

**Stanisław Dubiel\*, Adam Zubrzycki\*, M. Maruta\***

**ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI  
ZBIORNIKOWYCH SKAŁ WĘGLANOWYCH  
NA PODSTAWIE WYNIKÓW TESTÓW RPZ  
I POMIARÓW GEOFIZYKI WIERTNICZEJ  
(GÓRNOJURAJSKIE PODŁOŻE  
ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO)\*\***

**1. WSTĘP**

Węglanowe skały zbiornikowe zawierając istotne nagromadzenia węglowodorów stanowią ważny obiekt poszukiwań naftowych. Równocześnie skały te charakteryzują się znaczną heterogenicznością, związaną ze zróżnicowaniem facjalnym wapieni i dolomitów. Ich systemy porowo-szczelinowe ukształtowane zostały przez różne, czasem nakładające się procesy geologiczne. Istotną cechą skał zbiornikowych, od której zależy w znacznym stopniu wielkość wydobycia węglowodorów, jest ich przepuszczalność. Zróżnicowane zależności pomiędzy porowatością i przepuszczalnością występujące w skałach węglanowych są często przyczyną trudności i niejednoznaczności w interpretacji wyników testów złożowych [6, 7].

W pracy podjęto próbę ustalenia zależności (korelacji) pomiędzy wielkością współczynnika porowatości całkowitej, wyznaczonej metodami geofizyki wiertniczej ( $\Phi_{geof.}$ ), a wielkością współczynnika przepuszczalności ( $K_{DST}$ ) obliczonego na podstawie wyników testów złożowych RPZ. Testy zostały wykonane w latach 1993–1997 w profilach węglanowych utworów górnej jury, budujących podłoże centralnej części zapadliska przedkarpackiego, w obszarze Bochnia – Dębica – Mędrzechów – Radwan.

Wydzielone metodami geofizyki wiertniczej poziomy skał zbiornikowych w profilu górnej jury, potencjalnie gazonośne, poddano testom RPZ najczęściej w nieorurowanych

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

\*\* Praca wykonana została w ramach badań statutowych Katedry Inżynierii Naftowej Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH

odcinkach otworów wiertniczych, a rzadziej w orurowanych, po wcześniejszej perforacji okładziny otworu wiertniczego. Używano próbników amerykańskich firmy Halliburton (typu Standard lub Ful-Flo) oraz firmy Baker typu Inflatable. W latach 1993 do 1998 w największej liczbie przypadków (około 75%) realizowano dwucyklowe testy RPZ w interwałach węglanów jury górnej, jednak nie we wszystkich przypadkach uzyskane dane nadawały się do interpretacji metodą Hornera. Metoda Hornera jest najbardziej przydatna do interpretacji krzywych odbudowy ciśnienia dennego, rejestrowanych w krótkim czasie. Dla pierwszego cyklu czas ten był zwykle krótszy niż 60 minut, natomiast dla drugiego cyklu wynosił on od 60 minut do kilku godzin [2, 4]. W interpretacji testów odbudowy ciśnienia dennego trwających ponad 60 minut, stosowano również podwójnie logarytmiczny układ współrzędnych (metoda „log-log”) [1, 4]

## 2. WARUNKI GEOLOGICZNE OBSZARU BADAŃ

Obszar badań obejmujący strefę Bochnia – Dębica na południu i Mędrzechów – Radowan ku północy znajduje się w centralnej części zapadliska przedkarpackiego (rys. 1).



**Rys. 1.** Obszar badań obejmujący część centralną zapadliska przedkarpackiego, którego górnourajskie skały węglanowe podłoża zostały poddane testom złożowym w trakcie prac poszukiwawczych złóż węglowodorów

