

## OCENA NASYCENIA PRZESTRZENI POROWEJ PIASKOWCÓW MIOCENSKICH METODĄ MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO

### Assessment of the Miocene sandstones porous space saturation with Nuclear Magnetic Resonance Method

Jadwiga ZALEWSKA, Jolanta KLAJA & Dariusz CEBULSKI

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

**Abstract:** Nuclear Magnetic Resonance (NMR) data provide affluence of information about porous space saturation distribution, porosity itself and permeability, thanks to close relationship between pore size and transverse relaxations time distribution. Having known values of these parameters, and especially irreducible water saturation of rocks it is possible to determine reservoir properties of rocks much more precisely. The study presents results of laboratory tests carried out with use of NMR method on the Miocene sandstones representing Dzików gas field. The samples featured extensive variability of reservoir properties within profile of individual boreholes. The highest number of rocks having good reservoir and filtration properties, originated from Dzików-12 borehole, and they were characterised by low irreducible water saturation coefficient and high free water volume.

**Key words:** Nuclear Magnetic Resonance, NMR,  $T_2$  relaxation constant

**Słowa kluczowe:** magnetyczny rezonans jądrowy, MRJ, stała relaksacji poprzecznej  $T_2$

## WSTĘP

Badania skał metodą MRJ bazują najczęściej na pomiarze czasu relaksacji poprzecznej  $T_2$  protonów zawartych w solance wypełniającej przestrzeń porową skały (Kenyon *et al.* 1995, Kenyon 1997). Zależność między czasami relaksacji przedstawiono równaniem (1)

$$T_2^{-1} = \rho \frac{S_i}{V_i} + T_{2B}^{-1} + T_{2D}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho$  – poprzeczna relaksacyjność powierzchniowa,
- $S_i$  – powierzchnia ścian poru,
- $V_i$  – objętość poru,
- $T_{2B}$  – czas  $T_2$  związany z relaksacją jąder wodoru w objętości medium złożowego,
- $T_{2D}$  – czas  $T_2$  związany z dyfuzją cząsteczek na skutek różnic podatności magnetycznej pomiędzy szkieletem skały i płynem wypełniającym pory.

Pomiary czasów relaksacji  $T_2$  realizuje się poprzez badanie zaniku poprzecznej składowej wypadkowego momentu magnetycznego, zwanego magnetyzacją jądrową. W metodzie MRJ mierzy się magnetyzację i relaksację jąder wodoru. Zakłada się, że relaksacja jąder wodoru zachodzi niezależnie w każdym elemencie przestrzeni porowej poru. Dla skały w pełni wypełnionej płynem jednorodnym relaksacja objętościowa jest zaniedbywanie mała, a zatem  $T_2 \sim V/S$ , czyli  $T_2$  jest proporcjonalny do wielkości porów (Kenyon 1997). Szybkie tempo zaniku składowej poprzecznej magnetyzacji, a więc krótki czas  $T_2$ , związane jest z małymi porami, podczas gdy pory większe charakteryzuje dłuższy czas relaksacji. (Ramakrishnan 1999). Szczegółowe opisy teorii NMR oraz jej zastosowań do porowatych systemów skalnych można znaleźć w szeregu publikacji (Chang *et al.* 1997, Jarzyna 1998, Kenyon 1997, Kleinberg *et al.* 1996, Ostroff *et al.* 1999, Ciechanowska & Zalewska 2002, Klaja & Gąsior, 2008).

