

Wykorzystanie zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego w laboratoryjnych badaniach próbek skał

Jadwiga Jarzyna*

Stale relaksacji T1 i T2 charakteryzujące zjawisko jądrowego rezonansu magnetycznego (JRM) są ściśle związane z parametrami zbiornikowymi skał — porowatością, przepuszczalnością oraz nasyceniem przestrzeni porowej ruchomymi i nieruchomymi węglowodorami. Pomiarzy stałych relaksacji wykonane na próbkach skalnych oraz wiarygodne zależności korelacyjne między nimi i parametrami zbiornikowymi są źródłem nowych informacji zwiększających efektywność prac poszukiwawczych i eksploatacyjnych na złożach węglowodorów.

Słowa kluczowe: jądrowy rezonans magnetyczny, JRM, stałe relaksacji, własności zbiornikowe skał

Jadwiga Jarzyna — **NMR laboratory investigations on rock samples.** Prz. Geol., 48: 719–721.

Summary. Longitudinal and transverse relaxation times, characterising nuclear magnetic resonance (NMR) are closely related to reservoir parameters of rocks — porosity, permeability and saturation of pore space with moveable and unmoveable hydrocarbons. Measurements of relaxation times on rock samples and accurate correlation equations relating them to reservoir parameters deliver the new information increasing effectiveness of prospecting and exploiting works on hydrocarbon deposits.

Key words: nuclear magnetic resonance, NMR, relaxation time, reservoir parameters of rocks

Wykorzystanie zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego (JRM) w badaniach geofizycznych pozwala na uzyskanie unikatowych informacji o ośrodku skalnym umożliwiając m.in.:

□ wyznaczenie porowatości ogólnej niezależnie od litologii,

□ rozdzielenie porowatości dynamicznej, obejmującej jedynie medium poruszające się w przestrzeni porowej, od porowatości ogólnej,

□ rozróżnienie wody lub węglowodorów unieruchomionych w porach kapilarnych od wody związanej w minerałach ilastych,

□ wyznaczenie współczynnika przepuszczalności na podstawie określenia stosunku powierzchni do objętości porów.

Wymienione zagadnienia w pełni uzasadniają prowadzenie intensywnych badań nad rozwojem sond do pomia-

*Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

rów otworowych oraz doskonaleniem metod przetwarzania i obróbki sygnału mierzonego podczas polowych i laboratoryjnych badań z wykorzystaniem JRM.

Pomiary otworowe JRM nie są w Polsce obecnie wykonywane, jednak zalety profilowań otworowych wykorzystujących zjawisko JRM wskazują na konieczność bieżącego zapoznawania się z postępem prac na świecie w zakresie rozwoju tej metody z nadzieją na zakup urządzenia w najbliższej przyszłości.

Równoległe z pracami nad otworowymi wariantami profilowań JRM prowadzone są badania laboratoryjne, w których wykorzystuje się podobne techniki pomiarowe oraz podobne metody przetwarzania i interpretacji wyników. Celem niniejszej pracy jest zapoznanie polskiego czytelnika ze światowymi osiągnięciami w zakresie zastosowania zjawiska JRM do badania ośrodka skalnego przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych. Wcześniejsza praca autorki miała na celu prezentację otworowych pomiarów JRM wykonywanych na świecie (Jarzyna, 1998).

Pomiar stałych relaksacji JRM

Wykorzystanie zjawiska JRM w geofizycznych pomiarach otworowych i laboratoryjnych opiera się na zastosowaniu stałego pola magnetycznego, którego obecność powoduje polaryzację jąder wodoru występujących w medium wypełniającym przestrzeń porową ośrodka skalnego oraz w nim samym. Następnie stosowane jest pole magnetyczne, którego zadaniem jest wychylenie z położenia równowagi uporządkowanych (spolaryzowanych) spinów jąder wodoru w formacji skalnej. Powrót spinów do stanu początkowego uporządkowania jest opisany przez dwie stałe relaksacji — podłużną — spinowo-sieciową, T1 i poprzeczną — spinowo-spinową, T2. Stała T1 charakteryzuje powrót do wartości początkowej składowej podłużnej wektora magnetyzacji, natomiast stała T2 charakteryzuje zanik do zera składowej poprzecznej. Obie stałe mogą być przedmiotem pomiaru podczas eksperymentów laboratoryjnych i otworowych, wykorzystujących zjawisko jądrowego rezonansu magnetycznego (JRM).

