

BADANIA ZAWARTOŚCI WODY NIERUCHOMEJ METODĄ MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO (NMR) W PIASKOWCACH O ZRÓŻNICOWANEJ LITOLOGII

**Investigations of the irreducible water content
in different types of sandstones
using the nuclear magnetic resonance method (NMR)**

Jolanta KLAJA & Anna PRZELASKOWSKA

*Instytut Nafty i Gazu, Zakład Geofizyki Wiertniczej; ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków;
e-mail: Klaja@inig.pl, Przelaskowska@inig.pl*

Treść: Przeprowadzono ocenę zawartości wody nieruchomej metodą magnetycznego rezonansu jądrowego. Określenie ilości wody nieruchomej w przestrzeni porowej jest niezbędne do wyznaczenia porowatości dynamicznej, a co za tym idzie – charakterystyki własności zbiornikowych skał. Kluczowym parametrem w tego typu badaniach jest czas graniczny T_{2G} (parametr umożliwiający rozdzielenie wody nieruchomej od wolnej). Parametr T_{2G} wyznaczono dla piaskowców reprezentujących różne baseny sedimentacyjne. Zmienność wyznaczonych wartości T_{2G} (3–15 ms) związana jest ze zróżnicowaniem wykształcenia przestrzeni porowej i składu mineralnego badanych skał. Średnia wartość wyznaczonego czasu granicznego (9.14 ms) znacząco odbiega od wartości średniej (33 ms) podawanej dla piaskowców w literaturze. Przyjęcie wartości $T_{2G} = 33$ ms może spowodować, że błędy w określeniu porowatości dynamicznej będą sięgać nawet 100%. Widoczne jest więc, że określenie rzeczywistych czasów odcięcia badanych skał jest bardzo istotne dla prawidłowej interpretacji pomiarów NMR.

Słowa kluczowe: magnetyczny rezonans jądrowy, woda nieruchoma, woda wolna, czas poprzecznej relaksacji T_2

Abstract: The irreducible water content has been evaluated using nuclear magnetic resonance (NMR) method. Estimation of the irreducible water content in the pore space is indispensable for the productive porosity evaluation and characteristics of the reservoir properties of rocks. The irreducible water content has been established calculating the cutoff time T_{2G} (parameter which enables the division between irreducible and free water). Different types of sandstones were investigated. Variability of the estimated T_{2G} values (3–15 ms) is connected with the diversity of the pore space structure and mineralogy of the investigated rocks. The average T_{2G} value (9.14 ms) established experimentally differs considerably from the average value presented in the literature (33 ms). Use of an average $T_{2G} = 33$ ms value in the interpretation of the NMR measurements may result in great, even 100 percent errors in the estimation of the producible porosity. Thus, it is clear that investigations of real T_2 values for rocks from different sedimentary basins is necessary.

Key words: nuclear magnetic resonance (NMR), irreducible water, free water, transverse relaxation time T_2

WSTĘP

Zawartość wody nieruchomej (wody związanej z łałami i uwięzionej w kapilarach) jest szczególnie ważnym parametrem, koniecznym do określenia tzw. porowatości dynamicznej (stosunek objętości migrującego medium w skałce do całkowitej objętości skałki – Plewa 1992) i charakterystyki własności zbiornikowych skał. Znajomość tego parametru wpływa w znacznym stopniu na zwiększenie wiarygodności wyników interpretacji profilowań geofizycznych pod kątem wyznaczania poziomów perspektywicznych oraz obliczeń szacunkowych zasobów badanych złóż ropy i gazu.

Metodą, która umożliwi szacowanie zawartości wody nieruchomej w sposób najbardziej wiarygodny, jest magnetyczny rezonans jądrowy (NMR) (Kenyon 1997).

Rozdzielenie wody nieruchomej od wody wolnej umożliwiają pomiary czasów relaksacji poprzecznej T_2 . Kluczowym parametrem wykorzystywanym w interpretacji jest tzw. czas graniczny T_{2G} . W opracowaniach z zakresu magnetycznego rezonansu jądrowego przyjmowana jest często dla piaskowców średnia wartość T_{2G} równa 33 ms (wyznaczona dla nasycenia resztkowego uzyskanego przy ciśnieniu kapilarnym równym 100 psi) (Kenyon *et al.* 1995, Kenyon 1997, Straley 1997, Coates *et al.* 1999). Chociaż w wielu przypadkach wartość ta jest prawidłowa, zdarza się jednak często, że znacznie odbiega od rzeczywistych wielkości T_{2G} , które mogą się zmieniać w granicach nawet od 1.5 ms do 75 ms (Xie & Guihéneuf 2000). Powodem takiego stanu rzeczy jest fakt, iż na wielkość T_{2G} wpływa bardzo wiele parametrów związanych z litologią badanych skał, takich jak: skład mineralny, struktura, sposób wykształcenia powierzchni porów, stosunek wielkości gardzieli do wielkości porów i wiele innych nie rozpoznanych jeszcze czynników (Bowers *et al.* 1995, Coates *et al.* 1999). Szeroki zakres zmian T_{2G} potwierdza konieczność wyznaczania rzeczywistych wartości tego parametru (Ostroff 1999).

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania parametru T_{2G} , w której stan resztkowego nasycenia skał uzyskuje się poprzez eksperyment wirowania skał dla rosnących ciśnień kapilarnych. Wyniki badań pozwoliły na określenie rzeczywistych czasów granicznych dla piaskowców o zróżnicowanej litologii.

PODSTAWY TEORETYCZNE

W metodzie magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR) wykorzystuje się zjawisko oddziaływania pola magnetycznego na jądra atomów wodoru.

Z punktu widzenia fizyki klasycznej wirujące jądro jest wirującym ładunkiem elektrycznym, który wytwarza moment magnetyczny. W obecności zewnętrznego stałego i silnego pola magnetycznego B_0 jądra o spinie niezerowym układają się wzdłuż linii sił tego pola. Nie jest to proces natychmiastowy – dojście do stanu równowagi odbywa się poprzez ruch precesyjny. Częstotliwość precesji jąder nosi nazwę częstotliwości Larmora f_0 i jest wprost proporcjonalna do natężenia pola

$$f_0 = \frac{\gamma |\vec{B}_0|}{2\pi} \quad (1)$$

gdzie γ – współczynnik żyromagnetyczny (stały i charakterystyczny dla danego pierwiastka).

W stanie równowagi powstaje wypadkowy moment magnetyczny \vec{M} o kierunku zgodnym z \vec{B}_0 zwany magnetyzacją jądrową (Hennel & Kryst-Widźgowska 1995).