## WYNIKI BADAŃ

W Instytucie Nafty i Gazu pomiary nasycenia wodą przestrzeni porowej skał metodą MRJ, realizowane są zgodnie z metodyką opisaną w pracy Ciechanowska *et al.* (2001), przy wykorzystaniu urządzenia Maran-7 firmy Resonance Instruments, wyposażonego w magnes stały generujący pole o natężeniu 0.186 T, co odpowiada częstotliwości precesji jąder wodoru 7.9 MHz. Na podstawie rozkładu czasów relaksacji poprzecznej  $T_2$  wykonano analizę nasycenia wodą przestrzeni porowej skał, wyznaczając wielkość przestrzeni porowej wypełnionej: wodą nieredukowalną ( $Kp_1$ ), kapilarną ( $Kp_2$ ) i wolną ( $Kp_3$ ). Określono również współczynniki: porowatości całkowitej ( $Kp_{NMR}$ ), poprzez porównanie amplitudy zmierzonego sygnału pochodzącego od próbki z amplitudą wzorca oraz porowatości efektywnej  $Kp_{NMR_{ef}}$ , jako sumę przestrzeni porowej wypełnionej wodą kapilarną i wodą wolną. Oceniono także współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną  $S_{Wnr}$  ( $S_{Wnr} = (Kp_1 / Kp_{NMR}) \cdot 100\%$ ).

Do badań wytypowano 65 próbek piaskowców miocenijskich ze złoża Dzików, pochodzących z trzech otworów wiertniczych: Dzików-12, -13, -15. Pomiary metodą MRJ wykonywano na próbkach w kształcie walca o wysokości około 3 cm i średnicy około 2.54 cm, nasyconych w 100% solanką o stężeniu 50 g/l. Badano czas relaksacji poprzecznej składowej magnetyzacji  $T_2$  wykorzystując w tym celu sekwencję pomiarową CPMG, przyjmując następujące warunki pomiarowe: ilość analizowanych ech spinowych NECH – od 4096 do 32768, ilość skanów NS – 128, czas pomiędzy kolejnymi skanami RD – 5s, temperatura pomiaru – 32°C, czas pomiędzy kolejnymi echemi spinowymi TE – 200  $\mu$ s (Ciechanowska *et al.* 2001).

Zakresy zmian i średnie wartości parametrów określonych metodą MRJ dla utworów miocenu w poszczególnych otworach wiertniczych przedstawiono w tabeli 1.

Generalnie stwierdzono, że w badanych utworach miocenijskich średnie wielkości zawartości wody nieredukowalnej przyjmują wartości od  $\overline{Kp_1} = 11.32\%$  w otworze Dzików-12, poprzez  $\overline{Kp_1} = 15.63\%$  w otworze Dzików-13, do  $\overline{Kp_1} = 17.24\%$  w otworze Dzików-15.

Ilość wody kapilarnej we wszystkich badanych odwiertach jest do siebie zbliżona ( $\overline{Kp_2} \in 6.12 \div 7.10\%$ ). Najwyższą średnią wartością zawartości wody wolnej charakteryzują się próbki z otworu Dzików-12 ( $\overline{Kp_3} = 6.83\%$ ), w pozostałych otworach zawartość tej wody jest do siebie zbliżona i niższa ( $\overline{Kp_3} \in 1.26 \div 2.39\%$ ).

**Tabela (Table) 1**

Zestawienie zakresów zmian i średnich wartości parametrów określonych metodą MRJ dla poszczególnych otworów

*Range of variability and average value of parameters from NMR method for individual borehole*

