

WYZNACZANIE PRZEPUSZCZALNOŚCI SKAŁ NA PODSTAWIE POMIARÓW POROZYMETRYCZNYCH I MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO

Permeability of rocks on the basis of mercury porosimetry and NMR measurements

Jadwiga JARZYNA & Edyta PUSKARCZYK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: jarzyna@uci.agh.edu.pl, puskarczyk@geol.agh.edu.pl*

Abstract: Permeability, the most important reservoir parameter can be directly measured only on rock samples. It can be also determined on the basis of various statistical relationships between petrophysical parameters. We tested usefulness of Swanson parameter from the mercury porosimetry and relaxation time T2 from the NMR to find adequate formulas to improve permeability determination. We used the Devonian carbonates and Carboniferous mudstones and the Rotliegend sandstones.

Key words: permeability, mercury porosimetry, nuclear magnetic resonance, NMR

Słowa kluczowe: przepuszczalność, porozymetria rtęciowa, magnetyczny rezonans jądrowy, MRJ

WPROWADZENIE

Przepuszczalność jest najważniejszym parametrem zbiornikowym, bardzo trudnym do dokładnego wyznaczenia. Jest wielkością badaną bezpośrednio na próbkach skał lub pośrednio pozyskiwaną na podstawie zależności między przepuszczalnością i porowatością efektywną lub dynamiczną. O dokładności pośredniego wyznaczenia przepuszczalności, oprócz wymienionych porowatości, decydują także inne współczynniki, np. krętość kanałów porowych, średnica porów, ich kształt, powierzchnia właściwa, współczynnik nasycenia wodą związaną, lepkość mediów w przestrzeni porowej i in. W literaturze petrofizycznej i geofizyki otworowej istnieje dużo prac traktujących o wyznaczaniu przepuszczalności, od fundamentalnych artykułów Kozeny'ego (1927) i Carmana (1937), przez np. prace Timura (1968), Coatesa & Dumanoira (1974), Coatesa *et al.* (1999) i Zawiszy (1993) po ostatnie prezentacje z roku 2008 (Xiao *et al.*). Elementem łączącym te prace jest poszukiwanie adekwatnych wielkości i próba ich sparаметryzowania dla uzyskania najwyższych współczynników korelacji między przepuszczalnością a innymi, łatwiej mierzalnymi wielkościami. W prezentowanej pracy połączo-

no wyniki badań porozymetrycznych z czasami relaksacji poprzecznej mierzonymi podczas eksperymentów z wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego, MRJ. Wykorzystano parametr Swansona (Swanson 1981, Glover *et al.* 2005) zdefiniowany na podstawie wyników badań porozymetrycznych w utworach węglanowych i piaszczowcowo-iłowych.

POROZYMETRIA RTĘCIOWA I BADANIA Z WYKORZYSTANIEM ZJAWISKA MAGNETYCZNEGO REZONANSU JĄDROWEGO

Wyniki badań porozymetrycznych standardowo przedstawiane są w postaci wykresów współczynnika nasycenia rtęcią w skali liniowej na osi poziomej oraz wielkości ciśnienia rtęci, w skali logarytmicznej na osi pionowej. Zestawienie tych danych w skali dwu logarytmicznej daje wykres w postaci hiperboli. Dla punktu przegięcia hiperboli definiowany jest parametr Swansona (Xiao *et al.* 2008), jako stosunek ciśnienia do współczynnika nasycenia. Parametr Swansona dobrze koreluje z wielkością, która charakteryzuje zdolność ruchu mediów w przestrzeni porowej – pierwiastkiem stosunku przepuszczalności i porowatości. Wielkość ta jest związana ze współczynnikiem FZI, Flow Zone Index, który jest wykorzystywany jako efektywne narzędzie podziału skały zbiornikowej na jednostki o podobnych zdolnościach do przepływu (Amafeule *et al.* 1993, Prasad 2000, Bała & Jarzyna 2004, Jarzyna & Ha Quang Man 2009). Parametr Swansona okazał się także istotnym elementem łączącym porozymetrię rtęciową z wynikami pomiarów na próbkach skał z wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego (Xiao *et al.* 2008). Obserwuje się dobrą korelację między nim a medianą lub średnią geometryczną czasów relaksacji T2. Czas relaksacji T2 jest rutynowo mierzony zarówno na próbkach skał, jak i podczas profilowań otworowych z wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego (Coates *et al.* 1999). Zatem, możliwe jest przejście od parametru T2 do przepuszczalności z uwzględnieniem średnicy porów.

