

PRZESTRZENNY ROZKŁAD PARAMETRÓW ZŁOŻOWYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM NASYCENIA WODĄ NIEREDUKOWALNĄ, KAPILARNĄ I WOLNĄ DLA REJONU GROTOWA

**Spatial distribution of reservoir parameters with particular attention
given to saturation with irreducible, capillary and free water
for Grotów region**

Jadwiga ZALEWSKA¹, Michał MALAGA² & Dariusz CEBULSKI¹

*¹Institut Nafty i Gazu;
ul. Lubicz 25a, 31-503 Kraków;
e-mail: zalewska@inig.pl, cebulski@inig.pl*

*²Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A., Oddział Piła;
pl. Staszica 9, 64-920 Piła*

Abstract: The aim of the study is a determination of reservoir parameters distribution in the Grotów reservoir region, with application of test results carried out by means of Nuclear Magnetic Resonance method. The framework of the study included complex laboratory measurements of core plugs properties, including first of all distributions of porous space water saturation by means of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) method, but also specific and volumetric density, as well as total porosity coefficient and permeability of rocks, mineral composition of rocks based on X-ray analyses, electrical parameters of rocks, i.e. electrical resistance of rocks for varying coefficients of porous space saturation with water, porous structure indices and wettability of rocks. 102 samples, originating from 3 boreholes – Grotów-1, -2, and -6, were analysed. The study finally resulted in irreducible, capillary and free water saturation distribution maps for the examined region.

Key words: the Main Dolomite, NMR method, saturation, free water, capillary water, irreducible water

Słowa kluczowe: dolomit główny, metoda MRJ, nasycenie, woda wolna, woda kapilarna, woda nieredukowalna

WSTĘP

Poziom dolomitu głównego od wielu lat jest obiektem poszukiwań naftowych w Polsce, m.in. wiercenia w zachodniej części bloku Gorzowa doprowadziły do odkrycia złoża gazowo-ropnego Barnówko–Mostno–Buszewo (B-M-B), dotychczas największego złoża w Polsce (Górecki 2004, Wolnowski 2002).

Utwory dolomitu głównego (Ca2) charakteryzują się dużymi zmianami własności zbiornikowych, zarówno w poziomie jak i w pionie, widocznymi w obrębie jednego złoża. Pory stanowiące pierwotne przestrzenie pomiędzy ziarnami utworów węglanowych Ca2 są rzadko zachowane. Dominuje zazwyczaj porowatość po rozpuszczonych ziarnach węglanowych, tworzących nieregularne próżnie przypominające kawerny, rzadziej otwarte szczeliny. Generalnie, daleko posunięte procesy wtórnej cementacji i zabliznianie pierwotnych por, wywołane wtórną rekrytalizacją anhydrytu, doprowadziły do zatarcia dobrych własności zbiornikowych. Obiekt Grotów stanowi pułapkę o charakterze litologicznym lub litologiczno-strukturalnym. Położony jest on w północnej części półwyspu platformy węglanowej, na skłonie struktury Międzychód. Mapa stropu dolomitu głównego pokazuje, że utwory Ca2 zapadają tu na północ, przy czym krawędź platformy węglanowej zatacza łuk, otaczając obszar Grotowa z trzech stron.

Złoże Grotów zostało udostępnione trzema odwiertami poszukiwawczymi Grotów-1, -2, -6. Otwór Grotów-1 przewiercił 33.5 m utworów Ca2 w całości nasyconych węglowodorami. W wyniku testu produkcyjnego uzyskano przypływ ropy naftowej. Równocześnie stwierdzono wysoki wykładnik gazowy w czasie testu. Rozkład ciśnień pomierzonych w otworze może wskazywać na przewiercenie przez otwór czapy gazowej złoża. Otwór Grotów-2 jest położony 730 m na północ od otworu Grotów-1. Nawiercił on strop dolomitu głównego o 22 m niżej niż Grotów-1 i potwierdził spodziewaną poprawę zbiornikowych własności Ca2. Z kolei otwór Grotów-6 jest położony 2200 m na NNE od Grotowa-1 i 1600 m na NE od Grotowa-2. Strop Ca2 występuje w nim o około 100 m niżej niż w Grotowie-1.

