

Jacek TRAPLE, Kazimierz TWARDOWSKI

Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

MODELE PRZESTRZENI POROWEJ SKAŁ ZBIORNIKOWYCH KARBONU PRODUKTYWNEGO GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

Streszczenie. W pracy przeprowadzono analizę petrofizycznych modeli skał zbiornikowych wykorzystywanych w praktyce przemysłowej dla charakterystyki klastycznych utworów karbonu produktywnego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Na podstawie wyników badań wykonanych porometrem rtęciowym, w szczególności przebiegu krzywych ciśnień kapilarnych, podjęto próbę klasyfikacji skał karbonu produktywnego GZW. Określono wzajemne zależności pomiędzy ilościowymi parametrami opisującymi zbiornikowe właściwości skał.

POROSITY SPACE MODELS OF RESERVOIR ROCKS OF THE PRODUCTIVE CARBONIFEROUS STRATA OF THE UPPER SILESIA COAL BASIN

Summary. The analyze of petrophysician models of reservoir rocks used in industrial practice with the aspect of using them to characterize classical the productive Carboniferous strata of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) was conducted in the paper. On the basis of the outcome of the experiments conducted with Mercury Porosimeter, specially the capillary pressure curves an attempt was made to classify productive carbon sandstone of the USCB. Mutual relationships between quality parameters describing reservoir rock properties were discussed in the paper.

1. Wstęp

Polska należy do krajów europejskich stosunkowo bogatych w surowce mineralne, w tym również w węgiel kamienny. Intensywna eksploatacja złóż węgla kamiennego na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) wymaga prowadzenia w sposób ciągły odwodnienia kopalń, co pociąga za sobą konieczność zagospodarowania słonych wód

kopalnianych. Zrzuty tych wód bezpośrednio do cieków powierzchniowych wywołują wielokierunkowe negatywne skutki w środowisku, a lokowanie zasolonych wód w nieczynnych wyrobiskach kopalnianych może wywoływać problemy zagrożenia wodnego w sąsiadujących czynnych obiektach górniczych.

Innym sposobem pozbywania się wód kopalnianych jest możliwość ich zatłaczania do wodonośnych utworów górotworu karbońskiego poprzez odpowiedni system otworów zrzutowych.

Zarówno jeden, jak i drugi sposób podejścia wymagają odpowiednio wysokiego stopnia rozpoznania budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych górotworu.

Zagadnienie to wiąże się z koniecznością szerokiej analizy właściwości zbiornikowo-filtracyjnych skał, w szczególności przyjęcia adekwatnego modelu ich przestrzeni porowej. Jest to istotne m.in. z punktu widzenia projektowania, modelowania czy też ewentualnego monitoringu procesów dotyczących pozbywania się wód kopalnianych.

2. Rozmiary porów w skałach

Ogólnie wiadomo, że właściwości zbiornikowo-filtracyjne skał determinowane są szeregiem czynników, w szczególności kształtem i rozmiarami porów, stopniem łączności i ich przestrzennym rozmieszczeniem, wzajemną relacją porów o różnych rozmiarach, a więc strukturą przestrzeni porowej. Generalnie ma ona istotny wpływ na wszystkie charakterystyki fizyczne poszczególnych warstw z reguły niejednorodnego i anizotropowego górotworu.

Pory w skałach mogą mieć bardzo różne rozmiary, od kilku nanometrów ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) do kilku, a nawet kilkunastu centymetrów. Skały różnią się statystycznym rozkładem rozmiarów występujących w nich porów, a tym samym i średnim ich rozmiarem. Średni rozmiar porów w skale jest ważnym wskaźnikiem, gdyż określa w dużym stopniu przepuszczalność skały dla płynów, a także wiele innych właściwości skały. W związku z badaniami rozmiarów porów wprowadza się pewne umowne ich klasyfikacje, które w zasadzie opierają się na rodzaju ruchu cieczy lub gazów możliwym w porach o danych rozmiarach.

Najczęściej wykorzystywana w geologii naftowej, petrofizyce i fizyce górotworu klasyfikacja porów wg ich rozmiarów niezależnie od ich kształtu wyróżnia pory: nadkapilarne, kapilarne i subkapilarne [np. 5, 7].