W strefie tej podłożem molass mioceńskich zapadliska jest południowy kraniec platformy, której najwyższe piętro mezozoiczne tworzą utwory triasu, środkowej i górnej jury

oraz częściowo kredy. Warstwy te zostały ścięte erozyjnie w czasie paleogenu, a następnie przykryte, głównie utworami łupkowo – mułowcowymi, neogenu (miocen: baden – dolny sarmat). W strefie południowej osady miocenu zapadliska przykryte zostały nasuniętymi utworami fliszu karpackiego jednostki śląskiej i skolskiej. Poszukiwania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w podłożu zapadliska, koncentrują się głównie na zróżnicowanych facjalnie węglanowych utworach górnej jury, których poziomy zbiornikowe posiadają zamknięcia facjalne i/lub uszczelnienie nadległym kompleksem miocenu. Utwory malmu (oksford, kimeryd, tyton) posiadają największy zasięg lateralny, od strefy krakowskiej na zachodzie, gdzie istnieją ich wychodnie do strefy Bratkowic na wschodzie oraz w kierunku północno-zachodnim do mezozoicznego obrzeżenia antyklinorium świętokrzyskiego. Maksymalne miąższości, przekraczające tysiąc metrów występują w strefie na południe od Radomyśla i kontynuują się pod nasunięte jednostki fliszu Karpat.

Kompleks węglanowych utworów malmu jest silnie zróżnicowany facjalnie [6,7], co wynika z różnych warunków sedymentacji węglanowej (facje wapieni biohermowych, rafowych lub gąbkowych przechodzące w facje wapieni mikrytowych i/lub facje margliste) oraz z późniejszych zmian diagenetycznych (rozpuszczanie, dolomityzacja), jak też tektonicznych (szczeliny). Te ostatnie związane są z dwoma systemami tektonicznymi [7]: przedlaramijskim o kierunku NW – SE, a głównie z późnopaleogeńskim o kierunku N – S, w ramach którego ukształtowana została blokowa struktura tektoniczna podłoża zapadliska. Zjawiska te sprawiają, że akumulacje węglowodorów znajdują się w zróżnicowanych i zmiennych w przestrzeni systemach szczelinowo-porowych lub kawernistych, co odzwierciedla się w różnych zapisach krzywych odbudowy ciśnienia testów złożowych oraz jest przyczyną trudności w ustaleniu korelacji między porowatością i przepuszczalnością tego typu węglanowych skał zbiornikowych.

### 3. CHARAKTERYSTYKA DANYCH WYBRANYCH DO ANALIZY STATYSTYCZNEJ

W analizie uwzględniono średnie (ważone) wartości współczynnika porowatości całkowitej utworów górnej jury określone metodami geofizyki wiertniczej. Korzystano przy tym ze wzoru, w którym wagą są miąższości 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, %;
- $\Phi_1$  do  $\Phi_n$  – współczynnik porowatości wydzielonych ( $n$ -tych) odcinków badanego, nieorurowanego interwału otworu wiertniczego, %;
- $h_1$  do  $h_n$  – miąższość wydzielonych ( $n$ -tych) odcinków badanego, nieorurowanego interwału, %.

W wyniku selekcji 53 dostępnych wyników testów RPZ z interwałów skał węglanowych jury górnej uzyskano następującą charakterystykę rodzaju płynu dopływającego do próbnika:

- przyływ solanki o różnym stopniu nagazowania gazem ziemnym, względnie ze śladami gazu lub ropy, stwierdzono w około 88% przypadków;
- przyływ płuczki wiertniczej wraz z płynem złożowym stwierdzono w około 37% przypadków;
- objawy ropy w gazie ziemnym lub solance, stwierdzono w około 11% przypadków;
- przyływ solanki bez śladów węglowodorów stwierdzono w około 7,5% przypadków;
- przyływ węglowodorów bez śladów solanki, stwierdzono w około 4% przypadków.

Z analizy statystycznej wyeliminowano mało wiarygodne wyniki testów RPZ (łącznie 16 przypadków), w których nie uzyskano dokładnych danych dotyczących wydajności dopływu płynu do próbnika, głównie z powodu:

- zbyt dużego udziału płuczki w dopływającym płynie złożowym (zwykle ponad 50% obj.);
- bardzo silnego nagazowania wody złożowej, bez możliwości oddzielnego określenia wydajności gazu i wody;
- znikomego dopływu mieszaniny płynów (ropa, woda, gaz, emulsja) o objętości mniejszej niż  $1\text{m}^3$ .