WYNIKI BADAŃ

Wykonano kompleksowe pomiary laboratoryjne właściwości rdzeni wiertniczych, obejmujące przede wszystkim nasycenie wodą przestrzeni porowej, metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR), a także gęstość właściwą i objętościową. Pomierzono także współczynnik porowatości całkowitej i przepuszczalności skał, określono skład mineralny skał na podstawie analiz rentgenowskich oraz wyznaczono elektryczne parametry skał, tzn. elektryczną oporność skał przy zmiennych współczynnikach nasycenia przestrzeni porowej wodą, wskaźniku struktury porowej i zwilżalności skał (Zalewska *et al.* 2004).

Pomiar metodą jądrowego rezonansu magnetycznego pozwala rejestrować sekwencję ech spinowych i rozkład czasów poprzecznej relaksacji T_2 jąder wodoru zawartego w mediach złożowych (Kenyon 1997, Kleinberg *et al.* 1996, Ostroff *et al.* 1999, Ciecchanowska & Zalewska 2002). Czasy T_2 są najkrótsze dla wody nieredukowalnej, dłuższe dla wody kapilarnej oraz najdłuższe dla wody wolnej. Dla rozdzielenia powierzchni pod obwiednią ech spinowych wyznacza się tzw. graniczne wartości T_{2G} . Wartości graniczne czasu relaksacji poprzecznej T_{2G1} i T_{2G2} pozwalają jednoznacznie rozdzielić mierzony sygnał NMR na 3 obszary, na podstawie których wyznacza się wielkość przestrzeni porowej wypełnionej wodą nieredukowalną – K_{p1} , wodą kapilarną – K_{p2} , wodą wolną – K_{p3} . Wielkość T_{2G2} jest charakterystyczna dla określonego rodzaju skał i rejonu, a jej znajomość odgrywa ważną rolę w poprawnej interpretacji wyników pomiarów NMR (Chang *et al.* 1997, Jarzyna 1998, Kenyon 1997, Kleinberg *et al.* 1996, Ostroff *et al.* 1999, Ciecchanowska & Zalewska 2002).

Tabela (Table) 1

Zestawienie zakresów zmian i średnich wartości parametrów określonych metodą NMR dla otworów: Grotów-1, Grotów-2, Grotów-6 i utworów dolomitu głównego (Ca2)

The range of variability and average values determined from Nuclear Magnetic Resonance method for wells: Grotów-1, Grotów-2, Grotów-6 and for series of the Main Dolomite (Ca2)

Parametr, <i>Parameters</i>	Grotów-1			Grotów-2		
	Ilość próbek <i>Number of samples</i>	Zakres zmiany parametru <i>Parameter's range</i>	Średnia arytmetyczna <i>Arithmetic average</i>	Ilość próbek <i>Number of samples</i>	Zakres zmiany parametru <i>Parameter's range</i>	Średnia arytmetyczna <i>Arithmetic average</i>
Woda nieredukowalna <i>Irreducible water, Kp_1 %</i>	19	0.10÷0.82	0.48	52	0.26÷1.37	0.81
Woda kapilarna <i>Capillary water, Kp_2 %</i>	19	0.41÷2.73	1.31	52	0.66÷9.65	2.58
Woda wolna <i>Free water, Kp_3 %</i>	19	0.05÷11.35	1.88	52	0.26÷19.19	4.00
Porowatość całkowita <i>Total porosity, Kp_{NMR} %</i>	19	1.13÷12.59	3.67	52	2.02÷20.60	7.40
Porowatość efektywna <i>Effective porosity, Kp_{NMRref} %</i>	19	0.71÷12.19	3.20	52	1.31÷19.93	6.60
Nasycenie wodą nieredukowalną <i>Irreducible water Saturation Sw^o %</i>	19	0.91÷53.59	19.97	52	3.25÷36.18	16.38
Parametr, <i>Parameters</i>	Grotów-6			Utwory dolomitu głównego <i>Series of the Main Dolomite</i>		
Woda nieredukowalna <i>Irreducible water, Kp_1 %</i>	31	0.45÷1.23	0.74	102	0.10÷1.37	0.73
Woda kapilarna <i>Capillary water Kp_2 %</i>	31	1.85÷12.89	6.86	102	0.41÷12.89	3.65
Woda wolna <i>Free water, Kp_3 %</i>	31	0.49÷5.86	9.60	102	0.05÷25.86	5.30
Porowatość całkowita <i>Total porosity, Kp_{NMR} %</i>	31	3.17÷28.40	17.20	102	1.13÷28.40	9.70
Porowatość efektywna <i>Effective porosity, Kp_{NMRref} %</i>	31	2.36÷27.70	16.47	102	0.71÷27.71	8.96
Nasycenie wodą nieredukowalną <i>Irreducible water saturation, Sw^o %</i>	31	2.19÷25.55	5.50	102	0.91÷53.59	13.74