Zjawisko rezonansu powstaje wtedy, gdy przyłożymy dodatkowe, o wiele słabsze od \vec{B}_0 , zewnętrzne, zmienne pole magnetyczne \vec{B}_1 o częstotliwości f_{RF} równej częstotliwości Larmora f_0 i prostopadłe do kierunku stałego pola \vec{B}_0 .

W praktyce pole \vec{B}_1 wytwarza się w solenoidzie otaczającym badaną próbkę. Przykładając pole \vec{B}_1 w postaci krótkiego impulsu, powodujemy wychylenie wektora magnetyzacji \vec{M} od położenia początkowego o pewien kąt (np. 90°). Po ustąpieniu impulsu wektor magnetyzacji powraca do wyjściowego położenia równowagi. Ruch magnetyzacji w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku pola \vec{B}_0 generuje w cewce siłę elektromotoryczną, która zanika w czasie (sygnał FID – *Free Induction Decay* – sygnał swobodnej precesji lub zanik swobodnej indukcji) (Xie & Guihéneuf 2000).

Proces relaksacji jąder wodoru, czyli powrotu magnetyzacji do położenia równowagi, ma charakter eksponencjalny. Charakteryzują go dwie stałe czasowe (Jarzyna 1998):

T_1 – czas relaksacji podłużnej;

T_2 – czas relaksacji poprzecznej.

T_1 i T_2 zależą od takich własności badanego ośrodka skalnego, jak: rozmiar porów, rodzaj płynów wypełniających pory, zawartość wody ruchomej, wody związanej w łańcuchach i zamkniętej w kapilarach, przepuszczalność, resztkowe nasycenie węglowodorami, lepkość ropy naftowej (Coates *et al.* 1999).

Pomiar T_2 jest o wiele krótszy niż T_1 i dlatego preferowany zarówno w profilowaniach otworowych, jak i badaniach laboratoryjnych. Polega on na wykonaniu eksperymentu CPMG, w którym po impulsie 90° zadaje się szereg impulsów 180° w stałym odstępie czasu (taki sposób pomiaru eliminuje wpływ niejednorodności pola magnetycznego na czas zaniku poprzecznej składowej magnetyzacji) (Kenyon 1997, Xie & Guihéneuf 2000).

Na podstawie zarejestrowanych punktów pomiarowych tworzy się krzywe rozkładu T_2 poprzez dopasowanie sumy pojedynczych eksponent o stałych T_{2i} według wzoru

$$M(t) = \sum A_i \exp(-t/T_{2i}), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

gdzie:

$M(t)$ – zanik składowej poprzecznej magnetyzacji,

t – czas,

A_i – wyznaczana amplituda dla T_{2i} ,

n – ilość zadanych wartości T_2 .

Dla skał nasyconych w 100% płynem jednorodnym dystrybucja czasów relaksacji poprzecznej T_2 odzwierciedla rozkład wielkości porów, w którym najdłuższe czasy T_2 odpowiadają porom największym. Ta bezpośrednia zależność pozwala na wyznaczenie takiej wartości T_2 , zwanej czasem granicznym T_{2G} , która dzieli obszar pod krzywą dystrybucji T_2 na dwie części (Fig. 1) (Coates *et al.* 1999).

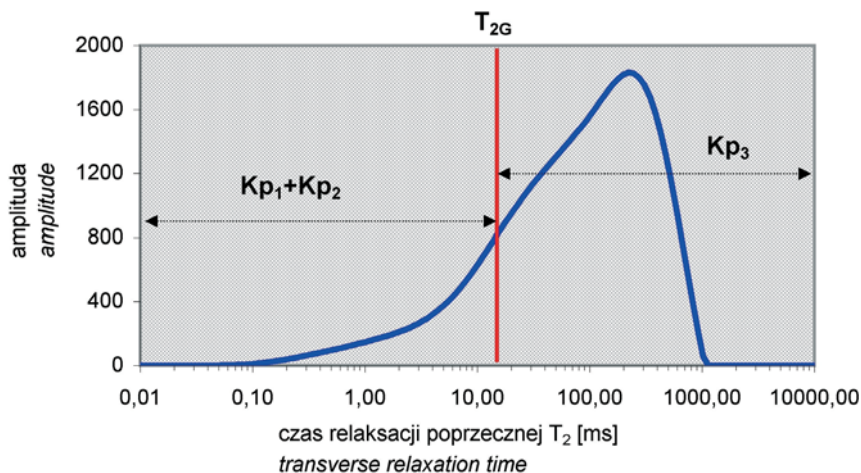


Fig. 1. Przykład podziału przestrzeni porowej piaskowca na część wypełnioną wodą nieruchomą ($Kp_1 + Kp_2$) i wodą wolną (Kp_3), T_{2G} – czas graniczny

Fig. 1. Division of the sandstone pore space into parts filled with irreducible water ($Kp_1 + Kp_2$) and free water (Kp_3), T_{2G} – cutoff time

Pierwsza część – odpowiadająca czasom $T_2 \leq T_{2G}$ – odzwierciedla przestrzeń porową wypełnioną wodą związaną z iłami i zatrzymaną w kapilarach ($Kp_1 + Kp_2$), a zatem zawiera informację o zawartości wody nieruchomej. Część druga (Kp_3) stanowi wodę wolną (porowatość dynamiczna).

Wartość parametru T_{2G} dla danej skały jest określana eksperymentalnie poprzez porównanie dwóch rozkładów T_2 otrzymanych z dwóch pomiarów dla tej samej próbki:

- w stanie stuprocentowego nasycenia ($S_w = 100\%$),
- w stanie resztkowego nasycenia ($S_w = S_{wr}$).

Wyznaczanie nasycenia resztkowego

Stan resztkowego nasycenia próbek uzyskać można poprzez eksperyment wirowania skał w odpowiednim ciśnieniu równym średniemu ciśnieniu kapilarnemu dla danego zbiornika. Jeżeli ciśnienie kapilarne zbiornika, z którego pochodzi badana skała, nie jest znane lub zmienia się w szerokim zakresie, wówczas eksperyment wirowania należy wykonać dla kilku różnych ciśnień, dobierając odpowiednio parametry wirowania. Stan nasycenia resztkowego próbka osiągnie wówczas, gdy pomimo wzrostu ciśnienia nasycenie nie będzie znacząco maleć (Coates *et al.* 1999).

