness histogram, Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation

Rozkład miąższości efektywnej wykazuje silną asymetrię prawostronną (skośność: 2,62), większość obserwacji ma wartość mniejszą niż średnia. Wartość kurtozy obliczona dla zbioru wartości miąższości efektywnej wynosi 8,05, co świadczy o skupieniu wartości wokół średniej. Miąższość efektywna badanych utworów górnej jury-dolnej kredy charakteryzuje się dużą zmiennością, według klasyfikacji Baryszewa (Mucha 1994) – współczynnik zmienności wynosi 101,5%.

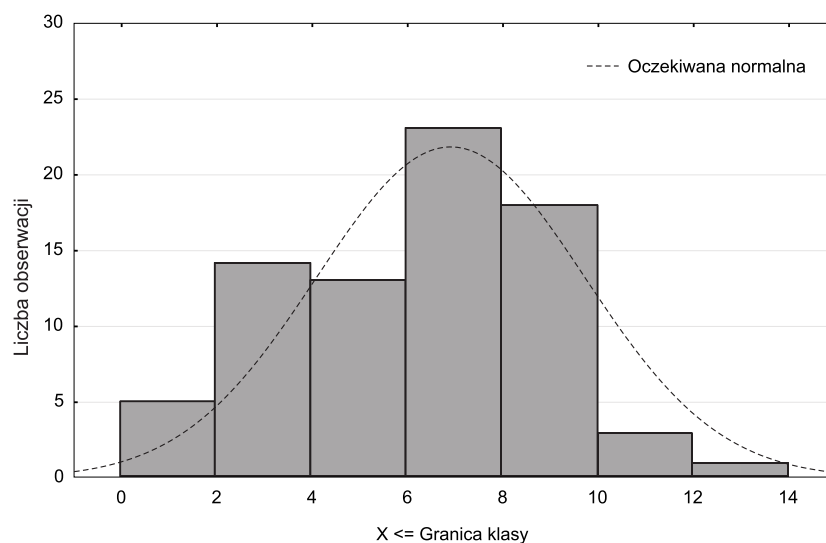
W analizie współczynnika porowatości całkowitej utworów jury górnej-kredy dolnej określonego metodami geofizyki wiertniczej uwzględniono jego średnie (ważone) wartości. Korzystano przy tym ze wzoru, w którym wagą jest wartość miąższości efektywnej wydzielonych odcinków porowatych badanego interwału:

$$\overline{\Phi_{sr}} = (\Phi_1 \cdot h_1 + \Phi_2 \cdot h_2 + \dots + \Phi_n \cdot h_n) / (h_1 + h_2 + \dots + h_n) \quad (1)$$

gdzie:

- $\overline{\Phi_{sr}}$ – średnia, ważona wartość współczynnika porowatości [%],
- Φ_1 do Φ_n – współczynnik porowatości wydzielonych (n -tych) odcinków badanego, nieoruwanego interwału otworu wiertniczego [%],
- h_1 do h_n – miąższość efektywna wydzielonych (n -tych) odcinków badanego, nieoruwanego interwału, charakteryzujących się porowatością ogólną 2% lub większą [m].

Porowatość całkowita utworów jury górnej-kredy dolnej zbadana w 77 pomiarach waha się w zakresie 2–14%. Średnia porowatość w analizowanym zbiorze wynosi 6,9%, od-



Rys. 6. Rozkład wartości porowatości utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 6. Porosity histogram, Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation

chylenie standardowe 2,81, mediana 7%. Najliczniej (23) reprezentowana jest klasa wartości porowatości w granicach 6–8%, drugi pod względem liczebności (18) jest przedział porowatości pomiędzy 8–10% (rys. 6). Rozkład porowatości wykazuje quasi asymetrię lewostronną (skośność: $-0,037$), większość obserwacji ma wartość większą niż średnia. Wartość kurtozy obliczona dla porowatości wynosi $-0,61$, świadczy to o rozproszeniu wartości porowatości wokół średniej. Porowatość całkowita badanych utworów jury górnej-kredy dolnej charakteryzuje się zmiennością na pograniczu przeciętnej i dużej, według klasyfikacji Baryszewa (Mucha 1994) – współczynnik zmienności wynosi 40,7%.