Standardowy czas T_{2G2} dla skał węglanowych wynosi 93 ms, natomiast wyznaczony eksperymentalnie na próbkach skał z rejonu Grotowa (Kłaja w pracy Zalewska *et al.* 2004) wynosi $T_{2G2}=115$ ms. W pracy porównano wyniki rozkładów nasycenia wodą próbek skał przy zastosowaniu literaturowych i pomiarowych czasów granicznych. Z przeprowadzonej

analizy wynika, że nie uległy zmianie wartości współczynnika porowatości całkowitej K_{PNMR} i efektywnej $K_{PNMR_{ef}}$ oraz współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną $S_{W_{nr}}$. Natomiast generalnie zmniejszyła się zawartość wody kapilarnej a zwiększył się udział wody wolnej. Różnice w zawartości wody wolnej mieściły się w granicach od 0 do 5.49%, przy średniej arytmetycznej 0.5%. Zawartość wody wolnej odzwierciedla objętość skały, z której mogą być wydobyte płyny złożowe, a więc wzrost o 5.5% jest znaczący. Wynik ten wskazuje jak istotnym zagadnieniem jest właściwe określenie czasu granicznego dla konkretnej serii stratygraficznej danego rejonu.

Analizie poddano 102 próby pochodzące z 3 otworów wiertniczych Grotów-1, -2 i -6, reprezentujące utwory dolomitu głównego. Zestawienie wartości współczynników nasycenia wodą próbek skał z otworów Grotów-1, -2, -6 i zbiorczo dla badanych rdzeni dolomitu głównego zawarto w tabeli 1.

Na podstawie analizy parametrów oznaczonych metodą NMR – porowatość całkowita w otworze Grotów-1 zawiera się w przedziale $K_{PNMR} \in 1.13 \div 12.59\%$ (wartość średnia arytmetyczna równa się 3.67%), w otworze Grotów-2 $K_{PNMR} \in 2.02 \div 20.60\%$ (przy średniej arytmetycznej 7.40%), a w otworze Grotów-6 $K_{PNMR} \in 3.17 \div 28.40\%$ (przy średniej arytmetycznej 17.20%).

Średnia arytmetyczna współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną zmienia się od 19.97% (otwór Grotów-1), poprzez 16.38% (otwór Grotów-2) do 5.50% (otwór Grotów-6).

Pośród trzech omawianych otworów wyróżniają się próbki z otworu Grotów-6 posiadające wyjątkowo dobre parametry zbiornikowe. Średnia wartość arytmetyczna porowatości całkowitej wynosi 17.20%, porowatości efektywnej 16.47%, przy średniej arytmetycznej zawartości wody wolnej równej 9.60% i wody nieredukowalnej 0.74%.