Zarówno metoda porozymetryczna, jak i wyznaczanie FZI oraz pomiary stałych relaksacji w badaniach MRJ wykorzystują ruch wody lub węglowodorów w przestrzeni porowej. Każda z tych metod ma u podstawy inny proces fizyczny, jednak wszystkie wyniki dają szansę na wyznaczenie porowatości (efektywnej w przypadku porozymetrii i dynamicznej w przypadku MRJ) i związanej z nią przepuszczalności fizycznej.

DANE WYKORZYSTANE DO ANALIZ

Do badań wykorzystano próbki z rejonu Karpat Zachodnich z otworów Roczyny 3, Lachowice 7 i Jachówka 2k oraz próbki z otworu Cicha Góra 5 na Wyniesieniu Wolsztyńskim. Przedmiotem analiz były karbońskie mułowce i piaszczowce, wapienie dewonu środkowego i górnego oraz dolomity dewonu, a także piaszczowce czerwonego spągowca. Szczegółowy opis próbek dostępny jest w dokumentacjach projektów badawczych (Jarzyna *et al.* 2007, Puskarczyk & Jarzyna 2009).

Komplet próbek przebadano w laboratoriach Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Wyznaczono gęstość mineralogiczną i objętościową, porowatość efektywną i oporność właściwą oraz przepuszczalność fizyczną. Dla wszystkich próbek wykonano pomiary czasu relaksacji

T2 z wykorzystaniem spektrometru Maran Ultra 23 MHz w Katedrze Geofizyki WGGiOŚ AGH oraz Maran Ultra 7 MHz w INiG stosując metodę MRJ. Wykonano także pomiary porozymetryczne aparaturą Autopore 9220.

WYNIKI POMIARÓW I WZAJEMNE POWIĄZANIA PARAMETRÓW

Wyniki badań porozymetrycznych przedstawiono w formie wykresów umożliwiających wyznaczenie parametru Swansona (Fig. 1, 2). Wyraźnie widać zróżnicowanie wykresów, pozwalające odróżnić skały o odmiennej litologii oraz zróżnicowanym wykształceniu przestrzeni porowej.

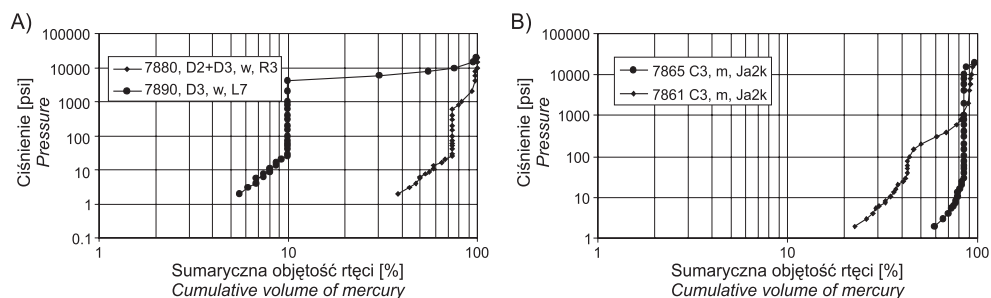


Fig. 1. Nasycenie przestrzeni porowej rtęcią w funkcji ciśnienia dla: A) wapieni dewonu z otworu R3 i L7; B) mułowców i piaskowców karbonu z otworu Ja2k

Fig. 1. Cumulative volume of mercury vs. pressure for: A) the Devonian limestone from R3 and L7 wells; B) the Carboniferous mudstones and sandstones from Ja2k well

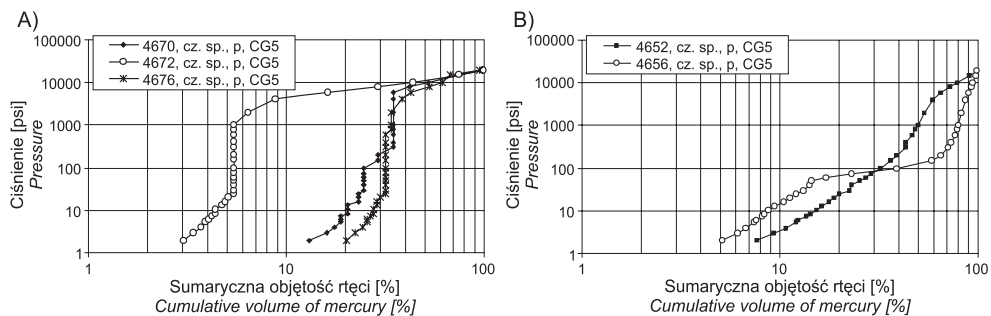


Fig. 2. Nasycenie przestrzeni porowej rtęcią w funkcji ciśnienia dla: A) kompleksu zlepieńcowo-piaskowcowego czerwonego spągowca w otworze CG5; B) kompleksu piaskowcowego czerwonego spągowca w otworze CG5