Do analizy statystycznej wytypowano 37 z spośród 53 dostępnych wyników testów RPZ, na podstawie których określono przepuszczalność fazową skał jurajskich dla wody złożowej, korzystając ze wzoru:

$$K_{DST} = \frac{0,183 \cdot Q \cdot \mu \cdot \beta}{m \cdot h}, [\text{m}^2] \quad (2)$$

gdzie:

- $Q$  – wydatek przyływu wody złożowej, określany w warunkach powierzchniowych jako iloraz objętości wypełnionej wodą części przewodu wiertniczego podczas wyciągania próbnika, na jednostkę czasu,  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ;
- $\beta$  – współczynnik zmiany objętości wody złożowej, uwzględniający przejście z warunków powierzchniowych do złożowych,  $\beta = 1,00 \div 1,05 [\text{m}^3/\text{m}^3]$ .
- $m$  – nachylenie prostoliniowego odcinka wykresu krzywej odbudowy ciśnienia dennego w układzie półlogarytmicznym, wg metodyki Hornera  $[\text{Pa}/\text{cykl log}]$ ,
- $h$  – sumaryczna miąższość wydzielonych przez geofizykę odcinków porowatych badanego, nieorurowanego interwału otworu wiertniczego,  $[\text{m}]$ ;
- $\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej wody (solanki) w warunkach złożowych,  $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ .

W przypadkach dwucyklowego testu RPZ uwzględniano wyniki drugiego cyklu. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1**

Zestawienie wartości współczynników porowatości i przepuszczalności skał węglanowych górnej jury z podłoża zapadliska przedkarpackiego (obszar Bochnia – Dębica – Męrzehów) określonych odpowiednio metodami geofizyki wiertniczej oraz na podstawie testów RPZ

Lp.	Nazwa odwiertu, nr i rok wyk. testu	Głębokość interwału [m]	$\Phi$ geof. [%]	Przepuszczalność K [10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup> ]	Log K
1	Bogumiłowice – 4; 37/93	1578,0–1607,0	8,0	17,00	1,230
2	Bogumiłowice – 5; 30/95	1558,0–1576,0	9,0	53,00	1,724
3	Brzeziny – 7; 107/94	1318,0–1353,0	6,0	2,50	0,398
4	Brzeziny – 10; 14/95	1366,0–1375,0	8,5	8,00	0,903
5	Jaźwiny – 3; 89/96	1494,0–1525,9	12,0	11,40	1,057
6	Kózki – 4; 114/96	657,0–702,0	3,0	1,17	0,068
7	Łąka – 30k; 108/95	2954,0–2965,0	7,0	24,00	1,380
8	Łętowice – 18; 145/93	1557,0–1590,0	5,0	89,0	1,949
9	Łętowice – 19; 76/95	1484,0–1503,0	6,0	9,00	0,954
10	Łowczów – 2; 36/93	2652,0–2752,0	6,0	5,00	0,699
11	Łowczów – 2; 139/93	2976,0–2993,0	2,0	0,15	– 0,824
12	Łowczów – 2; 141/93	2675,0–2707,0	3,0	0,50	– 0,301
13	Łowczów – 2; 144/93	2675,0–2707,0	6,0	3,0	0,477
14	Przybysławice – 2; 73/97	1708,0–1728,0	8,0	200,00	2,301
15	Radomyśl – 2; 146/93	1082,0–1125,0	2,5	7,00	0,845
16	Radomyśl – 2; 153/93	1139,0–1210,0	2,0	0,60	– 0,222
17	Radwan – 7; 4/94	550,0–706,0	4,0	1,00	0,000
18	Skrzyszków – 1k; 33/94	20002,0–2048,0	10,0	40,00	1,602
19	Skrzyszków – 1k; 35/94	2002,0–2048,0	10,0	10,00	1,000
20	Skrzyszków – 1k; 46/94	2002,0–2015,0	12,0	40,00	1,602
21	Szarwark – 5; 160/94	830,0–843,0	14,0	179,00	2,253
22	Tarnawa – 1; 61/95	2696,0–2720,0	8,0	72,00	1,857
23	Tarnawa – 1; 77/96	2692,0–2710,0	8,0	28,00	1,447
24	Tarnów – 27k; 76/93	1630,0–1711,0	8,0	23,0	1,362
25	Waryś – 5; 21/94	1524,0–1565,0	7,0	34,00	1,531
26	Wierzchosławice – 16; 52/97	1868,0–1904,0	7,5	23,00	1,362
27	Wygoda – 38; 142/93	2207,0–2241,0	7,0	1,70	0,230
28	Wygoda – 43; 135/94	2069,0–2088,0	3,0	2,00	0,301
29	Zaczarnie – 7; 147/94	1234,0–1319,0	9,0	13,00	1,114
30	Zaczarnie – 8; 47/96	1280,0–1299,0	5,0	7,00	0,845
31	Zasów – 4; 114/95	1324,0–1376,0	10,0	122,00	2,086
32	Zawada – 5k; 81/93	2422,0–2489,0	8,0	52,00	1,716
33	Zawada – 5k; 110/93	2238,0–2248,0	6,0	255,00	2,406
34	Zawada – 7; 41/97	2628,0–2645,0	5,0	2,00	0,301
35	Żukowice – 42; 49/97	1483,0–1492,0	5,0	33,3	1,522
36	Żukowice – 42; 53/97	1635,0–1701,0	6,0	55,00	1,740
37	Żyrakow – 1; 63/93	1491,0–1540,0	8,0	22,00	1,342