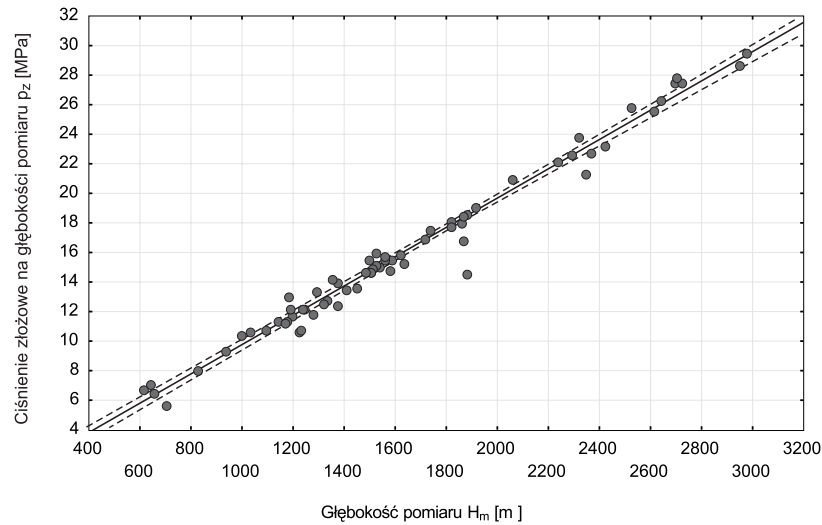
2. Analiza regresji dwóch zmiennych parametrów złożowych

2.1. Zależność ciśnienia złożowego od głębokości

Przeanalizowano zależność ciśnienia złożowego w funkcji głębokości pomiaru rurowym próbnikiem złoża dla 68 testów złożowych przeprowadzonych w utworach jury górnej-kredy dolnej centralnej części zapadliska przedkarpackiego (Dubiel i in. 1993–1998). Na podstawie wykresu rozrzutu punktów, dla badanej zależności dobrano model liniowy (rys. 7) mający postać: $y = ax + b$ oraz oszacowano współczynniki modelu a i b metodą najmniejszych kwadratów.

Otrzymano następujące równanie regresji liniowej:

$$p_z = 0,00992 \cdot H_m - 0,1522 \quad (2)$$



Rys. 7. Zależność ciśnienia złożowego od głębokości dla utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 7. Relationship between the pressure and the depth of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous formation

gdzie:

p_z – ciśnienie złożowe [MPa],

H_m – głębokość umieszczenia rejestrującego ciśnieniomierza węglbnego [m].

Porównując obliczoną wartość współczynnika korelacji $r = 0,9900$ z wartością krytyczną tego współczynnika $r_\alpha = 0,2387$ – odczytaną z tablic statystycznych (Zieliński 1972), dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ – można stwierdzić, że model ten (2) bardzo dobrze nadaje się do prognozowania wartości ciśnienia złożowego (p_z w MPa) na zadanej głębokości (w zakresie głębokości 400–3000 m p.p.t. H_m w m).

2.2. Zależność przepuszczalności efektywnej od porowatości całkowitej

Metodami analizy statystycznej, na podstawie wykresu rozrzutu, dobrano zależność $\log k$ od Φ_{geof} , uzyskując zadawalającą wartość współczynnika korelacji. Równanie regresji, wyznaczone na poziomie istotności 0,05, z określeniem 95-procentowych przedziałów ufności, przy współczynniku korelacji $r = 0,52381$ (wartość krytyczna $r_{kr} = 0,3246$), dla zakresu głębokości zalegania utworów jury górnej od 657 do 2993 m, w analizowanym obszarze:

$$\log k = 0,15229 \cdot \Phi_{geof} - 0,0231 \quad (3)$$

Równanie (3) może być przydatne do prognozowania współczynnika przepuszczalności fazowej dla wody złożowej w węglanowych skałach zbiornikowych górnej jury-dolnej kredy podłoża zapadliska przedkarpackiego, szczególnie w centralnym obszarze tej jednostki.