Fig. 2. Cumulative volume of mercury vs. pressure for: A) the Rotliegend complex of conglomerates and sandstones from CG5 well; B) the Rotliegend complex of sandstones from CG5 well

Próbka nr 7880 jest wapieniem dolomitycznym z licznymi szczelinami i spękaniem. Próbka 7890 jest wapieniem, spękany, z materiałem ilastym. Przy tym samym ciśnieniu jedynie 9.9% przestrzeni porowej jest wypełnione rtęcią w próbce 7880, podczas gdy w próbce 7890 aż 73.5%. Taki wynik wskazuje na znacznie większe możliwości ruchu mediów

(większą przepuszczalność) w próbce 7890. Zbite mułowce i twarde piaskowce o spoiwie krzemionkowym oraz mułowce ilaste i piaskowce laminowane mułowcami w otworze Ja2k wykazują niejednorodność. W zakresie ciśnień do ok. 1000 psi, próbka 7861 wykazuje mniejszą zdolność do wnikania rtęci niż próbka 7865. Dopiero w strefie wyższych ciśnień obie zachowują się podobnie.

Wykresy nasycenia w funkcji ciśnienia w otworze CG5 w skałach klastycznych czerwonego spągowca mają także zróżnicowany charakter. Każda krzywa ma inny przebieg, związany przede wszystkim z wykształceniem przestrzeni porowej oraz zaangażowaniem odpowiednich jej części do ruchu mediów. Uzupełnieniem informacji są wykresy skumulowanych sygnałów MRJ dla kompleksu zlepieńcowo-piaskowcowego i piaskowcowego z otworu CG5 (Fig. 3). Podobne zachowanie się krzywych MRJ (Fig. 3) i wykresów porozymetrycznych (Fig. 1, 2) wskazuje, że te same cechy skały (elementy struktury porowej) wpływają na procesy fizyczne leżące u podstaw obu metod.

Rozkłady czasów relaksacji T2 (Fig. 4) niosą natomiast informację o tym, czy woda złożowa lub węglowodory funkcjonują jako media swobodne (KP3), które można wyeksploatować, czy też są zamknięte w porach kapilarnych (KP2) lub jako woda międzypakietowa w minerałach ilastych (KP1) (Klaja *et al.* 2008). Maksima na wykresach wskazują na części przestrzeni porowej wypełnione określonymi mediami.

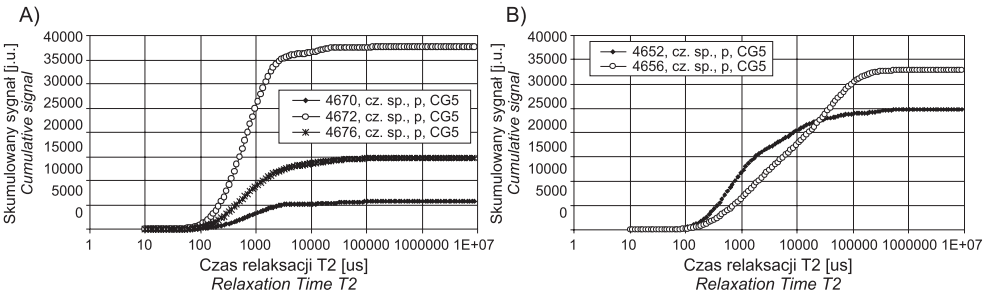


Fig. 3. Skumulowane sygnały NMR w kompleksie: A) zlepieńcowo-piaskowcowym czerwonego spągowca w otworze CG5; B) piaskowcowym czerwonego spągowca w otworze CG5

Fig. 3. Cumulative NMR signals for the Rotliegend complex: a) of conglomerates and sandstones from CG5 well, b) of sandstones from CG5 well