Na szczególną uwagę zasługują próbki z głębokości 3318.15÷3329.0 m, które charakteryzują się bardzo niskimi współczynnikami nasycenia wodą nieredukowalną $S_{W_{nr}} \in 2.19 \div 4.28\%$ (przy wartości średniej arytmetycznej $\overline{S_{W_{nr}}} = 3.09\%$) oraz bardzo wysokimi współczynnikami porowatości efektywnej $K_{PNMR_{ef}} \in 20.63 \div 27.71\%$ (przy średniej arytmetycznej $\overline{K_{PNMR_{ef}}} = 23.73\%$). Takie parametry świadczą o bardzo dobrych własnościach zbiornikowych badanych skał. Próbki z głębokości 3330.0÷3361.40 m posiadają słabsze własności zbiornikowe. Mają nieco wyższe wartości $S_{W_{nr}}$ ($S_{W_{nr}} \in 3.0 \div 12.33\%$ (przy wartości średniej arytmetycznej $\overline{S_{W_{nr}}} = 5.53\%$) i nieco niższe porowatości efektywnej $K_{PNMR_{ef}} \in 5.95 \div 19.76\%$ ($\overline{K_{PNMR_{ef}}} = 11.72\%$).

ANALIZA STATYSTYCZNA NASYCENIA WODAMI ZŁOŻOWYMI I WYNIKÓW POMIARÓW GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Przeprowadzona analiza statystyczna opierała się na istotnym założeniu o istnieniu zależności między każdym rodzajem wody zawartej w próbkach ośrodka skalnego: nieredukowalną, kapilarną i wolną z jednej strony a wynikami pomiarów geofizyki wiertniczej z drugiej strony. Weryfikacja tego założenia była przeprowadzana metodami statystyki matematycznej: wyniki obliczeń statystycznych pozwalają orzekać, które profilowania geofizyki wiertniczej wpływają na zmienność wybranego rodzaju wody złożowej, podają również miary tego wpływu.

Rozkłady pionowe nasycenia wodą nieredukowalną, kapilarną i wolną wyznaczono dla warstwy Ca2 we wszystkich trzech odwiertach. Wykorzystano również wyznaczone poprzednio rozkłady nasycenia w kilku otworach usytuowanych w sąsiedztwie złoża Grotów (Zalewska *et al.* 2004). Zwraca uwagę duże zróżnicowanie wartości pomierzonego nasycenia dla poszczególnych otworów, co znajduje wyjaśnienie w bardzo wyraźnej niejednorodności struktury przestrzeni porowej dolomitu głównego w badanym rejonie.

Wielkości nasycenia rozważano jako zmienne losowe, określane przez zespół zmiennych objaśniających (również losowych) – wyników profilowań geofizyki otworowej, przy czym aproksymacji dokonano metodą regresji wielokrotnej. Podsumowanie wyników regresji wskazuje, że stopień zależności nasycenia od parametrów profilowań geofizyki otworowej wynosi od 66.4% dla wody nieredukowalnej w otworze Gotów-2, do 95.6% dla wody wolnej w otworze Grotów-6.

ANALIZA STATYSTYCZNA ROZKŁADÓW NASYCENIA WODAMI ZŁOŻOWYMI I ATRYBUTÓW SEJSMICZNYCH DLA REJONU MIĘDZYCHODU

W celu przeprowadzenia analizy statystycznej utworzono 21 atrybutów sejsmicznych, których autorem był mgr inż. Tomasz Solarski z Ośrodka Północ PGNiG w Pile. Atrybuty te zostały obliczone w oparciu o wyniki interpretacji zdjęcia sejsmicznego 3D dla rejonu Międzychód-Sieraków, wykonanego przez Spółkę Geofizyka Toruń. Zarówno wybór jak i liczba atrybutów zostały dokonane z zamiarem ustalenia optymalnych powiązań z rozpatrywanymi parametrami złożowymi. Celem analizy regresji było w tym przypadku zbadanie związków między wyróżnionymi atrybutami sejsmicznymi z jednej strony a nasyceniem trzema rodzajami wody złożowej z drugiej strony. Regresja wielokrotna z atrybutami sejsmicznymi, jako zbiorem zmiennych objaśniających, nie może być przeprowadzona standardowo, gdyż macierz korelacji atrybutów jest źle uwarunkowana, bo wiele wyrazów ma wartość bliską 1 lub -1 . Świadczy to o silnej zależności liniowej między wieloma przyjętymi atrybutami. Wobec tego skorzystano z regresji krokowej postępującej. Na figurach 1 i 2 przedstawiono rozkłady nasycenia na badanym obszarze.