Podczas wirowania powietrze zastępuje wodę, a krzywe dystrybucji czasów relaksacji zmieniają się w sposób zgodny z regułami drenażu kapilarnego, który decyduje o rozmieszczeniu płynów w wirowanej próbce. W zamieszczonym przykładzie (Fig. 2) przedstawiony jest wpływ zmiany nasycenia na rozkład T_1 (czas relaksacji podłużnej), analogicznie zmieniają się wykorzystywane w pracy krzywe rozkładu T_2 (czas relaksacji poprzecznej). Widoczne na figurze 2 wąskie rurki to połączenia, przez które woda może odpływać, w czasie gdy powietrze wchodzi do porów. Wzrost ciśnienia kapilarnego jest przedstawiony przez

zwiększenie wysokości otwartych porów ponad kontakt powietrze/woda. Kiedy warstwa jest nasycona w 100% płynem, wówczas trzy różne rozmiary porów zaznaczą się w postaci trzech pików dystrybucji T_1 (Fig. 2A).

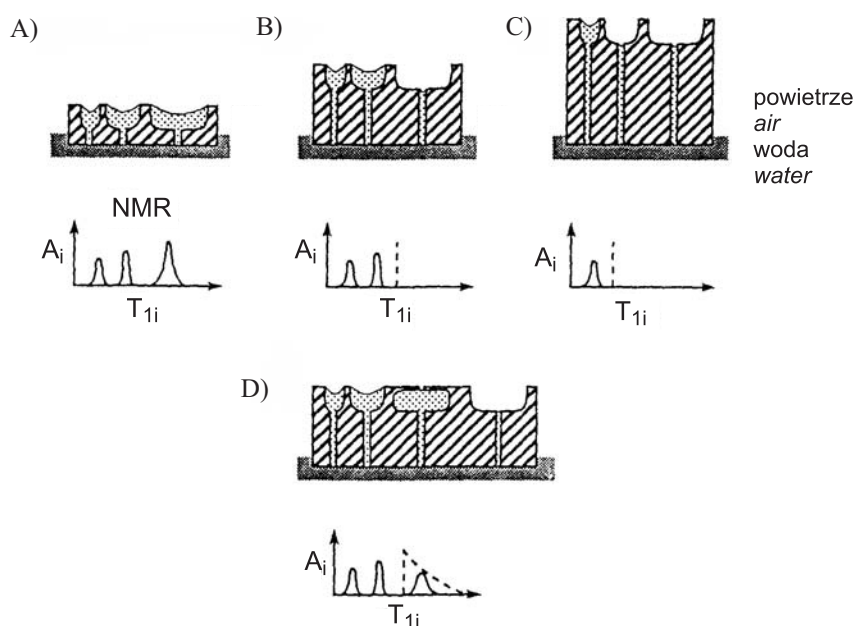


Fig. 2. Relacja pomiędzy drenażem kapilarnym a rozkładem T_1 dla różnych nasycień (Straley 1995): A – amplituda, T_1 – czas relaksacji podłużnej

Fig. 2. Relationship between capillary drainage and T_1 distribution for various saturation values (Straley 1995): A – amplitude, T_1 – longitudinal relaxation time

Kiedy ciśnienie kapilarne wzrośnie (np. podczas wirowania próbki), woda odpływa z porów, a jej miejsce zajmuje powietrze. Ponieważ powietrze nie daje sygnału NMR, pik związany z długim czasem relaksacji znika z rozkładu T_1 (Fig. 2B). Przy najwyższym ciśnieniu kapilarnym powietrze zastępuje płyn w porach o największym i średnim rozmiarze, co na rozkładzie T_1 odzwierciedli się poprzez zniknięcie pików związanych ze składowymi o długich i średnich czasach relaksacji (Fig. 2C). W przypadku występowania w dużych porach wąskich gardzieli (Fig. 2D) powietrze nie jest w stanie zastąpić wody w pośrednim ciśnieniu kapilarnym. Wówczas w rozkładzie T_1 składowa o długim czasie relaksacji zanika tylko częściowo – amplituda pików zostanie zredukowana częściowo (Straley *et al.* 1995).

Wyznaczanie czasu granicznego T_{2G}

Czas graniczny T_{2G} jest wartością, dla której amplituda kumulacyjna rozkładu T_2 próbki nasyconej w 100% jest równa całkowitej amplitudzie rozkładu T_2 dla próbki w stanie nasycenia resztkowego S_{wr} (Coates *et al.* 1999).

Parametr T_{2G} określany jest poprzez wyznaczenie najmniejszej bezwzględnej wartości różnicy amplitudy kumulacyjnej (dla $S_w = 100\%$) i całkowitej (dla S_{wr}) obliczonej dla każdego T_2 (Fig. 3). Graficzny sposób wyznaczenia wielkości T_{2G} przedstawiono poniżej (Fig. 4).

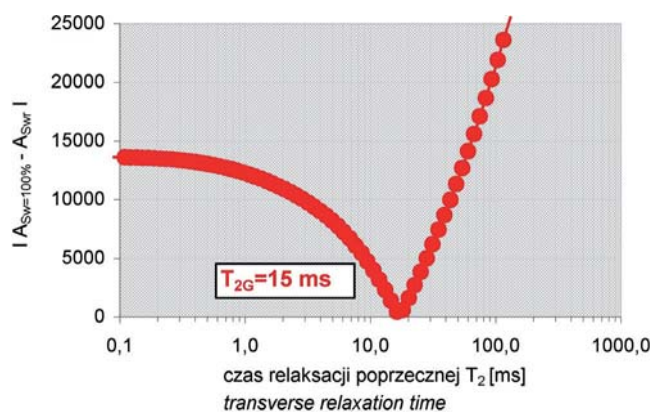


Fig. 3. Określanie wartości parametru T_{2G} : $A_{S_w} = 100\%$ – amplituda sygnału dla 100% nasycenia, $A_{S_{wr}}$ – amplituda sygnału dla nasycenia resztkowego, T_{2G} – czas graniczny

Fig. 3. Estimation of the T_{2G} value: $A_{S_w} = 100\%$ – signal amplitude for total (100%) saturation, $A_{S_{wr}}$ – signal amplitude for residual saturation, T_{2G} – cutoff time