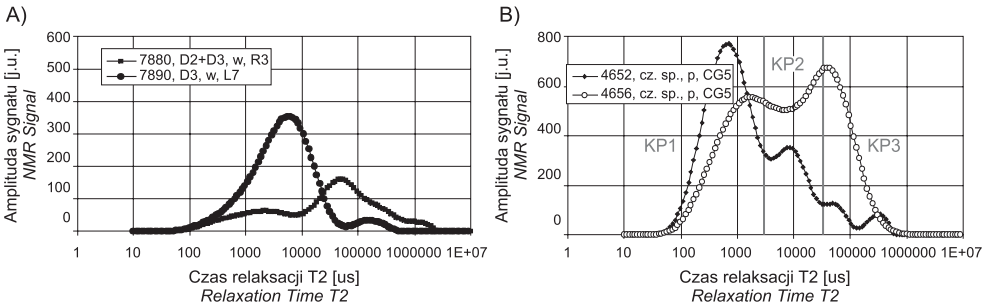


Fig. 4. Rozkład czasów relaksacji T2 w próbkach: A) wapieni dewońskich w otworach R3 i Ja2k; B) kompleksu piaskowcowego czerwonego spągowca w otworze CG5

Fig. 4. Distribution of T2 in: A) the Devonian limestone in R3 and Ja2k wells; B) the Rotliegend complex of sandstone in CG5 well

Maksima na wykresie 4A wskazują, że w próbce 7880 dominuje medium ruchome, występujące w sieci szczelin i spękań obecnych w tej skale. W próbce 7890 dominuje woda związana w przestrzeni porowo-szczelinowej (maksimum w przedziale między 1 a 10 ms). W próbce piaskowcowej 4656 z otworu CG5 dwa maksima mają podobną amplitudę, wskazującą na podobny objętościowy udział medium związanego w kapilarach (maksimum dla czasu powyżej 1 ms) i ruchomego (maksimum dla czasu powyżej 30 ms). Na wykresie ilustrującym zachowanie się mediów w próbce 4652 obserwuje się kilka maksimów, z których pierwsze (około 0.5 ms) odpowiada wodzie zamkniętej w przestrzeniach międzypakietowych iłów (KP1), drugie (ok. 50 ms) – wodzie zamkniętej w kapilarach (KP2), a pozostałe są związane z mediami ruchomymi (KP3).

W celu połączenia informacji uzyskiwanej z porozymetrii i badań magnetycznego rezonansu jądrowego współczynniki Swansona skorelowano z medianą czasów relaksacji T2 (Fig. 5). Wykorzystano podział rozkładów czasów relaksacji T2 na przedziały odpowiadające wielkościom porów oraz stanowi relaksujących jąder wodoru w elementach przestrzeni porowej (Fig. 6). Warto zwrócić uwagę na zmianę charakteru zależności związaną z kształtem rozkładu T2 w części odpowiadającej wodzie nieredukowalnej (KP1), wodzie kapilarnej (KP2) i wodzie wolnej (KP3) (Fig. 4B).

Zdefiniowano parametr charakteryzujący zdolność skały do ruchu mediów w jej przestrzeni porowej jako pierwiastek stosunku przepuszczalności [mD] i porowatości [%] wzorując się na badaniach współczynnika FZI, Flow Zone Index. Skorelowano współczynnik Swansona z tym parametrem i uzyskano metodę skalowania wyników pomiarów MRJ w funkcji przepuszczalności (Fig. 7, 8). Uzyskano wysokie współczynniki determinacji między analizowanymi parametrami petrofizycznymi, wskazujące iż można proponowaną metodę wykorzystać w rutynowej interpretacji danych. Nawet w utworach węglanowych, przy niedużej liczbie analizowanych próbek, współczynniki determinacji można uznać za zadowalające (Fig. 7). Dzięki proponowanej metodyce pomiarowej i interpretacyjnej można ograniczyć drogie i niszczące badania porozymetryczne na rzecz nieinwazyjnych pomiarów MRJ i uzyskać dokładną informację o zbiornikowych parametrach skał klastycznych i węglanowych. Badania innych parametrów petrofizycznych wykonywane standardowo na próbkach skał i dobrze korelujące z parametrami zbiornikowymi uzupełniają wyniki.