Biorąc pod uwagę fakt, że pierwotna przepuszczalność skał zbiornikowych w strefie przyotworowej ulega częstym zmianom pod wpływem oddziaływania na skały zbiornikowe procesu wiercenia otworu oraz sposobu udostępnienia poziomu zbiornikowego, dokonano analizy porównawczej zmian tej przepuszczalności, na podstawie wyników pierwszego i drugiego cyklu rozpatrywanego testu odbudowy ciśnienia. Zmiany te mogą mieć charakter:

- mechaniczny – oddziaływanie świdra lub koronki, perforacja okładziny odwiertu;
- hydrodynamiczny-zmiany rozwarłości szczelin pod wpływem ciśnienia różnicowego oraz procesy kolmatacji lub dekolmatacji ośrodka porowo-szczelinowego;
- fizykochemiczny (oddziaływanie filtratu płuczkowego na skałę zbiornikową np. pęcznienie cząstek ilastych; a także na płyny złożowe, np. tworzenie się emulsji wodno-ropnej lub wytrącanie soli);
- kolmatacyjny (blokada przestrzeni porowej skały zbiornikowej cząstkami stałymi z płuczki wiertniczej takimi jak: cząstki ilaste, polimery, sól, rdza, blokatory, zwierciny); istotnym zjawiskiem, które należy brać pod uwagę, jest wtórna krystalizacja soli [3].

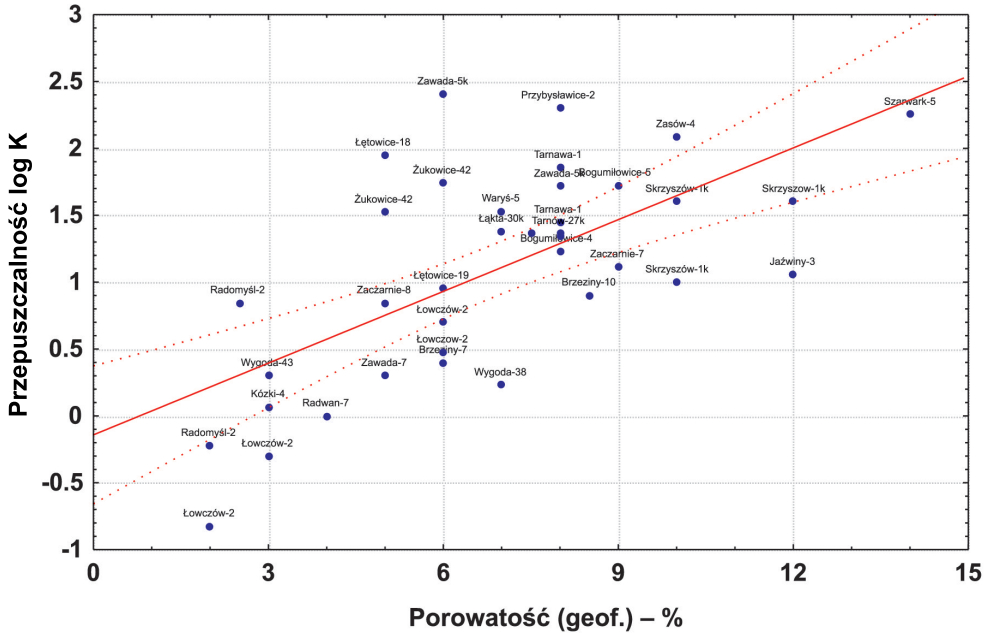
Głębokość penetracji cząstek stałych i kolmatantów ciekłych (emulsja wodno-ropna) w poziom węglanowych skał zbiornikowych zależy w głównej mierze od rodzaju przestrzeni porowej skały oraz ciśnienia różnicowego (represji ciśnienia płuczki w otworze) i jest największa w przypadku skał typu szczelinowo-porowego. Zjawisko to przyczynia się do powstawania zmian przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej, stąd wyniki badań geofizyki wiertniczej oraz testów złożowych RPZ są często obarczone znacznym błędem.