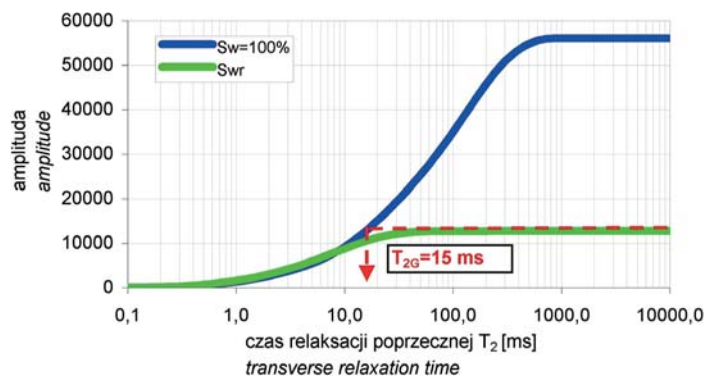


Fig. 4. Określenie wartości czasu granicznego T_{2G} przez porównanie krzywych kumulacyjnych rozkładów T_2 dla 100% nasycenia ($S_w = 100\%$) i dla nasycenia resztkowego (S_{wr})

Fig. 4. Estimation of the T_{2G} value through comparison of the cumulative T_2 distribution curves for total saturation ($S_w = 100\%$) and for residual saturation (S_{wr})

WYKONANE BADANIA

Badania przeprowadzono dla 12 różnego rodzaju piaskowców z basenów sedymentacyjnych interesujących z punktu widzenia poszukiwań węglowodorów: karpackie piaskowce kredowe (warstwy istebniańskie, próbki 3–5), piaskowce z basenu mioceńskiego

przedgórza Karpat (próbki 6–8), piaskowce z basenu czerwonego spągowca (próbki 9–14). Dodatkowo przebadano dwie próbki jednorodnych piaskowców o bardzo dobrych własnościach zbiornikowych (piaskowiec triasowy z obrzeżenia Gór Świętokrzyskich, próbki 1–2). Próbkę nasycano solanką o stężeniu 50 g/l lub 250 g/l, odpowiednio do prawdopodobnej mineralizacji wody złożowej w warunkach *in situ*. Pomiary wykonano za pomocą analizatora rdzeni NMR Maran 7 firmy Resonance wyposażonego w magnes stały generujący pole o natężeniu 0.186 tesli. Częstotliwość precesji jąder wodoru w obecności takiego pola wynosi 7.9 MHz.

Pomiary wykonano wg następującego schematu:

- pomiar T_2 metodą CPMG dla próbek nasyconych w 100% solanką;
- eksperyment wirowania próbek w celu wyznaczenia nasycenia resztkowego;
- pomiar T_2 dla próbek w stanie nasycenia resztkowego (S_{wr});
- wyznaczenie czasu granicznego T_{2G} przez porównanie rozkładów T_2 dla próbki w stanie nasycenia całkowitego ($S_w = 100\%$) i nasycenia resztkowego (S_{wr}).

Wartości nasycenia resztkowego określono przy wykorzystaniu eksperymentu wirowania skał w różnych ciśnieniach kapilarnych (Straley 1995, Tiab & Donaldson 1996).

Do obliczeń wykorzystano następującą zależność (Straley 1995)

$$(P_c)_i = 7.252 \cdot 10^{-5} \omega^2 \Delta\rho (r_e^2 - r_i^2) \quad (3)$$

gdzie:

- $(P_c)_i$ – ciśnienie kapilarne w tzw. części wlotowej rdzenia (położonej najbliżej osi wirówki [psi] (Fig. 5),
- $\Delta\rho$ – różnica gęstości dwóch faz (w naszym przypadku solanki i powietrza) [kg/m^3],
- ω – prędkość kątowna [s^{-1}],
- r_e, r_i – odległość od osi wirówki do „spągu” i „stropu” rdzenia [m] (Fig. 5).

Skały wirowano w wirówce wyposażonej w rotor horyzontalny (maksymalna liczba obrotów/min: 5000) zgodnie z procedurą zastosowaną przez Straley *et al.* (1995). W celu zmniejszenia nasycenia proces wirowania powtarzano przy większej prędkości wirowania. Wielkość nasycenia określano wagowo przez porównanie masy próbki nasyconej solanką

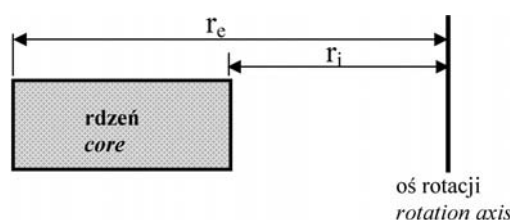


Fig. 5. Geometria układu wirującego: r_i, r_e – odległość od osi wirówki do „spągu” (r_i) i „stropu” (r_e) rdzenia

Fig. 5. Geometry of the centrifuging arrangement: r_i, r_e – distances between the rotation axis and the end planes of the core

w 100% z masą próbki uzyskaną po odwirowaniu w danym ciśnieniu kapilarnym. Otrzymane wyniki wykorzystano do wykreślenia krzywych zmiany nasycenia ze wzrostem ciśnień kapilarnych obliczonych wg wzoru (3).

Pomiary czasu poprzecznej relaksacji T_2 wykonano dla wszystkich próbek w stanie nasycenia całkowitego ($S_w=100\%$) i resztkowego (S_{wr}).

Dla próbki nr 2 (piaskowiec triasowy) pomiar T_2 wykonano nie tylko w stanie nasycenia całkowitego ($S_w = 100\%$) i resztkowego (S_{wr}), lecz również dla etapów pośrednich uzyskanych dla różnych ciśnień kapilarnych (Fig. 6). Eksperyment taki wykonano w celu prześledzenia, jak redukcja nasycenia odzwierciedla się na krzywych rozkładu T_2 . Widać wyraźnie, że wraz z redukcją nasycenia zanikają składniki rozkładu T_2 o długich czasach. Krzywa w zakresie krótkich czasów pozostaje zasadniczo nie zmieniona, chociaż można zauważyć tendencję do zwiększenia amplitudy w tej części rozkładu. Jest to prawdopodobnie spowodowane tworzeniem się w czasie drenażu bardzo cienkich warstewek solanki (tzw. filmów) na powierzchniach większych porów (Toporkov *et al.* 2002). Generalnie zaznacza się gwałtowne usuwanie składowych rozkładu o długich T_2 i sukcesywne przesuwanie się krzywych dystrybucji T_2 w stronę niskich czasów. Niskie wartości T_2 , które korespondują z solanką wypełniającą pory małe, wskazują na obecność płynów nieruchomych. Krzywa dystrybucji T_2 zmienia się zatem w sposób zgodny z regułami drenażu kapilarnego, który decyduje o rozmieszczeniu solanki w wirowanym rdzeniu.

Dla próbek 1 i 2 (piaskowiec triasowy) stan resztkowego nasycenia otrzymano przy ciśnieniu kapilarnym 65 psi, świadczy o tym nieznaczna zmiana nasycenia próbki po wirowaniu próbki w wyższych ciśnieniach (Fig. 6). Dla wszystkich pozostałych próbek stan nasycenia resztkowego osiągnięto w ciśnieniu kapilarnym 100 psi.