Zwracają uwagę bardzo wysokie wartości współczynników korelacji i determinacji R i R^2 . Jest to konsekwencją przyjętego założenia o całkowitym dopasowaniu każdego parametru do pewnego zbioru wyznaczonych atrybutów, czyli o zerowej wartości składnika losowego w równaniu regresji. W praktyce taka idealna sytuacja nigdy nie wystąpi, jednak nie ma możliwości przewidzieć rzeczywistego stopnia dopasowania. Obliczeniowo dochodzi się do pełnego dopasowania metodą iteracyjną. O ile przy aproksymacji rozkładów nasycenia zmiennymi w otworach nie zaobserwowano znaczącej dominacji wybranych zmiennych, to w przypadku dopasowania rozkładów powierzchniowych nasycenia i atrybutów sejsmicznych można wyróżnić grupę atrybutów najbardziej istotnych dla kształtowania się zmiennych nasycenia wodą nieredukowalną, kapilarną i wolną. Są to następujące atrybuty:

- ATR07 – amplituda RMS z bramki od -4 do $+12$ ms w stosunku do horyzontu Z2,
- ATR08 – amplituda RMS z bramki od $+4$ do $+24$ ms w stosunku do horyzontu Z2,
- ATR11 – minimalna prędkość z inwersji sejsmicznej (ze wstępnym modelem prędkości) z bramki od $+6$ do $+24$ ms w stosunku do horyzontu Z2,

- ATR13 – średnia amplituda chwilowa z bramki od +4 do +24 ms w stosunku do Z2,
 ATR18 – miąższość czasowa amplitudy o wartościach <-1000
 w bramce od 0 do +20 ms,
 ATR20 – amplituda composite (ATR02-ATR01-ATR03).

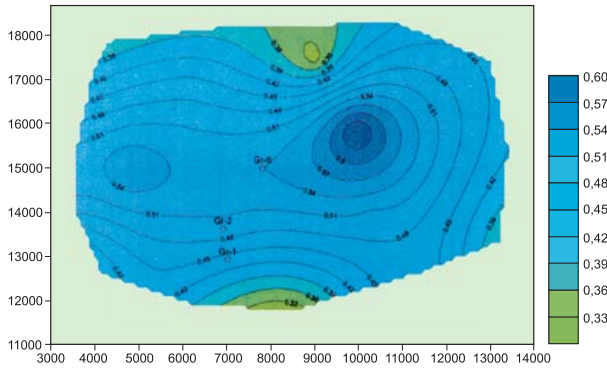


Fig. 1. Rozkład nasycenia wodą wolną dla rejonu Grotowa

Fig. 1. Distribution of free water saturation for the Grotów region

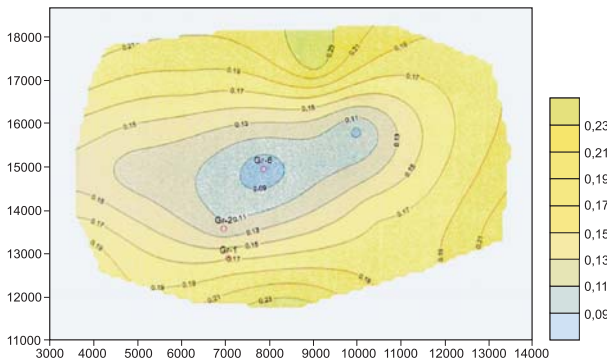


Fig. 2. Rozkład nasycenia wodą nieredukowalną dla rejonu Grotowa

Fig. 2. Distribution of irreducible water for the Grotów region

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych laboratoryjnych badań rdzeni wiertniczych z rejonu Grotowa przedstawiono następujące uwagi i wnioski:

1. Badane utwory dolomitu głównego posiadają poziomy skał o lepszych i gorszych właściwościach zbiornikowych. Średnia wartość porowatości z metody helowej wynosi 11.25%, a z metody NMR 8.96%. Przepuszczalność oznaczona metodą gazową równa się 0.95 mD. Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną mieści się w zakresie 0.91÷53.59 przy średniej 13.74%.