#### 4. WYNIKI ANALIZY STATYSTYCZNEJ

Metodami analizy statystycznej, na podstawie wykresu rozrzutu, dobrano zależność  $\log K_{DST}$  od  $\Phi_{geof.}$ , uzyskując zadawalającą wartość współczynnika korelacji. Przedstawiony na rysunku 2 wykres zależności  $\log k_{DST}$  od  $\Phi_{geof.}$  opisuje równanie regresji, wyznaczone na poziomie istotności 0,05, z określeniem 95-procentowych przedziałów ufności, przy współczynniku korelacji  $r = 0,6492$  (wartość krytyczna  $r_{kr} = 0,3246$ ), dla zakresu głębokości zalegania utworów jury górnej od 657 do 2993 m, w badanym obszarze poszukiwań naftowych:

$$\log k_{DST} = -0,142 + 0,179 \cdot \Phi_{geof.} \quad (3)$$

Równanie (3) może być przydatne do prognozowania współczynnika przepuszczalności fazowej dla wody złożowej w węglanowych skałach zbiornikowych górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego, szczególnie w badanym obszarze poszukiwań naftowych.



**Rys. 2.** Zależność przepuszczalności efektywnej (na podstawie testów złożowych RPZ) jako  $\log K_{DST}$  od porowatości efektywnej (?) całkowitej  $\Phi_{geof.}$  (wyznaczonej metodami geofizyki wiertniczej) dla utworów węglanowych górnej jury centralnej części podłoża zapadliska przedkarpackiego. Linie przerywane – przedziały ufności 95%

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

- 1) Poziomy skał zbiornikowych górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego, ze względu na znaczną heterogeniczność związaną z rozwojem facjalnym, stwarzają duże trudności w zachowaniu pierwotnych właściwości filtracyjnych podczas dowiercania oraz opróbowania.
- 2) Stwierdzona, zadawalająca wartość korelacji między współczynnikami  $\Phi_{geof.}$  i  $K_{SDT}$  potwierdza istnienie związku pomiędzy tymi parametrami, mimo znacznego wpływu zarówno określonej facji skał zbiornikowych jak i sposobu dowiercania oraz opróbowania.
- 3) Wyznaczone metodami analizy statystycznej równanie (3) może być przydatne do prognozowania współczynnika przepuszczalności fazowej dla wody złożowej w węglanowych skałach zbiornikowych górnej jury, w badanym obszarze poszukiwań naftowych.

## LITERATURA

- [1] Dubiel S., Zubrzycki A., Maruta M.: *Interpretacja testów wykonywanych rurowymi próbnikami złoża –RPZ w skałach węglanowych górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego*. Archiwum Górnictwa 2012 (w druku).

- [2] Dubiel S., Chrząszcz W., Rzyczniak M.: *Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
- [3] Dubiel S., Falkowicz S.: *Wpływ płuczek wiertniczych zasolonych i solanek na zmiany przepuszczalności piaskowców gazonośnych w świetle badań laboratoryjnych*. Archiwum Górnictwa, vol. 46, z. 3, Kraków 2001.
- [4] Dubiel S., Rzyczniak M. et al.: *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, WwNiG AGH, Kraków 1993–1998.
- [5] Gutowski J., Urbaniec A. et al.: *Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat*. Biul. IG 426, Warszawa, 2007, s. 1–26.
- [6] Krajewski M., Matyszkiewicz J., Król K.: *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, 2011, s. 269–290.
- [7] Maksym A., Baszkiewicz A. et al.: *Środowiska sedymentacji i właściwości zbiornikowe utworów najwyższej jury i kredy dolnej rejonu Brzezówka – Zagorzyce na tle budowy geologicznej S części zapadliska przedkarpackiego*. Przegląd Geol., vol. 49, nr 5, 2001.