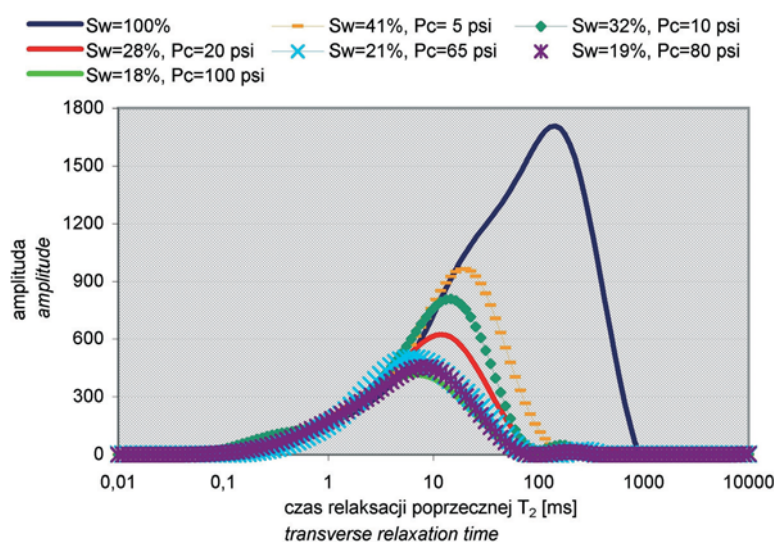


Fig. 6. Krzywe rozkładu T_2 dla próbki nr 2 w różnych stanach nasycenia: S_w – wartość nasycenia, P_c – ciśnienie kapilarne

Fig. 6. T_2 distribution curves (sample no 2) for different saturation values: S_w – saturation value, P_c – capillary pressure

Czas graniczny T_{2G} wyznaczono, jak opisano powyżej, porównując amplitudę kumulacyjną rozkładu T_2 próbki nasyconej w 100% z całkowitą amplitudą rozkładu T_2 dla próbki w stanie nasycenia resztkowego (Fig. 7).

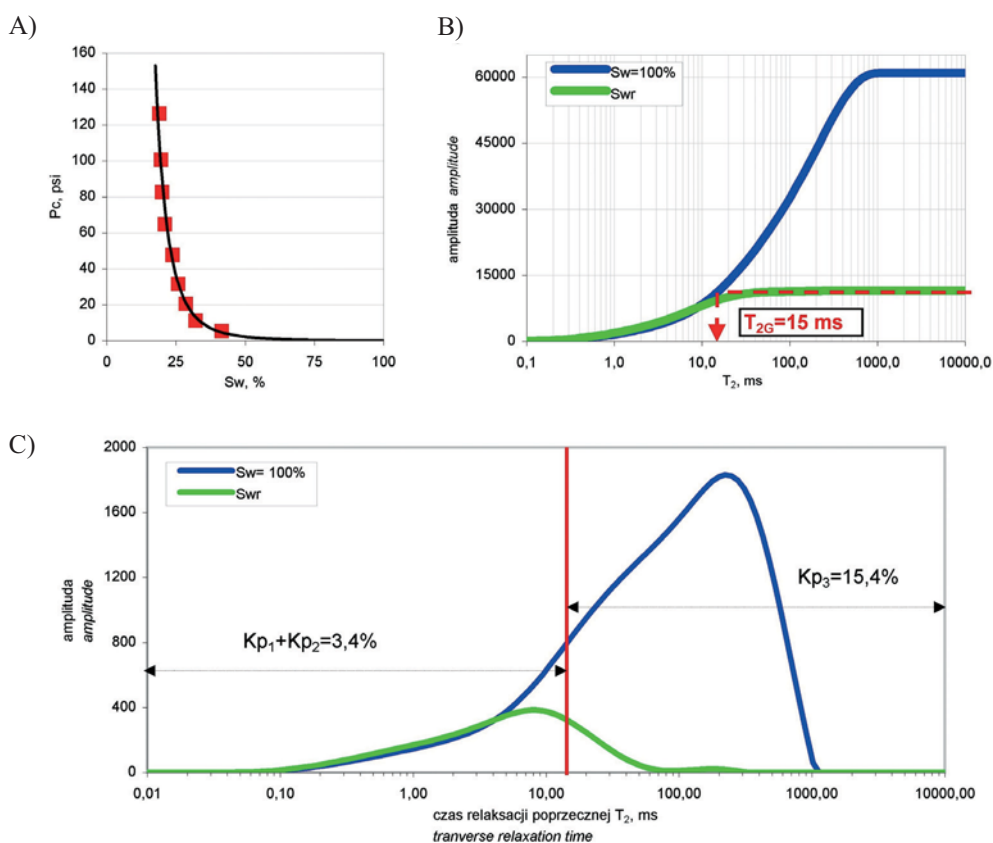


Fig. 7. Przykład interpretacji wyników pomiarów NMR (próbka nr 2): A) krzywa ciśnień kapilarnych wyznaczona metodą wirowania; B) określenie parametru T_{2G} ; C) zestawienie rozkładów T_2 dla 100% nasycenia ($S_w = 100\%$) i dla nasycenia resztkowego (S_{wr}); $K_{p_1} + K_{p_2}$ – woda nieruchoma, K_{p_3} – woda wolna

Fig. 7. An example of the NMR measurements interpretation (sample no. 2); A) capillary pressure curve established by the centrifugation method; B) determination of the T_{2G} parameter; C) comparison of T_2 distributions for total saturation ($S_w = 100\%$) and for residual saturation (S_{wr}); $K_{p_1} + K_{p_2}$ – irreducible water, K_{p_3} – free water

Uzyskana średnia wartość parametru T_{2G} wynosi 9.14 ms, a więc znacząco odbiega od standardowo przyjmowanej średniej wielkości 33 ms. Parametr ten zmienia się w zakresie 3–15 ms (Fig. 8, Tab. 1).