2.3. Zależność wskaźnika wydobywania wody złożowej od miąższości efektywnej

Przeanalizowano zależność wskaźnika wydobywania wody złożowej od miąższości efektywnej dla 42 badań rurowym próbnikiem złoża.

Wskaźnik wydobywania wody złożowej (WW_s w $\text{m}^3/\text{h}/\text{MPa}$) określa się na podstawie wyników pomiaru przyrostu objętości wody złożowej w przewodzie próbnikowym z uwzględnieniem średniej arytmetycznej depresji ciśnienia wytworzonej na badane skały zbiornikowe (Dubiel, Uliasz-Misiak 2010).

$$WW_s = \frac{Q}{\Delta p_{\text{śr}}} \quad (4)$$

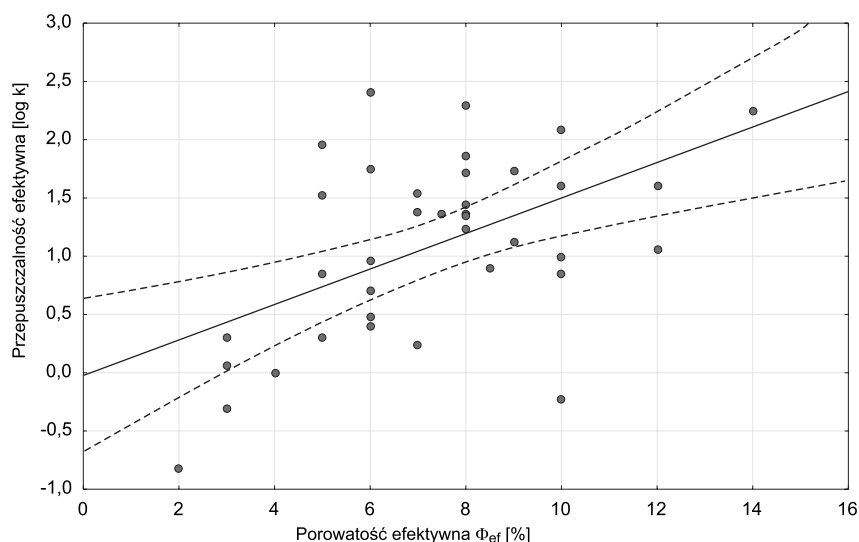
Na podstawie wykresu rozrzutu punktów, dla zależności wskaźnika wydobywania wody złożowej od miąższości efektywnej dobrano model liniowy (rys. 8) mający postać: $y = ax + b$ oraz oszacowano współczynniki modelu a i b metodą najmniejszych kwadratów.

Otrzymano następujące równanie regresji liniowej:

$$WW_s = 0,01954 \cdot h_{ef} + 0,12123 \quad (5)$$

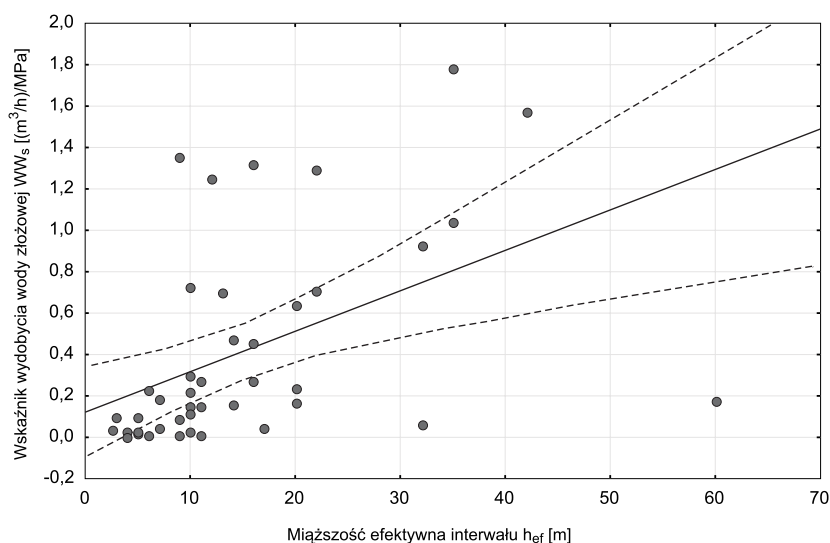
gdzie:

WW_s – wskaźnik wydobywania wody złożowej [$\text{m}^3/\text{h}/\text{MPa}$].



Rys. 8. Zależność przepuszczalności efektywnej od porowatości efektywnej utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 8. Relationship between the permeability coefficient and effective porosity of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation



Rys. 9. Zależność wskaźnika wydobycia wody złożowej od miąższości efektywnej dla utworów jury górnej-kredy dolnej

Fig. 9. Relationship between the water production coefficient and effective thickness of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation

Porównując obliczoną wartość współczynnika korelacji $r = 0,46733$ z wartością krytyczną tego współczynnika $r_{\alpha} = 0,3081$ – odczytaną z tablic statystycznych (Zieliński 1972), dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ – można stwierdzić, że model ten nadaje się do prognozowania wykładnika wydobycia wody złożowej (WW_s) przy określonej miąższości efektywnej (h_{geof} w m).

3. Dyskusja stopnia wiarygodności wyników badań i analiz

Wyniki testów rurowymi próbnikami złoża przeprowadzonymi w węglanowych utworach jury górnej-kredy dolnej na obszarze Bochnia–Dębica–Mędrzechów–Radwan przeanalizowano pod kątem ich wiarygodności. Z analizy statystycznej wyeliminowano wyniki testów RPZ (łącznie 16 przypadków), w których nie uzyskano dokładnych danych dotyczących wydajności przyływu płynu do próbника, głównie z powodu:

- zbyt dużego udziału płuczki w płynie dopływającym do próbника (zwykle ponad 50% obj.);
- bardzo silnego nagazowania wody złożowej, brak możliwości określenia wydajności gazu i wody;
- bardzo małego dopływu płynów (ropa, woda, gaz, emulsja), o objętościach mniejszych niż 1 m^3 .

Analizie poddano 47 wyników testów rurowym próbnikiem złoża z interwałów skał węglanowych jury górnej-kredy dolnej, w których uzyskano przypiływy następujących rodzajów płynu dopływającego do próbnika:

- przypiływ solanki o różnym stopniu nagazowania gazem ziemnym, względnie ze śladami gazu, stwierdzono w około 55,3% przypadków;
- przypiływ płuczki wiertniczej wraz z płynem złożowym stwierdzono w około 32% przypadków;
- objawy ropy, stwierdzono w około 8,5% przypadków;
- przypiływ solanki bez śladów węglowodorów stwierdzono w około 4,2% przypadków.

Wzory do prognozowania ciśnienia złożowego, przepuszczalności efektywnej i wskaźnika wydobywania wody złożowej zaproponowane w artykule nadają się w różnym stopniu do przewidywania wartości tych parametrów.

Równanie na prognozowanie ciśnienia złożowego wykazuje najlepszą korelację ciśnienia od głębokości i umożliwia prognozowanie wartości tego ciśnienia z największą dokładnością i wiarygodnością.

Zależność przepuszczalności od porowatości jest skorelowana w mniejszym stopniu, co może być spowodowane znacznymi błędami, którymi często obarczone są wyniki badań geofizyki wiertniczej oraz testów złożowych RPZ. Błędy te związane są ze zmianami przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej spowodowanymi wnikaniem cząstek stałych i kolmatantów ciekłych (np. emulsja wodno-ropna) w poziom skał zbiornikowych. Głębokość penetracji tych cząstek zależy w głównej mierze od rodzaju przestrzeni porowej skały oraz ciśnienia różnicowego (represji ciśnienia płuczki w otworze) i jest największa w przypadku szczelinowego lub porowo-szczelinowego kolektora jakim są utwory jury górnej-kredy dolnej.