W przypadku stereoporów (porów międzyziarnowych) do nadkapilarnych, nazywanych czasem ponadkapilarnymi lub zwykłymi, zalicza się pory o rozmiarach powyżej 0,1 mm. Rozmiary porów kapilarnych mieszczą się w granicach od 0,0002 do 0,1 mm*. W tych porach ciecz porusza się pod wpływem sił kapilarnych, pokonujących ewentualne siły ciężkości. Na powierzchni rozdziału fazy stałej i ciekłej, tzn. na ściankach porów, na cząsteczki cieczy działają powierzchniowe siły molekularne. Przepływ cieczy w porach kapilarnych możliwy jest tylko wtedy, gdy siła ciężkości lub siła naporu znacznie przewyższa siły powierzchniowe. Subkapilarne pory, nazywane czasem podkapilarnymi, mają rozmiary poniżej 0,0002 mm. W typowych skałach hydrofilowych nie jest możliwy przepływ cieczy, która jest silnie związana siłami molekularnymi ze ściankami porów. W podejściu petrofizycznym ciecz unieruchomiona poprzez oddziaływanie ze ścianką kanału porowego - to warstwa wody silnie związanej fizycznie, która wchodzi w skład tzw. podwójnej warstwy elektrycznej (PWE), warunkującej zjawiska elektrokinetyczne zachodzące w skałach [np. 7]. Istnienie warstwy wody fizycznie związanej na ściankach kanałów porowych znacznie zmniejsza powierzchnię filtracji. Jeżeli promień kanału porowego będzie porównywalny z grubością PWE, należy się spodziewać nakładania PWE obydwu przeciwległych ścianek i przy pewnej wartości krytycznej promienia nastąpi jego „zatkanie się”, co oznacza brak możliwości przepływu przez taki kanał. W skałach mających wyłącznie pory subkapilarne przemieszczanie cząstek cieczy możliwe jest drogą dyfuzji.

W uogólnionej wersji klasyfikacji porów z punktu widzenia ich rozmiarów T. Ryncarz [7] proponuje wydzielenie 5 klas porów, w tym m. in. makro-, mezo- i mikropory. Udział mezoporów w powierzchni właściwej i objętości porów ośrodków porowatych jest na ogół niewielki w porównaniu z udziałem makroporów w objętości i mikroporów w powierzchni.

3. Porometryczna klasyfikacja skał GZW

3.1. Zakres badań laboratoryjnych

Jedną z najbardziej efektywnych metod laboratoryjnego badania struktury przestrzeni porowej skał zbiornikowych jest metoda porometrii ręciovwej [np. 1, 6, 9]. Opiera się ona na

* Według klasyfikacji hydrogeologicznej [8] granica między porami kapilarnymi a nadkapilarnymi wynosi 0,5 mm.

założeniu, że badany ośrodek jest ciałem kapilarno-porowatym, tj. jego potencjał kapilarny jest znacznie większy od potencjału grawitacyjnego [4].

W porometrii rtęciowej bada się wykształcenie przestrzeni porowej włączając do badanej próbki pod zadaniem ciśnieniem ciecz niezwilżającą, jaką jest rtęć (nie zwilża ciał stałych z wyjątkiem miedzi), rejestrując równocześnie jej ciśnienie i objętość. Przestrzeń porowa jest symulowana jako zbiór walcowych kapilar, mających sumarycznie taką samą porowatość jak realna przestrzeń porowa, która jest parametryzowana w oparciu o ten model. Analiza polega na znalezieniu dystrybuanty rozkładu wartości promieni kanałów porowych dla danej próbki (promień kanału traktowany jako zmienna losowa). W wyniku pomiarów otrzymuje się zależność procentową udziału porów o określonych rozmiarach w objętości przestrzeni porowej badanej próbki. Graficznym obrazem wyników prowadzonych badań najczęściej jest krzywa kumulacyjna ciśnień kapilarnych (nasyceń porów rtęcią) w zależności od średnicy porów.

W celu zbadania struktury przestrzeni porowej analizowanych skał GZW przeprowadzono serię analiz laboratoryjnych w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie z wykorzystaniem porometru rtęciowego Auto Pore oraz na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z wykorzystaniem porometru Carlo Erba. W trakcie pomiarów rejestrowano krzywe kumulacyjne ciśnień kapilarnych i na tej podstawie określano następujące parametry charakteryzujące strukturę przestrzeni porowej badanych próbek skalnych: powierzchnię właściwą, średnicę progową kapilary, wartość efektu histerezy kapilarnej rtęci, wartość przeciętnej średnicy kapilary (walcowego kanału porowego) [np. 2,6].