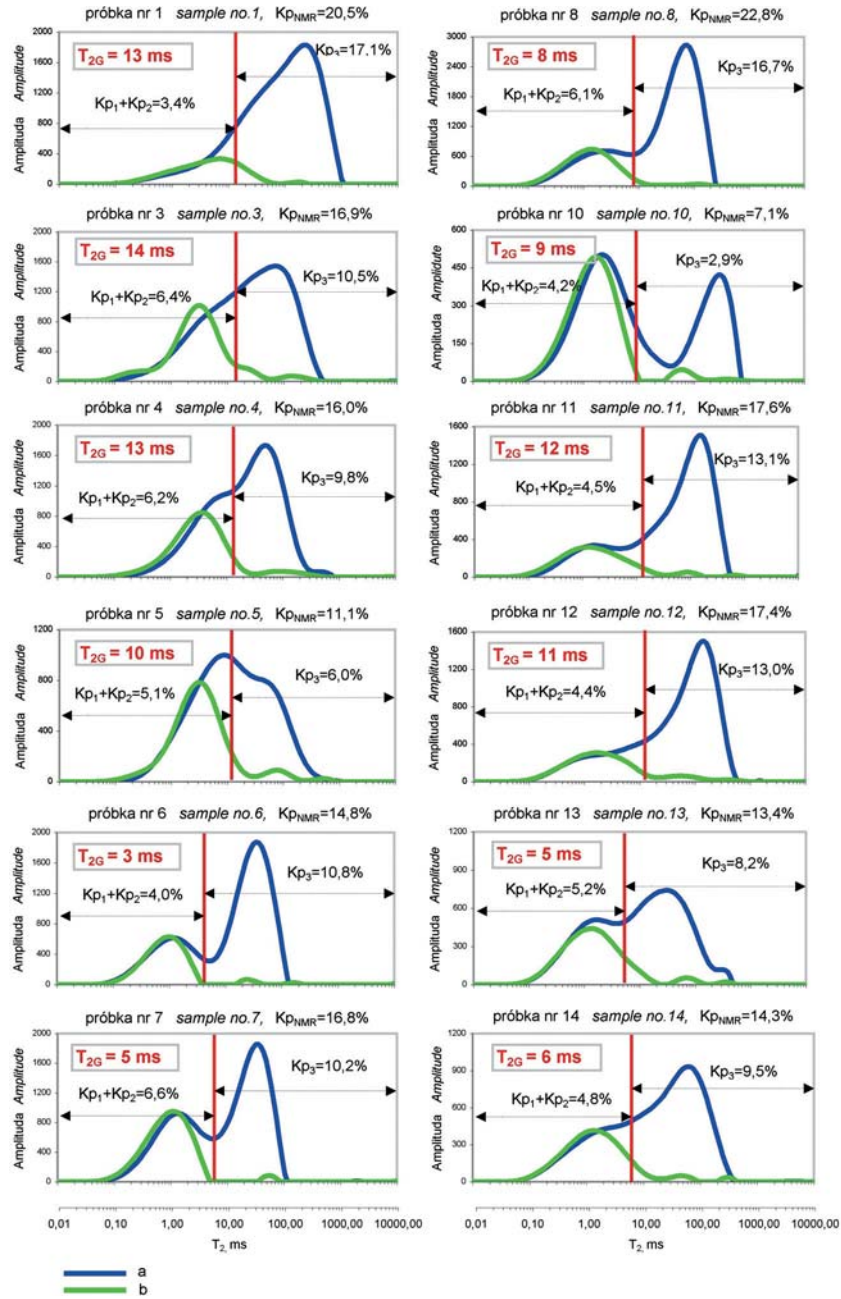


Fig. 8. Zestawienie rozkładów czasu relaksacji poprzecznej T_2 dla wybranych próbek: a – próbka nasycona w 100% solanką; b – próbka w stanie nasycenia resztkowego; K_{pNMR} – porowatość całkowita

Fig. 8. Set of the distribution curves of the transverse relaxation time T_2 for chosen samples: a – 100% saturated sample; b – sample in state of residual saturation; K_{pNMR} – total porosity

Tabela (Table) 1

Zestawienie wyników pomiarów NMR: Kp_{NMR} – porowatość całkowita, $Kp_1 + Kp_2$ – woda nieruchoma, Kp_3 – woda wolna, Swr – nasycenie resztkowe, T_{2G} – czas graniczny

The results of the NMR measurements: Kp_{NMR} – total porosity, $Kp_1 + Kp_2$ – irreducible water, Kp_3 – free water, Swr – residual saturation, T_{2G} – cutoff time

Próbka Sample	Rejon Region	Kp_{NMR} [%]	Kp_1+Kp_2 [%]	Kp_3 [%]	Swr [%]	T_{2G} [ms]
1	Piaskowce triasowe z obrzeżenia Gór Świętokrzyskich	20.5	3.4	17.1	16.8	13
2	<i>Triassic sandstones from the border of the Holly Cross Mountains</i>	18.8	3.4	15.4	18.1	15
3	Kredowe piaskowce karpackie	16.9	6.4	10.5	38.0	14
4	<i>Cretaceous Carpathian sandstones</i>	16.0	6.2	9.8	38.9	13
5		11.1	5.1	6.0	46.1	10
6	Piaskowce z basenu mioceń- skiego przedgórze Karpat	14.8	4.0	10.8	27.1	3
7	<i>Miocene sandstones from the Carpathian Foredeep</i>	16.8	6.6	10.2	39.5	5
8		22.8	6.1	16.7	26.7	8
9		6.4	4.5	1.9	70.1	4
10		7.1	4.2	2.9	58.7	9
11	Piaskowce z basenu czerwonego spągowca	17.6	4.5	13.1	25.8	12
12	<i>Rotliegend sandstones</i>	17.4	4.4	13.0	25.2	11
13		13.4	5.2	8.2	38.7	5
14		14.3	4.8	9.5	33.4	6

Widoczne jest, że dla próbek pochodzących z tego samego basenu sedymentacyjnego zmienność T_{2G} jest nieco mniejsza i wynosi:

- dla piaskowców mioceńskich z przedgórze Karpat: 3–8 ms,
- dla karpackich piaskowców kredowych: 10–15 ms,
- dla piaskowców czerwonego spągowca: 4–12 ms.

Należy zaznaczyć, że wykonane badania miały na celu jedynie przetestowanie metody wyznaczania czasów T_{2G} i uzyskanie informacji dotyczących zmienności tego parametru. Otrzymane wyniki nie pozwalają scharakteryzować basenów sedymentacyjnych, z których pochodziły badane skały i obliczyć dla nich średnich wartości T_{2G} , gdyż ilość przebadanych skał z danego basenu była za mała.

Właściwe oszacowanie czasu granicznego pozwala na poprawne określenie zawartości wody nieruchomej, a co za tym idzie wielkości porowatości dynamicznej. Widać to wyraźnie na wykresie zależności pomiędzy porowatością dynamiczną a przepuszczalnością (Fig. 9).