Zmiany pierwotnej przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyotworowej mogą zachodzić pod wpływem procesu wiercenia otworu (duża represja ciśnienia płuczki wiertniczej) oraz sposobu udostępnienia poziomu zbiornikowego (perforacja rur okładzinowych). Dokonano analizy porównawczej zmian tej przepuszczalności na podstawie wyników pierwszego i drugiego cyklu testów odbudowy ciśnienia. Wykazała ona, że zmiany te mogą mieć charakter:

- mechaniczny – oddziaływanie świdra lub koronki, perforacja okładziny odwiertu;
- hydrodynamiczny (pod wpływem zmian ciśnienia różnicowego) – procesy kolmatacji lub dekolmatacji ośrodka porowo-szczelinowego oraz zmiany rozwartości szczelin;
- fizykochemiczny – oddziaływanie filtratu płuczkowego na skałę zbiornikową (pęcznienie minerałów ilastych), a także na płyny złożowe (tworzenie się emulsji wodno-ropnej lub wytrącanie soli);
- kolmatacyjny – blokada przestrzeni porowej skały zbiornikowej cząstkami stałymi z płuczki wiertniczej (cząstkami ilastymi, polimerami, solami, rdzą, blokatorami, zwiercinami); szczególnie istotnym zjawiskiem jest wtórna krystalizacja soli (Dubiel, Falkowicz 2001).

Zmiany przepuszczalności względnej skał wpływają na wielkość przypiływu wody złożowej do próbnika. Prawdopodobnie jest to również przyczyną uzyskania tylko słabej korelacji pomiędzy wskaźnikiem wydobywania wody złożowej a miąższością efektywną.

Wnioski końcowe

1. Poziomy skał zbiornikowych jury górnej-kredy dolnej podłoża zapadliska przedkarpackiego, ze względu na znaczną heterogeniczność związaną z rozwojem facjalnym, stwarzają duże trudności w opracowywaniu charakterystyki złożowej nawet w obrębie niewielkiego, wydzielonego obszaru.
2. Analiza statystyczna właściwości zbiornikowych utworów górnej jury-dolnej kredy wskazuje na dużą zmienność w przypadku miąższości efektywnej, przeciętną w przypadku porowatości całkowitej i skrajnie dużą w przypadku przepuszczalności efektywnej.
3. Bardzo zróżnicowana jest zmienność parametrów złożowych, a mianowicie gradient ciśnienia złożowego charakteryzuje się małą zmiennością, natomiast wydajność wody złożowej bardzo dużą zmiennością.
4. Wyznaczone metodami analizy statystycznej równania regresji nadają się do prognozowania wartości ciśnienia złożowego, współczynnika przepuszczalności efektywnej oraz wskaźnika wydobywania wody złożowej w węglanowych skałach zbiornikowych jury górnej-kredy dolnej, w analizowanym obszarze poszukiwań naftowych.
5. Stwierdzona, zadawalająca wartość korelacji między współczynnikami $\Phi_{geof.}$ i k_{RPZ} potwierdza istnienie związku pomiędzy tymi parametrami, mimo znacznego wpływu zarówno facji skał zbiornikowych, jak i sposobu dowiercania oraz opróbowania. Dobrym potwierdzeniem tego wniosku byłoby stwierdzenie korelacji między przepuszczalnością określoną laboratoryjnie a przepuszczalnością geofizyczną, jednak brak odpowiednich danych laboratoryjnych uniemożliwia wykonanie tego rodzaju analizy porównawczej.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.190.555