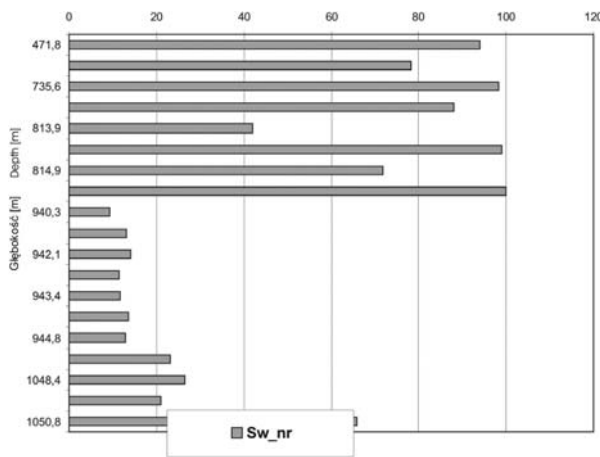
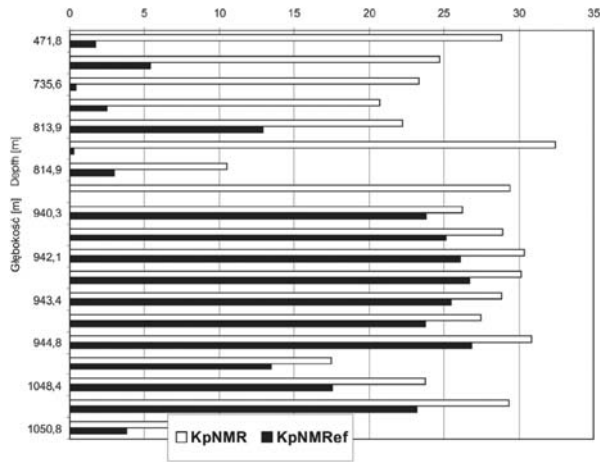
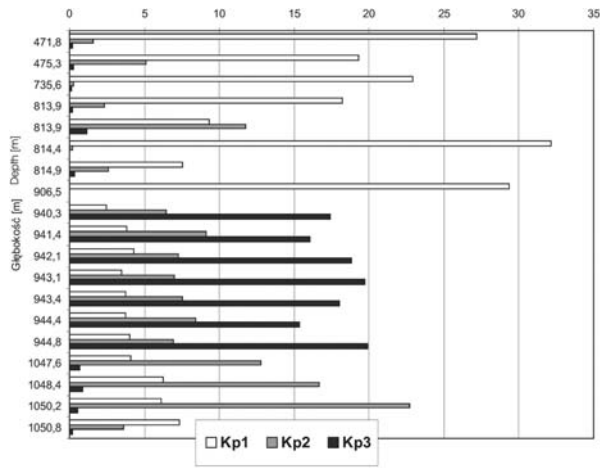
	Dzików-12			Dzików-13			Dzików-15		
	Utwory miocenu, <i>Miocene rocks</i>								
	Ilość prób <i>N<sub>g</sub> of sample</i>	Zakres zmian <i>Range of change</i>	Średnia <i>Average</i>	Ilość prób <i>N<sub>g</sub> of sample</i>	Zakres zmian <i>Range of change</i>	Średnia <i>Average</i>	Ilość prób <i>N<sub>g</sub> of sample</i>	Zakres zmian <i>Range of change</i>	Średnia <i>Average</i>
Kp <sub>1</sub> [%]	19	2.42÷32.13	11.32	26	3.70÷28.44	15.63	20	6.90÷26.87	17.24
Kp <sub>2</sub> [%]	19	0.00÷22.67	6.96	26	0.03÷15.62	7.10	20	0.00÷16.24	6.12
Kp <sub>3</sub> [%]	19	0.00÷19.92	6.83	26	0.06÷12.37	2.39	20	0.00÷9.01	1.26
Kp <sub>NMR</sub> [%]	19	10.47÷32.47	25.09	26	13.76÷30.93	25.12	20	15.64÷31.24	24.62
Kp <sub>NMRref</sub> [%]	19	0.00÷26.84	13.78	26	0.09÷25.55	9.49	20	0.07÷24.31	7.38
Sw <sub>nr</sub> [%]	19	9.22÷100.00	47.05	26	15.42÷99.68	64.10	20	22.18÷99.73	71.06

Średnie wartości porowatości całkowitej w poszczególnych otworach nie odbiegają znacznie od siebie i zmieniają się w przedziale  $\overline{Kp}_{NMR} \in 24.62 \div 25.12\%$ . Współczynnikiem porowatości powyżej 20% charakteryzowało się 80% badanych próbek skał. Porowatość efektywna badanych próbek zmienia się w zakresie  $\overline{Kp}_{NMR\_ef} \in 9.49 \div 13.78\%$ .