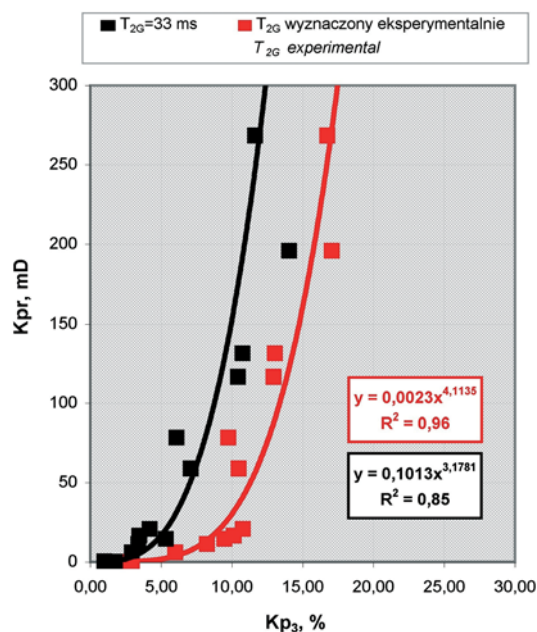


Fig. 9. Zależności pomiędzy porowatością dynamiczną (Kp_3) oszacowaną dla T_{2G} wyznaczonego eksperymentalnie i dla $T_{2G} = 33$ ms a przepuszczalnością (Kpr)

Fig. 9. Relationship between productive porosity (Kp_3) obtained for experimental T_{2G} value and for $T_{2G} = 33$ ms, and permeability (Kpr)

Porowatość dynamiczna obliczona dla T_{2G} wyznaczonego eksperymentalnie koreluje z przepuszczalnością znacznie lepiej niż ta sama wielkość obliczona dla $T_{2G} = 33$ ms. W niektórych przypadkach przyjęcie średniej wartości $T_{2G} = 33$ ms może spowodować, że błąd oszacowania zawartości wody wolnej wyniesie nawet 100% (Fig. 10).

W celu oszacowania wpływu składu mineralnego na wartości parametru T_{2G} wykonano badania jakościowego składu mineralnego metodą rentgenowskiej analizy fazowej. Próbki 1–2 (piaskowiec triasowy) to piaskowce kwarcowe o bardzo mało zróżnicowanym składzie mineralnym, poza kwarcem zawierają tylko kaolinit. Piaskowce fliszowe (próbki 3–5) charakteryzują się nieco bardziej urozmaiconym składem mineralnym, zawierają skalenie, niewielkie ilości minerałów ilastych i, miejscami, śladowe ilości węglanów. Piaskowce mioceńskie (próbki 6–8) charakteryzują się dużym zaileniem, zawierają również skalenie i węglany. Skały czerwonego spągowca (próbki 9–14) zawierają niewielkie ilości skaleni i minerałów ilastych, kalcyt oraz hematyt.

Najniższe wartości parametru T_{2G} (Tab. 1, Fig. 8) uzyskano dla piaskowców mioceńskich o wysokim zaileniu oraz dla skał czerwonego spągowca zawierających hematyt. Piaskowce fliszowe i triasowe zawierające niewielkie ilości minerałów ilastych charakteryzują się wyższymi wartościami parametru T_{2G} (Tab. 1, Fig. 8). Zarówno minerały ilaste, jak i minerały żelaziste powodują skrócenie czasu relaksacji poprzecznej (a więc przesunięcie czasu T_{2G} w stronę mniejszych wartości T_2) (Bowers *et al.* 1995, Ciechanowska & Zalewska 2004).

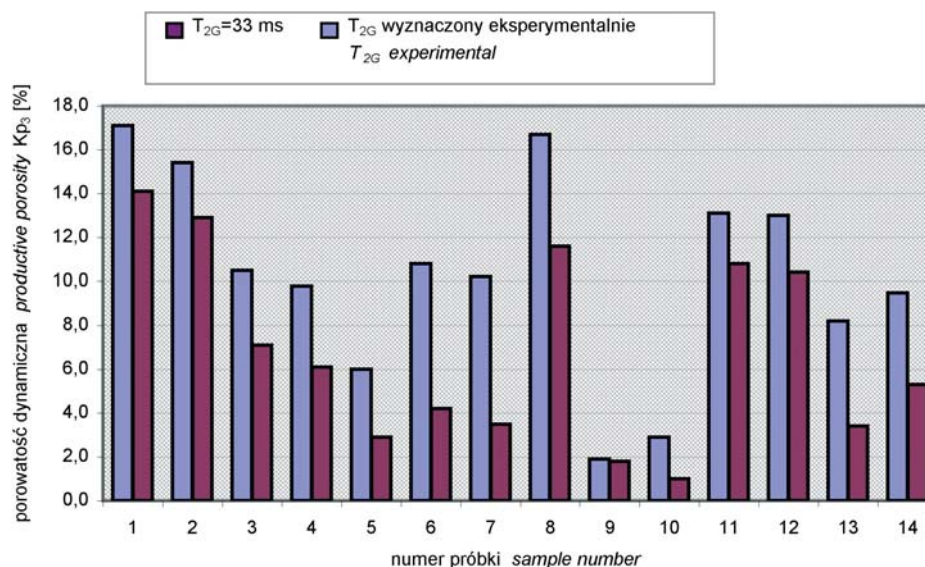


Fig. 10. Porównanie porowatości dynamicznej oszacowanej dla T_{2G} wyznaczonego eksperymentalnie i dla $T_{2G} = 33$ ms

Fig. 10. Comparison of productive porosity obtained for experimental T_{2G} value and for $T_{2G} = 33$ ms

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę zawartości wody nieruchomej w piaskowcach o zróżnicowanej litologii poprzez określenie rzeczywistej wartości czasu granicznego T_{2G} . Poprawnie wyznaczona wartość czasu granicznego T_{2G} jest nieodzowna dla właściwej oceny zawartości wody nieruchomej, a co za tym idzie – i porowatości produktywnej w skałach. W niektórych przypadkach przyjęcie średniej wartości $T_{2G} = 33$ ms może spowodować, że błąd oszacowania zawartości wody wolnej wyniesie nawet 100%.

Dla większości przebadanych próbek uzyskano stan nasycenia resztkowego w ciśnieniu kapilarnym 100 psi, czyli takim, jakiemu odpowiada średnia wartość T_{2G} dla piaskowców (33 ms) podawana w literaturze. Wyjątek stanowią piaskowce triasowe (próbki 1–2), gdzie stan nasycenia resztkowego uzyskano w ciśnieniu kapilarnym 65 psi.