LITERATURA

- Dubiel S., Ryzczeniak M. i in., 1993–1998 – Analiza i interpretacja wyników badań rurowymi próbnikami złoża warstw perspektywicznych w rejonie Przedgórze Karpat, w celu oceny właściwości zbiornikowych skał i parametrów złożowych poszczególnych poziomów. Praca naukowo-badawcza. Archiwum WWNiG-AGH Kraków.
- Dubiel i in. 2003 – Dubiel S., Chrząszcz W., Ryzczeniak M., 2003 – Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków.
- Dubiel S., Falkowicz S., 2001 – The effect of saline muds and brines on the permeability of gas bearing sandstones – a laboratory report. Archiwum Górnictwa, Vol. 46, nr 3, s. 357–373.
- Dubiel S., Uliasz-Misiak B., 2010 – Przegląd wyników badań rurowymi próbnikami złoża mezozoicznych poziomów wodonośnych Nizżu Polskiego. Gospodarka Surowcami Mineralnymi i Energią t. 26, z. 3, s. 67–84.
- Gutowski i in. 2007 – Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek L., Świetlik B., Gliniak P., 2007 – Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat. Biuletyn PIG 426, s.1–26.
- Kossakowski i in. 2012 – Kossakowski P., Więclaw D., Kotarba M.J., Kowalski A., 2012 – Habitat and hydrocarbon potential of the Mesozoic strata in the Kraków–Rzeszów area (SE Poland). Geological Quarterly, 56 (1), s. 139–152.

- Kuśmierz J., 2004 – Systemy naftowe: pierwotny potencjał węglowodorowy a zasoby prognostyczne ropy naftowej i gazu ziemnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 20, z. 3, s. 27–54.
- Krajewski i in. 2011 – Krajewski M., Matyszkiewicz J., Król K., 2011 – Facies of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous deposits from the southern part of the Carpathian Foredeep basement in the Kraków–Rzeszów area (southern Poland). *Annales Soc. Geol. Pol.* vol. 81, nr 3, s. 269–290.
- Maksym i in. 2001 – Maksym A., Baszkiewicz A., Gregosiewicz Z., Liszka B., Zdanowski P., 2001 – Środowiska sedymentacji i właściwości zbiornikowe utworów najwyższej jury i kredy dolnej rejonu Brzeźówka–Zagorzyce na tle budowy geologicznej S części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* vol. 49, nr 5, s. 401–407.
- Moryc E., Moryc W., 2011 – Górnourajski-?dolnokredowy kompleksy węglanowe w rejonie Dąbrowy Tarnowskiej-Szczucina (Przedgórze Karpat). *Biuletyn PIG*, 447, s. 25–48.
- Mucha J., 1994 – Metody geostatystyczne w dokumentowaniu złóż. Skrypt, Wyd. AGH Kraków, s. 155.
- Zieliński R., 1972 – Tablice statystyczne. Wyd. PWN, Warszawa.

ANALIZA STATYSTYCZNA PARAMETRÓW ZBIORNIKOWYCH UTWORÓW JURY GÓRNEJ-KREDY DOLNEJ ZAPADLISKA PRZEDKARPACKIEGO UZYSKANYCH Z TESTÓW RPZ I POMIARÓW GEOFIZYCZNYCH

Słowa kluczowe

Analiza statystyczna, skały węglanowe, jura górna, kreda dolna, zapadlisko przedkarpackie, parametry złożowe, właściwości zbiornikowe

Streszczenie

W publikacji przedstawiono wybrane wyniki analizy statystycznej właściwości zbiornikowych i parametrów złożowych utworów jury górnej-kredy dolnej określone na podstawie wyników testów rurowymi próbnikami złoża (RPZ) oraz badaniami geofizycznymi, przydatne przy opracowywaniu charakterystyki geologicznej złóż węglowodorów w utworach górnej jury-dolnej kredy.