Najniższą wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną charakteryzują się utwory miocenu w otworze Dzików-12 ( $\overline{Sw}_{nr} = 47.05\%$ ), w pozostałych otworach wartości tego współczynnika są wyższe i zmieniają się w zakresie  $\overline{Sw}_{nr} \in 61.26 \div 64.10\%$ .

Spośród trzech wyżej omawianych otworów najlepsze parametry zbiornikowe posiadały rdzenie wiertnicze z otworu Dzików-12. Na szczególną uwagę zasługują piaskowce średnioziarniste pochodzące z interwału 940.30÷944.85 m, reprezentujące dobre własności zbiornikowe, charakteryzujące się niską wartością współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ( $\overline{Sw}_{nr} = 12.30\%$ ) oraz wysoką zawartością wody wolnej ( $\overline{Kp}_3 = 17.88\%$ ), (Fig. 1, Tab. 2). Średnia wartość współczynnika przepuszczalności piaskowców występujących w tym zakresie głębokości wynosi 472.38 mD.

Próbki reprezentujące strop miocenu (471.80÷906.52 m) mają znacznie gorsze własności zbiornikowe. Charakteryzują się wysoką zawartością wody nieredukowalnej ( $\overline{Sw}_{nr} = 83.93\%$ ) oraz niewielką zawartością wody wolnej ( $\overline{Kp}_3 = 0.29\%$ ) (Fig. 1, Tab. 2). Na podstawie tych danych można stwierdzić, że interwał ten na pewno nie powinien być opróbowywany.



**Fig. 1.** Zmiana poszczególnych parametrów określonych metodą MRJ z głębokością w otworze Dzików-12:  $Kp_1$  – zawartość wody nieredukowalnej [%],  $Kp_2$  – zawartość wody kapilarnej [%],  $Kp_3$  – zawartość wody wolnej [%],  $Kp_{NMR}$  – współczynnik porowatości całkowitej [%],  $Kp_{NMR,ef}$  – współczynnik porowatości efektywnej [%],  $Sw_{nr}$  – współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną [%]

**Fig. 1.** Variability of individual parameters from NMR method with depth in borehole Dzików-12:  $Kp_1$  – irreducible water [%],  $Kp_2$  – capillary water [%],  $Kp_3$  – free water [%],  $Kp_{NMR}$  – total porosity [%],  $Kp_{NMR,ef}$  – effective porosity [%],  $Sw_{nr}$  – irreducible water saturation [%]

**Tabela (Table) 2**

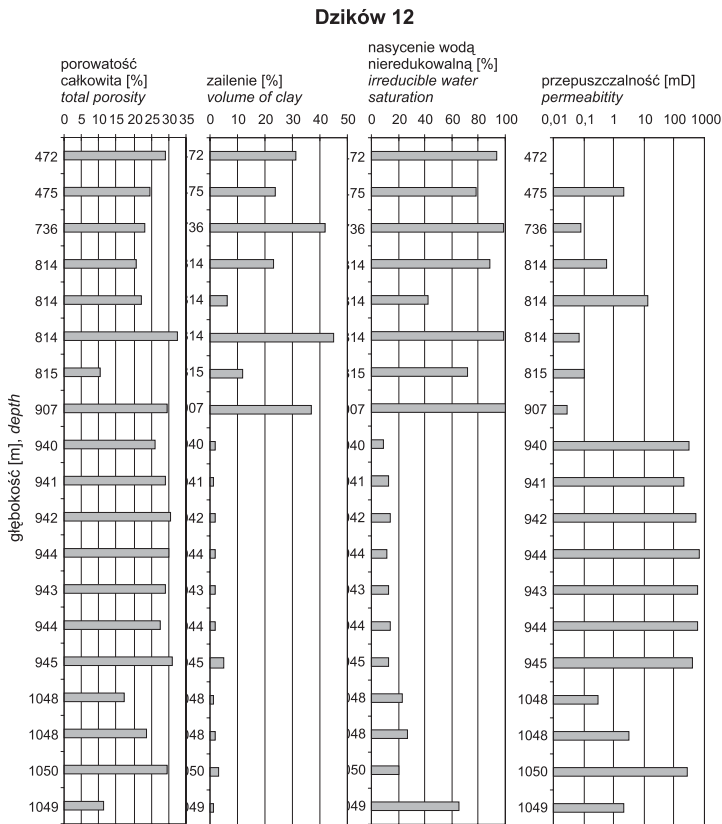
Wyniki interpretacji pomiarów MRJ dla skał z otworu Dzików-12 (interwał głębokościowy 471.80÷906.52 m i 940.30÷944.85 m)