Równoczesne uzyskanie informacji o T1 i T2 pozwala na rozróżnienie rodzaju medium nasycającego przestrzeń porową. Wielu autorów (Akkurt i in., 1995; Menger i in., 1999) podaje wartości T1 i T2 dla wody (solanki), ropy i gazu, na podstawie których można określić przedziały zmienności powyższych parametrów (tab. 1). Stała relaksacji T2 wyznaczona dla wody znajdującej się w dużym pojemniku (100% porowatości) wynosi 3–5 s. Gdy porowata skała jest nasycona tą samą wodą, stała T2 jest zredukowana do wartości 10–500 ms z powodu wzajemnego oddziaływania między cząsteczkami skały i wodą nasycającą pory (Crory i in., 1997).

Tab. 1. Wartości stałych relaksacji dla mediów złożowych

	T1 [ms]	T2 [ms]
Utwory klastyczne		
Woda (solanka)	1 – 500	0,67 – 200
Ropa	5000	460
Gaz	4400	40
Utwory węglanowe		
Woda (solanka) w jamach	> 1000	>1000

Związki między parametrami petrofizycznymi a stałymi relaksacji

Zawartość wody związanej. Zawartość wody związanej w skale — Swirr — wyraźnie koreluje z różnicą między porowatością efektywną (na podstawie JRM — *Free Fluid Index*) a porowatością ogólną i jest wykładnikiem możliwości produkcyjnych skały zbiornikowej (Coats i in., 1997). Wysoka wartość Swirr może być przyczyną stosunkowo niskiej oporności skał produkujących węglowodory. Baldwin (1994) przeprowadził badania laboratoryjne JRM na próbkach piaskowca i wykazał możliwość określenia objętości wody związanej na podstawie pomiaru stałej relaksacji T1.

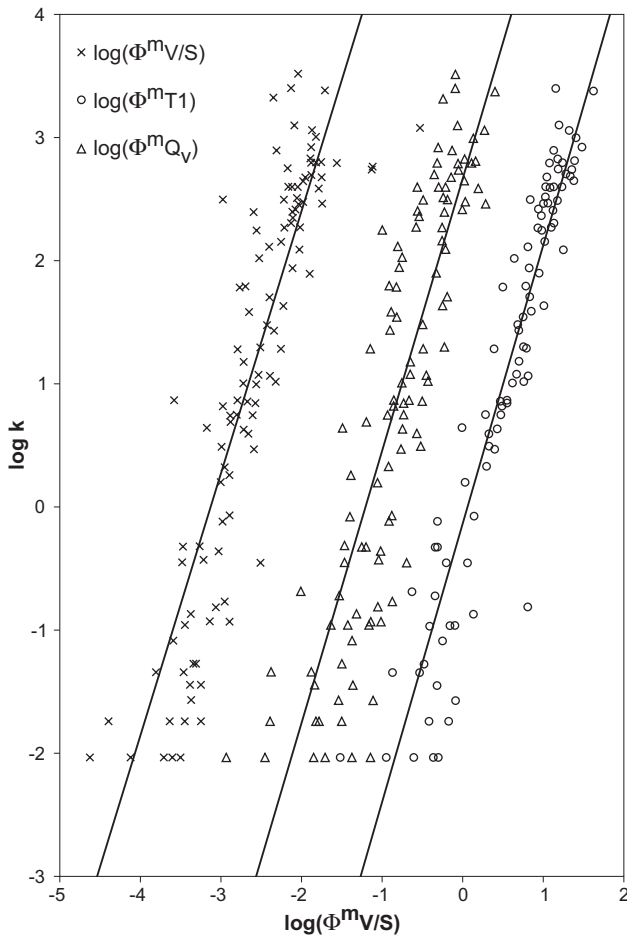
Współczynnik przepuszczalności

Związki między współczynnikiem przepuszczalności a stałymi relaksacji, określane przez wielu autorów zostały włączone do metod empirycznych, pozwalających ocenić zdolność skał do gromadzenia i oddawania mediów porowych na skalę przemysłową. Zależności te obejmują powiązanie przepuszczalności z porowatością — Φ , krętością kanałów porowych, której miarą może być współczynnik m , z powierzchnią — S i objętością — V porów lub stosunkiem tych wielkości — S/V , współczynnikiem wymiany jonowej — Q_v , a także ze zdolnością protonów w medium porowym do relaksacji, której miarą może być stała T1. Zależności przedstawione przez Sena i współpracowników (Sena i in., 1990) pozwalają na określenie przepuszczalności skał dla wody, ropy i gazu na podstawie pomiaru innych parametrów petrofizycznych (ryc. 1).