Średnia wartość wyznaczonego eksperymentalnie czasu T_{2G} wynosi 9.14 ms, a więc znacząco odbiega od średniej wartości podawanej w literaturze (33 ms). Wyznaczone eksperymentalnie wartości są z pewnością bardziej zbliżone do wartości rzeczywistych niż literaturowe. Potwierdza to fakt, że porowatość dynamiczna obliczona dla T_{2G} wyznaczonego eksperymentalnie koreluje z przepuszczalnością znacznie lepiej niż ta sama wielkość obliczona dla $T_{2G} = 33$ ms.

Wyznaczone czasy graniczne zmieniają się w zakresie od 3 ms do 15 ms. Najniższe wartości T_{2G} (3–8 ms) uzyskano dla piaskowców mioceńskich z przedgórza Karpat, co można wytłumaczyć wysokim zaileniem. Pozbawione minerałów ilastych piaskowce triasowe charakteryzują się najwyższymi wartościami T_{2G} (13–16 ms).

Dalsze badania nad wyznaczaniem zawartości wody nieredukowalnej w piaskowcach powinny iść w dwóch kierunkach:

- 1) Należy prowadzić prace eksperymentalne umożliwiające powiązanie wartości parametru T_{2G} z litologią i budową przestrzeni porowej badanych skał. Wskazane jest włączenie takich badań, jak: pomiary porozymetryczne umożliwiające określenie rozkładu wielkości porów (porozymetr rtęciowy), obserwacje mikroskopowe (mikroskop optyczny i skaningowy), jakościowa i ilościowa analiza rentgenowska składu mineralnego skał.
- 2) Celowe jest również prowadzenie badań regionalnych nad wyznaczaniem średnich czasów granicznych dla skał poszczególnych basenów sedymentacyjnych.

LITERATURA

- Bowers M.C., Ehrlich R., Howard J.J. & Kenyon W.E., 1995. Determination of porosity types from NMR data and their relationship to porosity types derived from thin section. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 13, 1–14.
- Ciechanowska M. & Zalewska J., 2004. Badanie wpływu zawartości żelaza w składzie chemicznym skały na ocenę parametrów złożowych metodą NMR. *Prace INiG, Wydanie konferencyjne: Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów*, 130, 329–334, Kraków.
- Coates G., Xiao L. & Prammer M., 1999. *NMR Logging Principles & Applications*. Haliburton Energy Services, USA, 1–233.
- Hennel J.W. & Kryst-Widźgowska T., 1995. *Na czym polega tomografia magnetyczno-rezonansowa?* Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego, Kraków, 1–88.
- Jarzyna J., 1998. Otworowe profilowanie jądrowego rezonansu magnetycznego – nowa, efektywna metoda wyznaczania właściwości zbiornikowych skał. *Nafta-Gaz*, 5, 215–222.
- Kenyon B., Kleinberg R., Straley C., Gubelin G. & Morriss C., 1995. Nuclear magnetic Resonance Imaging Technology for the 21st Century. *Oilfield Review*, 7, 3, 19–30.
- Kenyon W.E., 1997. Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging. *The Log Analyst*, 2, 21–43.
- 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 40th Logging Symposium*, May 30–June 3, 1–14.
- Plewa M. & Plewa S., 1992. *Petrofizyka*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1–327.
- Straley C., Morriss C.E., Kenyon W.E. & Howard J.J., 1995. NMR in Partially Saturated Rocks: Laboratory Insights on Free Fluid Index and Comparison with Borehole Logs. *The Log Analyst*, 1, 40–58.
- Straley C., Rossini D., Vinegar H.J., Tutunjan P. & Morriss C.E., 1997. Core Analysis by Low-Field NMR. *The Log Analyst*, 2, 84–94.

- Tiab D. & Donaldson E.C., 1996. *Petrophysics, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1–706.
- Toporkov G.V., Murtsovkin V.A., Zelenov A.S. & Tarasov S.Y., 2002. The Study of Residual Water Saturation Formation in Hydrophylic and Hydrophobic Reservoirs by NMR Method. *SCA*, 44, 1–12.
- Xie H. & Guihéneuf T., 2000. *NMR Logs: Low Field NMR and Rock Core Analysis*. Materiały szkoleniowe firmy ResLab, 1–11.

Summary

Estimation of the irreducible water content (water contained in clays and capillary pores) is indispensable for productive porosity (pore space, from which, at a given pressure the pore fluids can be obtained during production, Kenyon *et al.* 1995) evaluation and characteristics of the reservoir properties of rocks. The best way to obtain this parameter is the nuclear magnetic resonance method (NMR) (Kenyon *et al.* 1995, Kenyon 1997). The division between free and irreducible water is made by measurements of the transverse relaxation time T_2 . The key parameter used in the interpretation of the T_2 distribution curves is the cutoff time T_{2G} (Fig. 1). The average value of T_{2G} for sandstones which can be found in many papers is 33 ms (Kenyon *et al.* 1995, Kenyon 1997, Straley 1997, Coates *et al.* 1999). In many cases this value is correct, but it may also substantially differ from the real T_{2G} values, which can change from 1.5 ms to 75 ms (Xie & Guihéneuf 2000). The variability of the T_{2G} value is connected with the diversity of the pore space structure and mineralogy of rocks (Fig. 2).

In the presented paper the T_{2G} value has been estimated through comparison of the T_2 distribution curves for 100% saturated samples and for samples in state of residual saturation (Figs 3, 4, 7). The residual saturation state has been obtained by the centrifuging experiment conducted for increasing pressures (Figs 5, 6). The T_{2G} parameter has been established for sandstones from different sedimentary basins.

The established T_{2G} value vary from 3 ms to 15 ms (Tab. 1, Fig. 8). The Miocene sandstones from the Carpathian Foredeep are characterized by the lowest values of the T_{2G} parameter (3–8 ms), what can be explained by the high content of the clay minerals. The Triassic sandstones with low content of clay minerals show the highest T_{2G} values (13–16 ms).

The real T_{2G} value is necessary for correct estimation of the irreducible water content and, what follows, productive porosity. The average T_{2G} value (9.14 ms) obtained experimentally differs considerably from the average value presented in the literature (33 ms). The use of average $T_{2G} = 33$ ms value in the interpretation of the NMR measurements may result in big, even 100% errors in the estimation of the producible porosity (Fig. 10). Productive porosity estimated with the use of experimental T_{2G} correlates with permeability better than the porosity calculated for $T_{2G} = 33$ ms (Fig. 9), what shows that the values estimated experimentally are much more similar to the real T_{2G} values than those taken from literature.