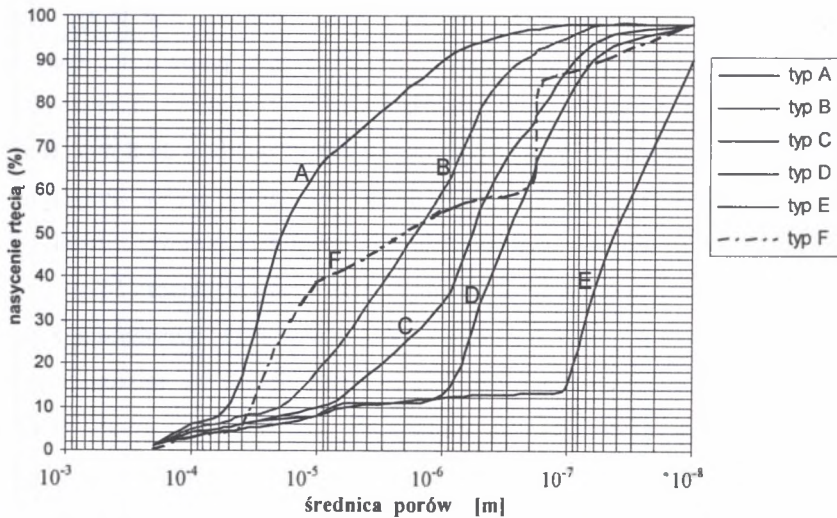
Materiał badawczy obejmował 56 próbek rdzeni pobranych z 13 głębokich otworów parametrycznych z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Próbki reprezentowały w zróżnicowanym stopniu wszystkie serie litostratygraficzne utworów karbonu produktywnego i pochodziły z szerokiego przedziału głębokości od 327,0 do 2020,5 m. Litologicznie reprezentowały klastyczne utwory karbonu produktywnego z dominacją piaskowców i piaskowców ilastych drobno- i średnioziarnistych. Współczynnik porowatości odkrytej badanych próbek zmieniał się od 1,3 do 22,9 % przy średniej wartości 9,1 %. Współczynnik przepuszczalności absolutnej osiągał wartości z przedziału od 0,01 do 370 mD^{*}, przy średniej wartości ok. 7,8 mD. W zbiorze dominowały próbki o niedużej przepuszczalności, poniżej 5 mD.

* 1 mD = 10⁻³ D ≈ 10⁻¹⁵ m², gdzie D (darsy) – tradycyjna jednostka miary przepuszczalności.

Zagadnienia metodyczne związane z wydzieleniem typów skał na podstawie kształtu krzywych kumulacyjnych porometrycznych omawiane były m.in. w pracy [6].

3.2. Wydzielone typy skał GZW

Analiza uzyskanych krzywych kumulacyjnych porometrii rtęciowej umożliwiła wydzielenie sześciu podstawowych typów (modeli) przestrzeni porowej dla badanych utworów. Przebieg typowych krzywych kumulacyjnych porometrycznych odzwierciedlających zmiany struktury przestrzeni porowej odpowiadające poszczególnym typom skał na tle wybranych klasyfikacji porów przedstawiony jest na rys. 1.



Stereopory w skałe:		
<i>pory ponadkapilarne</i>	<i>pory kapilarne</i>	<i>pory subkapilarne</i>
Szczeliny w skałe:		
<i>ponadkapilarne</i>	<i>kapilarne</i>	<i>subkapilarne</i>
Klasyfikacja uogólniona porów		
<i>makropory</i>	<i>mezopory</i>	<i>mikropory</i>

Rys. 1. Typowe krzywe kumulacyjne porometrii rtęciowej dla skał GZW (wraz z wybranymi klasyfikacjami porów - wg [7])

Fig. 1. Typical mercury porometry cumulative curves for the Upper Silesian Coal Basin rock, with selected classifications of pores, after [7]

Wydzielone typy - modele przestrzeni porowej skał scharakteryzować można krótko w następujący sposób:

A. model obejmuje skały o dobrych cechach zbiornikowo-filtracyjnych – dotyczy skał zawierających stereopory (porowatość pierwotna międzyziarnowa). Wartości