Przepuszczalność można także określić na podstawie porowatości (całkowitej — Φ_{JRM} oraz dynamicznej — FFI) i wody związanej — BVI, wyznaczonych na podstawie badań z wykorzystaniem JRM: $k = C\Phi_{JRM}^4(FFI/BVI)$ lub $k = C'\Phi_{JRM}^4T2^2$, gdzie C i C' są to stałe proporcjonalności wskazujące na empiryczną drogę uzyskania wymienionych związków (Chang i in., 1994; Akkurt i in., 1995).

Porowatość intergranularna oraz jamistość

Kształt rozkładu T2 oraz występowanie maksimów dla określonych czasów wskazują na obecność porów o różnych średnicach lub wręcz na występowanie porowatości jamistej obok intergranularnej. Wyższe wartości maksimów na rozkładach wskazują na większą porowatość; występowanie maksimum dla czasów krótszych wskazuje na dominację porów o małych średnicach. Przedstawiona interpretacja rozkładu T2 może być uznana za jednoznaczną, gdy medium wypełniające przestrzeń porową jest jednorodne (np. tylko woda lub tylko ropa). W przypadku nasycenia ropą, rozpoznawanego na podstawie dużej wartości T2, obecność dwóch maksimów na dystrybucji T2, w tym jednego dla krótkich czasów, może wskazywać na hydrofilność skały i występowanie wody w postaci błonki pokrywającej powierzchnię porów. Występowanie maksimum na rozkładzie T2 dla wartości czasu ok. 1000 ms sugeruje obecność jam i dużych wymię w skale. Na ryc. 2 występują rozkłady czasu relaksacji T2 dla trzech próbek węglanowych o zróżnicowanej porowatości i przepuszczalności (porowatości i przepuszczalności dla kolejnych próbek są odpowiednio równe: 5,9%, 0,2 mD; 7,1% 1,1 mD; i 12,2%, 7,5 mD). Dla każdej próbki wykonano cztery pomiary — przy pełnym nasyceniu wodą oraz po odwirowaniu w ciągu 1,5 godz, 6 godz oraz po 3-ch dniach



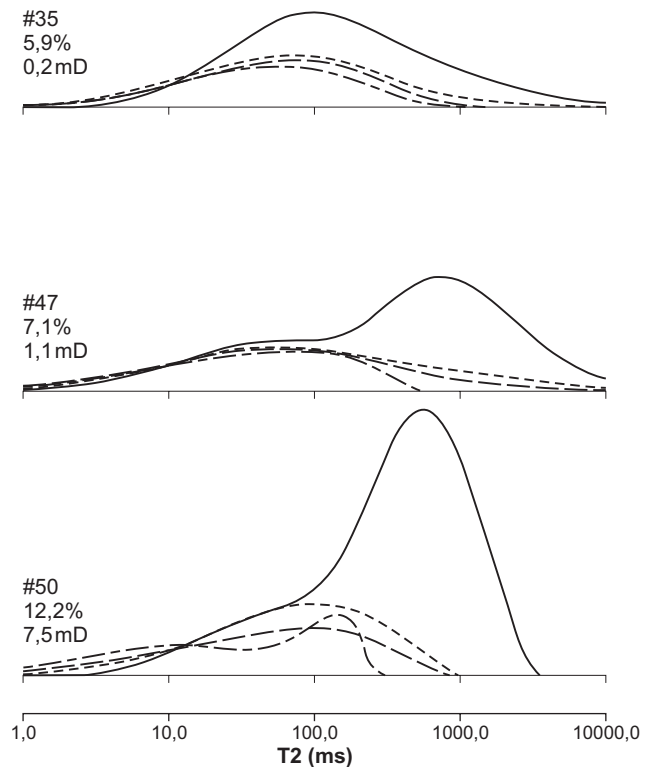
Ryc. 1. Określenie współczynnika przepuszczalności k na podstawie porowatości Φ , stosunku objętości do powierzchni porów V/S , czasu relaksacji $T1$ oraz współczynnika wymiany jonowej Q_v (Sen i in., 1990)