*Results of interpretation of NMR measurements for rocks from borehole Dzików-12 (depth interval: 471.80÷906.52 m and 940.30÷944.85 m)*

Próbka Sample	Głębokość Depth [m]	Zawartość wody [%] Water content [%]			Porowatość [%] Porosity [%]		Nasycenie wodą niereduk. Irreducible water satur.
		niereduk. irreducible	kapilarnej capillary	wolnej free	całkowita total	efektywna effective	
		$Kp_1$	$Kp_2$	$Kp_3$	$Kp_{NMR}$	$Kp_{NMR,ef}$	
6727	471.80	27.16	1.55	0.18	28.89	1.73	94.01
6728	475.27	19.31	5.13	0.26	24.70	5.39	78.18
6729	735.65	22.91	0.28	0.14	23.33	0.42	98.20
6732/A	813.90	18.22	2.31	0.18	20.71	2.49	87.98
6732/B	813.90	9.34	11.76	1.13	22.23	12.89	42.02
6733	814.45	32.13	0.23	0.06	32.42	0.29	99.11
6734	814.90	7.53	2.61	0.33	10.47	2.94	71.92
6738	906.52	29.38	0.00	0.00	29.38	0.00	100.00
6740	940.30	2.42	6.47	17.37	26.26	23.84	9.22
6741	941.40	3.81	9.08	16.02	28.91	25.10	13.18
6742	942.19	4.26	7.29	18.80	30.35	26.09	14.04
6743	943.07	3.45	6.99	19.71	30.15	26.70	11.44
6744	943.40	3.73	7.51	17.98	28.86	25.49	11.68
6745	944.45	3.72	8.41	15.33	27.46	23.74	13.55
6746	944.85	4.01	6.92	19.92	30.85	26.84	13.00

Jak już wcześniej wspomniano, badania skał metodą magnetycznego rezonansu jądrowego pozwalają wyznaczyć jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących przestrzeń porową skał – nasycenie wodą nieredukowalną (nieruchomą)  $Sw_{nr}$ . Określenie ilości wody nieruchomej w przestrzeni porowej jest niezbędne do prawidłowej oceny własności zbiornikowych i filtracyjnych skał (Klaja 2004, Klaja *et al.* 2006, Klaja & Gąsior 2008, Zalewska *et al.* 2007, 2008). Skały mioceńskie charakteryzują się zwykle wysokim współczynnikiem porowatości całkowitej, jednak duża porowatość niejednokrotnie nie oznacza dobrej skały zbiornikowej i tak jest również w przypadku skał pochodzących z otworów Dzików-12, -13 i -15. Badania MRJ są zatem dla skał mioceńskich szczególnie przydatne, ponieważ pozwalają na określenie nie tylko całkowitej porowatości, ale również wyznaczenie rozkładu nasycenia badanych próbek. Analizy rozkładów czasu relaksacji poprzecznej  $T_2$  uzyskanych

dla próbek skał pobranych z omawianych otworów wykazały dużą zmienność współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną ( $S_{w_{nr}}$ ). Woda nieruchoma w skałach mioceńskich zajmuje przede wszystkim przestrzenie międzypakietowe minerałów ilastych oraz mikropory. Zatem zróżnicowanie właściwości zbiornikowych tych skał związane jest w dużej mierze z różnym stopniem zailenia. Wpływ nasycenia wodą nieredukowalną na właściwości zbiornikowe i filtracyjne badanych skał jest bardzo wyraźny. We wszystkich otworach przeważają próbki charakteryzujące się wysoką porowatością, natomiast wielkość nasycenia wodą nieredukowalną waha się od kilku/kilkunastu do stu procent. W rezultacie pomimo wysokiej porowatości, próbki o dużej zawartości wody nieredukowalnej mają słabe właściwości filtracyjne (Fig. 2).