Właściwości zbiornikowe (porowatość ogólna, miąższość efektywna) oraz parametry złożowe (przepuszczalność, gradient ciśnienia złożowego i wskaźnik wydobycia wody złożowej) jury górnej-kredy dolnej, usystematyzowano w postaci histogramów, w celu scharakteryzowania ich rozkładu i wyznaczenia wartości średnich. Wyznaczone średnie wartości mogą być wykorzystane przy projektowaniu procesów dowiercania, oprobowania i eksploatacji złóż węglowodorów w utworach górnej jury-dolnej kredy.

Wartość ciśnienia złożowego określona na podstawie wyników testów złożowych RPZ stanowi podstawę symulacji złożowych, a także projektowania konstrukcji otworów wiertniczych, technologii dowiercania oraz eksploatacji złoża. Metodami analizy statystycznej wyznaczono równanie regresji liniowej zmian ciśnienia złożowego w funkcji głębokości zalegania skał węglanowych jury górnej- kredy dolnej. Równanie to może być wykorzystywane do prognozowania wartości ciśnienia w danym rejonie wierceń.

Cechy produkcyjne badanych poziomów perspektywicznych jury górnej-kredy dolnej oceniono na podstawie zmian wskaźnika wydobycia wody złożowej (wydatek przypadający na jednostkę depresji ciśnienia) w funkcji miąższości efektywnej. Uzyskana korelacja pozwala na prognozowanie wskaźnika wydobycia wody złożowej na podstawie miąższości efektywnej w badanych utworach.

Cechą skał zbiornikowych, od której w znacznym stopniu zależy wielkość wskaźnika wydobycia tak wody złożowej, jak też i węglowodorów, jest ich przepuszczalność. Zróznicowane zależności pomiędzy porowatością i przepuszczalnością występujące w skałach węglanowych są często przyczyną trudności i niejednoznaczności w interpretacji wyników testów złożowych. Metodami analizy statystycznej stwierdzono – dla wybranego obszaru poszukiwań naftowych – zadawalającą korelację między przepuszczalnością efektywną dla wody określoną testami RPZ, a porowatością oszacowaną na podstawie pomiarów geofizyki wiertniczej, nadającą się do prognozowania wartości przepuszczalności skał jury górnej-kredy dolnej.

STATISTICAL ANALYSIS OF RESERVOIR PARAMETERS OF THE UPPER JURASSIC-LOWER CRETACEOUS FORMATION
IN THE CARPATHIAN FOREDEEP OBTAINED FROM DST TESTS AND GEOPHYSICAL SURVEYS

Key words

Statistical analysis, carbonate rocks, Upper Jurassic, Lower Cretaceous, reservoir parameters, Carpathian Foredeep, DST tests, reservoir properties

Abstract

This article presents selected results of statistical analysis of reservoir properties and reservoir parameters of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation in the Carpathian Foredeep. Reservoir properties and parameters were based on the results of drillstem tests (DST) and geophysical surveys. These results allowed for geological characterization of hydrocarbon deposits in the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formations.

Reservoir properties (total porosity, effective thickness) and reservoir parameters (permeability, reservoir pressure gradient, and water production coefficients) of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation have been arranged in the form of histograms in order to define the distribution of average values. Average values can be used in drill up operations, well tests, and exploitation of hydrocarbon deposits in the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation.

Methods of statistical analysis determined the linear regression equation of reservoir pressure changes as a function of Upper Jurassic-Lower Cretaceous carbonate formation depth. This equation can be used to estimate the reservoir pressure in the drilling area. Production parameters of the geological formation have been examined based on changes in the water production coefficient (flow rate per unit pressure depression), which can be predicted as a function of the effective thickness of the tested formation.

Water production coefficient as well as hydrocarbons production coefficient depends largely on reservoir rocks permeability. The relationship between porosity and permeability in carbonate rocks often causes difficulties and ambiguities in the interpretation of reservoir test results. This analysis, however, found a satisfactory correlation between the effective water permeability from DST tests and porosity estimated from well logs in the selected area of petroleum exploration. This correlation will be suitable for predicting the permeability of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous formation.