Fig. 1. Composite of $\log k$ versus four predictors porosity Φ : volume to surface ratio, V/S ; relaxation time $T1$ and exchange-cation normality, Q_v (Sen i in., 1990)

odwirowania. Dla pierwszej próbki (#35) występuje jedno maksimum dystrybucji, które utrzymuje się dla tej samej wartości $T2$. Taki obraz wskazuje, że medium utrzymuje się we wszystkich porach w czasie odwirowania. Różnica w wysokości maksimum między krzywą narysowaną linią ciągłą i pozostałymi wskazuje, że w procesie odwirowania próbka utraciła ruchomą część wody. Dwumodalny rozkład $T2$ dla próbki drugiej (#47) wskazuje, że o porowatości tej próbki stanowią pory oraz jamy (lub szczeliny), które opróżniają się w pierwszej kolejności. Wyraźne zróżnicowanie wykresów dla próbki trzeciej (#50) wskazuje, że do jej całkowitego drenażu potrzebny był długi okres odwirowania oraz, że udział porów zawierających wodę przy częściowym nasyceniu też ulegał zmianie.

Podsumowanie

Wyniki uzyskane podczas badań laboratoryjnych z wykorzystaniem zjawiska JRM dostarczają nowych, unikatowych informacji o skałach oraz mediach nasycających ich przestrzeń porową. Oznaczenia laboratoryjne w tym przypadku, podobnie jak i w innych metodach geofizyki wiertniczej są uzupełnieniem danych dostarczanych przez pomiar



Ryc. 2. Rozkład $T2$ dla próbek węglanowych w pełni nasyconych wodą (linia ciągła), po odwirowaniu w czasie 1,5 godz (linia kreskowana krótsza), po 6 godz (linia kreskowana dłuższa), po 3 dniach (linia kreskowana na przemian — dłuższa, krótsza kreska) (Chang i in., 1994)

Fig. 2. $T2$ distributions for carbonate samples water saturated (line), after centrifugation for 1.5 hr (short dash), 6 hr (long dash) and 3 days (short-long dash) (Chang i in., 1994)

otworowy. Omówione relacje między stałymi relaksacji $T1$ i $T2$ i parametrami zbiornikowymi — porowatością i przepuszczalnością wskazują na nowe, niezależne źródło informacji, pozwalających zwiększyć wiarygodność oceny produktywności złoża.

Praca powstała dzięki realizacji działalności statutowej w Zakładzie Geofizyki WGGiOŚ AGH w 1999 r.

Literatura

- AKKURT R., VINEGAR H.J., TUTUNJIAN P.N. & GUILLORY A.J. 1995 — NMR logging of natural gas reservoirs. Proc. 36th SPWLA Symp., paper N.
BALDWIN B.A. 1994 — Immobile water determination in shaly sandstone. The Log Analyst, May-June: 31–37.
CHANG D., VINEGAR H.J., MORRIS CH. & STRALEY Ch. 1994 — Effective porosity, producible fluid and permeability in carbonates. Proceedings of 35th SPWLA Symp., paper A.
COATS G.R., MARSCHALL D., MARDON D. & GALFORD J. 1997 — A new characterization of bulk-volume irreducible using magnetic resonance. Proceedings of 37th SPWLA Symp., paper QQ.
CRARY S., PELLEGRIN F. & SIMON B. 1997 — NMR applications in the Gulf Mexico. Proc. 37th SPWLA Symp., paper PP.
JARZYNA J. 1998 — Otworowe profilowanie jądrowego rezonansu magnetycznego — nowa efektywna, metoda wyznaczania własności zbiornikowych skał. Nafta-Gaz, 5: 215–222.
MENDER S., PRAMMER M.G. & DRACK E.D. 1999 — Calculation of combined $T1$ and $T2$ spectra from NMR logging data. Proc. of 40th SPWLA Symp., paper LLL.
SEN P.N., STRALEY C., KENYON W.E. & WITTINGHAM M.S. 1990 — Surface-to-volume ratio, charge density, nuclear magnetic relaxation, and permeability in clay-bearing sandstones. Geophysics, 55: 61–69.