- współczynnika porowatości zawierają się w granicach 9 – 20%. Współczynnik przepuszczalności powyżej 40 mD. Średnica progowa kapilar próbek tych skał zawiera się w granicach 30 – 50 μm , obserwuje się również niską wartość efektu histerezy kapilarnej (poniżej 30 %);
- B. model skał o wysokiej porowatości i umiarkowanych właściwościach filtracyjnych. Grupa ta reprezentuje skały o porowatości podobnej jak typ A. Obserwuje się wzrost niejednorodności rozkładu rozmiarów porów. Przesunięcie parametrów strukturalnych przestrzeni porowej w kierunku struktury mikroporowej skutkuje ograniczeniem przepuszczalności do 10-35 mD. Przestrzeń porowa skał tej grupy charakteryzuje się średnią progową kapilary 10-20 μm i wartością efektu histerezy 20-40 %;
- C. model obejmuje skały porowate o niskiej przepuszczalności. Jest to typ dominujący wśród badanych skał przepuszczalnych. Współczynnik porowatości tych skał jest względnie wysoki i zawiera się w przedziale 6-14 %. Współczynnik przepuszczalności przeważnie nie przekracza 1 mD, sporadycznie osiąga wartości do 8 mD. W tej grupie notujemy największe zróżnicowanie rozkładu rozmiarów porów. Przyczyną niskiej przepuszczalności jest mikroporowy charakter przestrzeni porowej. Średnica progowa tych skał zawiera się w granicach 2-10 μm ; efekt histerezy przekracza 50%;
- D. model dotyczy skał porowatych o zerowej lub śladowej przepuszczalności. Są to skały o współczynniku porowatości powyżej 3%, lecz o strukturze tak mikroporowatej, że są bardzo słabo lub całkowicie nieprzepuszczalne. Dla skał z tej grupy, zawierających mikroszczeliny, przepuszczalność może osiągać wartości poniżej 0,1 mD. Średnice progowe kapilar są mniejsze od 1 μm ;
- E. model opisuje nieporowate lub niskoporowate skały o zdecydowanie mikroporowej strukturze przestrzeni porowej. Są to skały o cechach wybitnie uszczelniających. Pojawiająca się sporadycznie dla próbek z tej grupy niezerowa (>0) przepuszczalność jest wynikiem obecności mikroszczelin;
- F. model skał porowo-szczelinowych bądź porowo-mikroszczelinowych, czyli skał o porowatości tzw. dwoistej (dwustopniowej) [np. 1,7]. Grupa tego typu skał generalnie wykazuje dużą zdolność do przepuszczania płynu w zależności od rozbudowanego systemu szczelin. Równocześnie właściwości akumulacyjne skał w tej grupie są dość zróżnicowane, niekiedy niskie.

4. Podsumowanie

W zestawie badanych próbek skał zaobserwowano wszystkie podstawowe typy krzywych kumulacyjnych porometrycznych, dotyczących skał zbiornikowych, co świadczy o dużym zróżnicowaniu właściwości zbiornikowo-filtracyjnych utworów karbonu produktywnego GZW. Zaobserwowano również zmianę typu krzywych kumulacyjnych w profilu tego samego odwiertu, co należy wiązać z dużą niejednorodnością głębokościową badanych skał.

W praktyce, ustalenie typu badanej skały zbiornikowej jest zagadnieniem trudnym. Jednym ze sposobów jego rozwiązania może być zestawienie korelacyjne ocen współczynników przepuszczalności absolutnej: prognozowanej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych oraz określonej laboratoryjnie [3].

Praca wykonana w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.

LITERATURA

1. Donaldson E.C., Tiab D.: Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties. Gulf Publ. Co., Houston 1996.
2. Glazor A., Twardowski K.: Identyfikacja modelu petrofizycznego klastycznych skał zbiornikowych kambru i dewonu południowej części bloku górnośląskiego. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa nr 110, Kraków 2000.
3. Glazor A., Broda P., Twardowski K.: Porównanie efektywności sztucznych sieci neuronowych z analizą regresji w określaniu przepuszczalności skał na podstawie danych petrofizycznych. Mat. XII Międz. Konf. Nauk.-Tech. pn. „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej, gazownictwie”, t.I, Kraków 2001.
4. Kowalski S.J.: Inżynieria materiałów porowatych. Wyd. Politech. Pozn., Poznań 2004.
5. Plewa M., Plewa S.: Petrofizyka. Wyd. Geologiczne, Warszawa 1992.
6. Such P.: Wykorzystanie porometrii rtęciowej w analizie przestrzeni porowej skał zbiornikowych. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa nr 113, Kraków 2002.
7. Ryncarz T.: Zarys fizyki górotworu. Śląskie Wyd. Techn., Katowice 1993.
8. Słownik hydrogeologiczny. Red. Nauk.: Dowgiałło J., Kleczkowski A.S., Macioszczyk T., Rózkowski A. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2002.
9. Witkowski A.: Uwagi o metodyce laboratoryjnego określania porowatości efektywnej, odsączalności i przepuszczalności skał litych. Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 856, Katowice 1988.