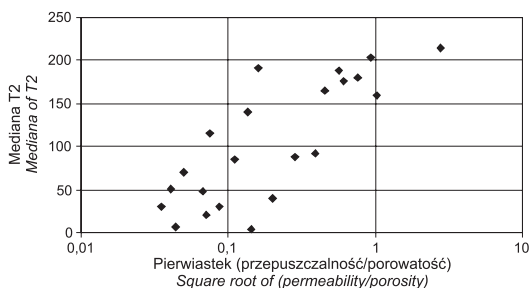


Fig. 5. Zależność mediany T2 obliczonej dla całego sygnału T2 od parametru charakteryzującego zdolność ruchu mediów w przestrzeni porowej, próbki piaskowców czerwonego spagowca

Fig. 5. Relationship between median of T2 for the full NMR signal vs. parameter characterizing ability of media flow in pore space, the Rotliegend sandstone

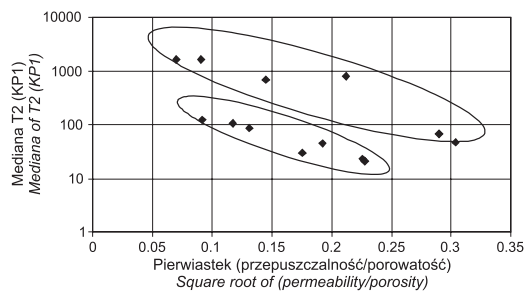


Fig. 6. Zależność mediany T2 w obszarze niskich wartości czasów relaksacji T2 (KP1) od parametru charakteryzującego zdolność ruchu mediów w przestrzeni porowej, próbki karpackie, wapień i mułowce o drobnej sieci spękań – mniejsza elipsa, dolomity – większa elipsa

Fig. 6. Relationship between median of the first part of NMR signal T2(KP1) vs. parameter characterizing ability of media flow in pore space, the Carpathian limestone and mudstone with fine fractures – small ellipse, dolomites – big ellipse

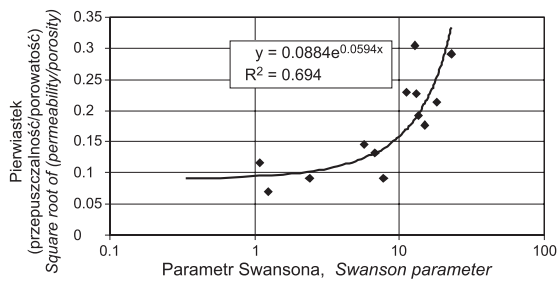


Fig. 7. Zależność parametru Swansona od pierwiastka z przepuszczalności i porowatości, próbki karpackie

Fig. 7. Relationship between Swanson parameter and square root of ratio of permeability and porosity, the Carpathian samples

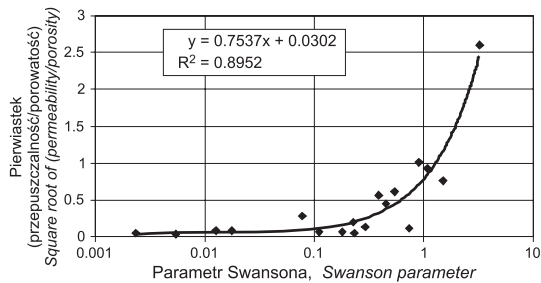


Fig. 8. Zależność parametru Swansona od pierwiastka z przepuszczalności i porowatości, piaskowce czerwonego spagowca

Fig. 8. Relationship between Swanson parameter and square root of ratio of permeability and porosity, the Rotliegend sandstones

PODSUMOWANIE

Poszukiwanie adekwatnych zależności opisujących przepuszczalność, porowatość oraz inne wielkości charakteryzujące geometrię przestrzeni porowej i ruch w niej mediów złożowych jest przedmiotem ciągłych badań od lat 20. XX wieku. Skutek jest widoczny w postaci postępu w poszukiwaniu nowych parametrów, np. parametr Swansona oraz czas relaksacji T2 w badaniach NMR i uzyskiwaniu coraz lepszych relacji (o wyższych współczynnikach korelacji) między mierzonymi wielkościami. O jakości związków zawsze decyduje dokładność wyznaczenia wszystkich wielkości budujących relacje oraz niejednorodność skał. Konieczne są dalsze badania nad wpływem zailenia i wielkości powierzchni właściwej na podział przestrzeni porowej na część obejmującą wodę związaną w minerałach ilastych (nieredukowalną) i wodę w kapilarach. Badania te należy rozszerzyć na przepuszczalność.