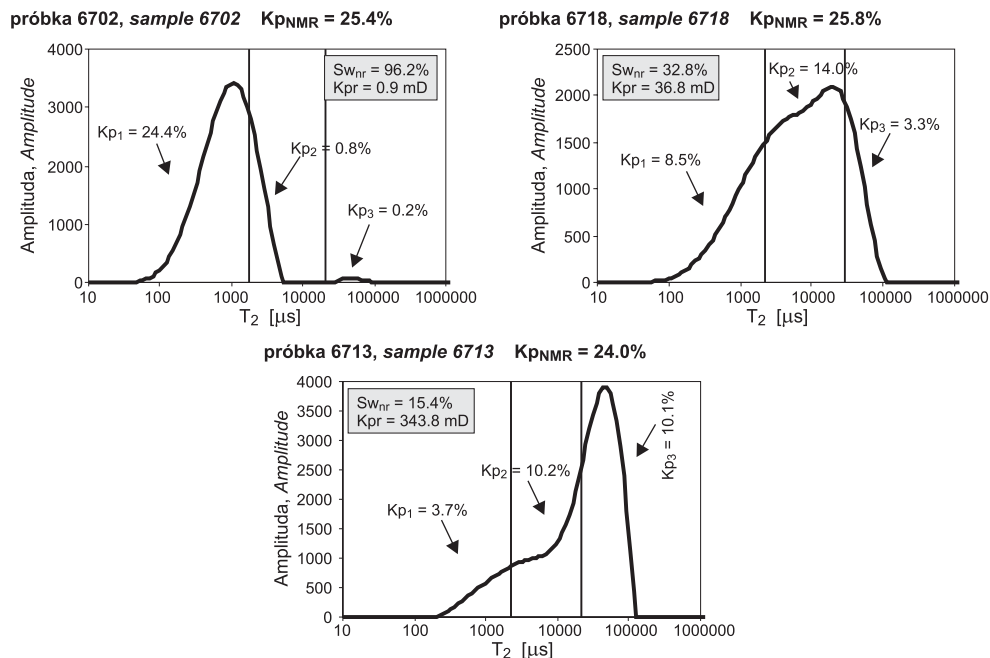


**Fig. 2.** Wpływ wielkości nasycenia wodą nieredukowalną na właściwości zbiornikowe badanych skał w otworze Dzików-12

**Fig. 2.** Influence of irreducible water saturation on rocks reservoir properties in borehole Dzików-12

Podobna zmienność parametrów  $S_{w_{nr}}$  i wielkości zailenia (suma minerałów ilastych wyznaczona metodą ilościowej analizy rentgenowskiej) potwierdza fakt, iż nasycenie wodą nieredukowalną związane jest tutaj przede wszystkim z zaileniem (Fig. 2). Największą zawartością wody nieredukowalnej charakteryzują się mułowce i iłowce. Są to skały o najgorszych właściwościach zbiornikowych i filtracyjnych.

Bardzo czytelna jest również informacja, jaką zawierają w sobie krzywe rozkładu czasu relaksacji  $T_2$  wyznaczone dla poszczególnych próbek. Poniżej przedstawiono przykład rozkładu czasów relaksacji dla trzech próbek pochodzących z badanego rejonu (Fig. 3).