Praca powstała w ramach prac statutowych w Katedrze Geofizyki WGGiOŚ AGH w latach 2007 i 2008. Część danych uzyskano dzięki pomiarom MRJ i porozymetrycznym wykonanym w ramach projektu MNiI nr 307 058 32/2823 pt. „Podwyższenie efektywności analizy własności skał przy wykorzystaniu magnetycznego rezonansu jądrowego”, pod kierunkiem Edyty Puskarczyk. Autorki dziękują PGNiG S.A. w Warszawie oraz Instytutowi Nafty i Gazu w Krakowie za udostępnienie danych.

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

LITERATURA

- Amaefule J.O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D.G. & Keelan D.K., 1993. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. *SPE paper*, 26436, 205–220.
- Bała M. & Jarzyna J., 2004. Zależność między porowatością i przepuszczalnością w skałach zbiornikowych z uwzględnieniem współczynnika charakteryzującego przestrzeń porową. *Mat. Konf. Nauk.-Tech. nt. Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów, Geopetrol 2004*, Zakopane, 20–23.09.2004, 4.
- Boyun G., Ghalambor A. & Shengkai D., 2004. A rigorous approach to estimating permeability from capillary pressure curves. *Petroleum Science and Technology*, ISSN 1091–6466, 22, 3–4, 319–335.
- Carman, P.C., 1937. Fluid Flow through Granular Beds. *Trans. AIChE*, 15, 150–166.
- Coates G.R., Xiao L. & Prammer M.G., 1999. *NMR Logging Principles and Applications*. Halliburton Energy Services, Houston.
- Coates G.R. & Dumanoir J.L., 1974. A New Approach to Improved Log-Derived Permeability. *The Log Analyst*, 17.
- Glover P.W.J., Zadjali I.I. & Frew K.A., 2006. Permeability prediction from MICP and NMR data using an electro-kinetic approach. *Geophysics*, DOI: 0.1190/1.2216930, 71, 49.
- Jarzyna J., Bała M., Bojdys G., Grabowska T., Lemberger M., Pietsch K. & Stefaniuk M., 2007. Nowe aspekty interpretacji wyników pomiarów geofizycznych dla weryfikacji możliwości poszukiwania węglowodorów w Karpatach Zachodnich. *Sprawozdanie z projektu badawczego nr 4 T12B 025 28*, MNiJ, 2005–2007.

- Jarzyna J. & Ha Quang M., 2009. Podział skały zbiornikowej na jednostki o jednakowych własnościach hydraulicznych dla udokładnienia wyznaczania przepuszczalności przy modelowaniu przepływów w złożu gazu. *Przegląd Geologiczny*, przyjęte do druku.
- Jarzyna J., Puskarczyk E. & Wójcik A., 2008. Badania własności zbiornikowych skał z wykorzystaniem magnetycznego rezonansu jądrowego. Zadanie w badaniach statutowych Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH w ramach tematu „Doskonalenie metod akwizycji, przetwarzania i interpretacji w geofizyce”, 2006–2008.
- Jarzyna J., Puskarczyk E., Wójcik A. & Semyrka R., 2007. Pomiary MRJ oraz badania porozymetryczne na wybranych próbkach skał z Karpat Zachodnich. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 33, 4/1, 211–236.
- Kłaja J., Kowalska S. & Przelaskowska A., 2008. Korelacja pomiarów magnetycznego rezonansu jądrowego z badaniami porozymetrii rtęciowej dla utworów czerwonego spągowca. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 34, 2, 195–208.
- Kozeny J., 1927. Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsberichte, Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I, V*, 136, 271–306.
- Prasad M., 2000. Velocity-permeability relations with hydraulic units. *Geophysics*, 68, 108–117.
- Puskarczyk E. & Jarzyna J., 2009. *Sprawozdanie z projektu MNiI nr 307 058 32/2823 pt. Podwyższenie efektywności analizy własności skał przy wykorzystaniu magnetycznego rezonansu jądrowego*. Archiwum Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH.
- Swanson B.F., 1981. A simple correlation between permeabilities and mercury capillary pressure. *Journal of Petroleum Technology*, December, 2498–2503.
- Timur A., 1968. An Investigation of Permeability, Porosity, and Residual Water Saturation Relationship for Sandstone Reservoirs. *The Log Analyst*, 9, 4, 8, 30–48.
- Xiao L., Mao Z-Q., Xiao Z-X. & Zhang C., 2008. A new method to evaluate pore structure consecutively using NMR and capillary pressure data. *SPWLA, 49th Annual Logging Symposium*.
- Zawisza L., 1993. Simplified Method of Absolute Permeability Estimation of Porous Beds. *Archives of Mining Sciences*, 38, 343–352.