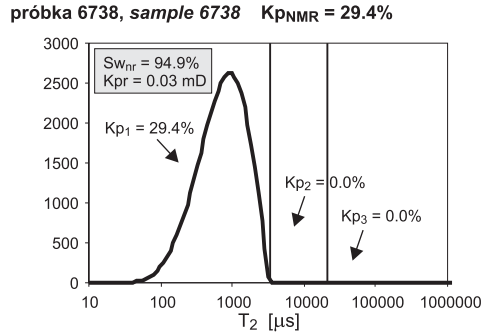


**Fig. 3.** Analiza przestrzeni porowej pod kątem oceny rzeczywistych właściwości zbiornikowych badanych skał na przykładzie próbek z otworu Dzików-13

**Fig. 3.** Pore space analysis to estimate real reservoir properties of rocks from borehole Dzików-13

Wszystkie próbki posiadają niemal identyczny, wysoki współczynnik porowatości ogólnej ( $K_{pNMR}$  ok. 25%), ale kształt zarejestrowanych krzywych relaksacji poprzecznej  $T_2$  wskazuje na odmienne właściwości zbiornikowe i filtracyjne tych skał. Różnią się one bowiem zawartością wody nieredukowalnej ( $K_{p1}$ ), wody kapilarnej ( $K_{p2}$ ) i wolnej ( $K_{p3}$ ) oraz bardzo istotnie różnią się przepuszczalnością ( $K_{pr}$  zmienia się od 0.9 mD, poprzez 36.8 mD, aż do 343.8 mD). Wartość współczynnika przepuszczalności wyraźnie wzrasta wraz ze zmniejszeniem się udziału w przestrzeni porowej wody związanej z łałami i mikroporami ( $K_{p1}$ =24.4%, 8.5%, 3.7%) oraz zwiększeniem się udziału wody wolnej ( $K_{p3}$ =0.2%, 3.3%, 10.1%). Próbką o najsłabszych właściwościach zbiornikowych i filtracyjnych to iłowiec charakteryzujący się dużą zawartością minerałów ilastych (25%), pozostałe dwie to piaskowce droбноziarniste.

Próbka nr 6738 (Fig. 4) należy do skał o najsłabszych właściwościach – pomimo bardzo wysokiej wartości współczynnika porowatości ogólnej ( $K_{pNMR}$ =29.4%), wielkość porowatości dynamicznej ( $K_{p3}$ ) wynosi 0.0% i jest to skała nieprzepuszczalna ( $K_{pr}$ =0 mD). Słabe właściwości zbiornikowe i filtracyjne tej próbki spowodowane są faktem, że cała przestrzeń porowa jest wypełniona wodą nieredukowalną.



**Fig. 4.** Rozkład czasów relaksacji poprzecznej  $T_2$  dla próbki o najsłabszych właściwościach zbiornikowych (otwór Dzików-12)

**Fig. 4.** Transverse relaxation time distribution  $T_2$  for sample of poor reservoir properties (borehole Dzików-12)

## PODSUMOWANIE

Wykonane analizy wskazują, że wpływ nasycenia wodą nieredukowalną na właściwości zbiornikowe i filtracyjne skał miocenijskich jest bardzo wyraźny.

Zróżnicowanie właściwości zbiornikowych i filtracyjnych skał miocenijskich związane jest w dużej mierze z różnym stopniem zailenia, gdyż woda nieruchoma w tych utworach zajmuje przede wszystkim przestrzenie międzypakietowe minerałów ilastych oraz mikropory.

Prawidłowa ocena rzeczywistych właściwości zbiornikowych i filtracyjnych skał powinna uwzględniać wielkość nasycenia wodą nieredukowalną, która pozwala jednoznacznie określić, czy badana skała jest dobrą skałą zbiornikową. Współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną jest szczególnie ważnym parametrem, wykorzystywanym m.in. w konstruowaniu modeli matematycznych umożliwiających wyznaczenie wielkości przepuszczalności absolutnej i przepuszczalności fazowych skał w profilach otworów wiertniczych poszczególnych rejonów.

*Praca została zrealizowana w latach 2006-2007 w ramach badań wspólnych sieci naukowej: „Metody jądrowe dla geofizyki” koordynowanych w IFJ PAN i finansowanych przez MNiSW na podstawie Decyzji 620/E-77/SN-007/2006 i 620/E-77/SN-0007/2007.*

*Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.*

## LITERATURA

- Ciechanowska M., Zalewska J., Cebulski D. & Niedoba A., 2001. Zastosowanie pomiarów jądrowego rezonansu magnetycznego do określania geofizycznych parametrów skał. *Dokumentacja zlec. 266/SW*, Archiwum INiG.



- Ciechanowska M. & Zalewska J., 2002. Analiza zbiornikowych własności skał przy wykorzystaniu zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego NMR. *Nafta-Gaz*, 1, 32–44.
- Chang D., Vinegar H., Morris Ch. & Straley Ch., 1997. Effective Porosity, Producibile Fluid and Permeability in Carbonates from NMR Logging. *The Log Analyst*, March-April, 60–72.
- Jarzyna J., 1998. Otworowe profilowanie jądrowego rezonansu magnetycznego – nowa, efektywna metoda wyznaczania właściwości zbiornikowych skał. *Nafta-Gaz*, 5, 215–222.
- Kenyon W.E., 1998. Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging. *The Log Analyst*, March-April, 21–43.
- Klaja J., 2004. Wykorzystanie gradientu pola magnetycznego w badaniach skał mioceńskich metodą magnetycznego rezonansu jądrowego. *Nafta-Gaz*, 9, 423–430.
- Klaja J., Kowalska S. & Przelaskowska A., 2006. Badania zawartości wody nieruchomej metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) w piaskowcach o zróżnicowanej litologii. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 32, 4, 463–477.
- Klaja J. & Gąsior I., 2008. Zastosowanie metody magnetycznego rezonansu jądrowego do oceny parametrów zbiornikowych skał na przykładzie złoża gazu ziemnego Palikówka. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 155, 1–77.
- Kleinberg R.L. & Vinegar H.J., 1996. NMR Properties of Reservoir Fluids. *The Log Analyst*, November-December, 20–32.
- Ostroff G.M., Shorey D.S. & Georgi D.T., 1999. Integration of NMR and conventional log data for improved petrophysical evaluation of shaly sands. *SPWLA 40<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*, Oslo, 0001–4.
- Ramakrishnan T.S, Schwartz L.M., Fordham E.J., Kenyon W.E. & Wilkinson D.J., 1999. Forward Models for Nuclear Magnetic Resonance in Carbonate Rocks. *The Log Analyst*, 40, 4, 260–270.
- Zalewska J., Gąsior I., Cebulski D., Przelaskowska A., Kowalska S., Klaja J., Sikora G., Dohnalik M., Such P., Leśniak G., Darłak B. & Kowalska-Włodarczyk M., 2007. Wykonanie badań właściwości fizycznych i mineralogicznych rdzeni wiertniczych w aspekcie budowy modelu interpretacyjnego. Badania porównawcze dla pomiarów wykonanych techniką NMR. Naukowa sieć tematyczna Metody Jądrowe dla Geofizyki, *Dokumentacja zlec. 100/SW*, Archiwum INiG.
- Zalewska J., Gąsior I., Cebulski D., Przelaskowska A., Kowalska S., Sikora G., Dohnalik M., Such P., Leśniak G., Darłak B. & Kowalska-Włodarczyk M., 2008. Wybór nowego profilu litostratygraficznego i wykonanie badań właściwości fizycznych i mineralnych rdzeni wiertniczych (uzyskanych z nowych odwiertów poszukiwawczych) w aspekcie rozbudowy modelu interpretacyjnego. Analiza próbek techniką NMR dla wybranych rdzeni wiertniczych. Naukowa sieć tematyczna Metody Jądrowe dla Geofizyki, *Dokumentacja zlec. 993/SW*, Archiwum INiG.