

Piotr Such

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Co to właściwie znaczy porowatość skał łupkowych

Przeanalizowano krzywe kumulacyjne rozkładu średnic porów dla skał łupkowych. Analiza kształtu pozwoliła na wydzielenie dwóch charakterystycznych przebiegów tych krzywych, a co za tym idzie – dwóch typów łupkowych skał zbiornikowych. Zbadano porowatość całkowitą i dynamiczną dla obu typów i wyodrębniono parametry charakterystyczne dla każdego z nich.

Słowa kluczowe: porowatość, skały łupkowe, krzywe rozkładu średnic porów.

Porosity: what does it mean in shale gas reservoirs

Cumulative curves of pore size distribution were analyzed for shale rocks formations from the Polish shale basin. Shape analysis allowed for separation of two characteristic types of these curves. In other words two types of shale reservoir rocks were characterized. Total and dynamic porosity were analyzed and parameters of both types of reservoir rocks were defined.

Key words: porosity, shale rocks, pore diameter distribution curves.

Wstęp

Powiększająca się baza danych oznaczeń właściwości zbiornikowych i filtracyjnych skał łupkowych skłania do przeglądu metodycznego stosowanych metod analitycznych oraz weryfikacji ich poprawności, jak również do wprowadzenia ewentualnych poprawek do wykorzystywanych metod badawczo-obliczeniowych. Oczywiście chodzi tu o efekty związane z wielkością porów w skałach łupkowych, a odnoszące się do tak podstawowego parametru jak porowatość. Jest ona

mierzona m.in. metodą piknometrii helowej, w wyniku której otrzymujemy objętość porów penetrowanych przez hel. Jeśli w skale dominują nanopory, mogą one być niepenetrowane przez cząsteczki metanu (które są znacznie większe). Efekt ten rozpatrywano już w literaturze [7, 11]. Niniejsza praca poświęcona została oszacowaniu wielkości możliwych poprawek do pomierzonej porowatości dla typowych parametrów przestrzeni porowej polskich skał łupkowych.

Teoria

Teoretycznie porowatość jest najprostszym do interpretacji parametrem petrofizycznym. Wskazuje po prostu objętość, jaką w skale zbiornikowej zajmują pory, to jest, domyślnie, ile mediów porowych, w tym węglowodorów, może pomieścić dana skała. Kwestia ta jest bardziej skomplikowana w przypadku skał łupkowych. W badaniach ważne stają się również metody badawcze.

Jeśli porowatość mierzy się z wykorzystaniem porometrii helowej i rtęciowej, pomiar wygląda następująco [2, 8]:

- Należy zmierzyć gęstość objętościową $G(z)$ metodami porometrii rtęciowej lub aparatami proszkowymi typu Geopyc. Otrzymuje się zewnętrzną objętość próbki $V(z) = m/G(z)$ [3, 9].
- Należy zmierzyć gęstość materiałową próbki metodą porometrii helowej – w zależności od tego, czy wyznaczamy ten parametr na próbce sproszkowanej $G(1)$, czy nie $G(2)$. Otrzymuje się wartość gęstości ziarnowej lub wartość gęstości materiałowej (w której zawarte są wszyst-

kie pory zamknięte). Odpowiednio są to: $V(1) = M/G(1)$ i $V(2) = M/G(2)$ [3, 9].

- Należy wyliczyć całkowitą porowatość ze wzoru $P_c = \{V(z) - V(1)\}/V(z)$ oraz całkowitą porowatość otwartą, równą $P_o = \{V(z) - V(2)\}/V(z)$.

Następnie można do rozważań wprowadzić dodatkowy parametr – porowatość dynamiczną. To miara objętości rtęci, która pod wpływem przyłożonego ciśnienia zostaje wciśnięta do przestrzeni porowej. Wielkość ta jest funkcją przyłożonego ciśnienia. Niezależnie od rozwiązań technicznych badania porozymetryczne bazują na walcowym modelu przestrzeni porowej, w którym jest ona symulowana jako pęk walcowatych kapilar przewodzących płyny złożowe, przy czym porowatość efektywna realnej przestrzeni i przestrzeni parametryzowanej pozostaje taka sama. Rozkład ekwiwalentnych średnic porów i ich procentowy udział w badanej przestrzeni porowej otrzymuje się z równania Washburna [9]:

$$d = \frac{\tau \cdot \cos(\phi)}{4 \cdot P}$$

gdzie:

d – średnica porów,

P – przyłożone ciśnienie,

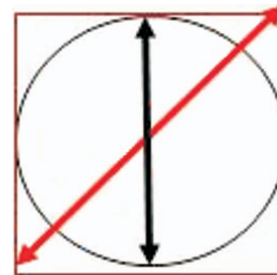
ϕ – kąt kontaktu skała–płyn złożowy,

τ – napięcie powierzchniowe.

Mając zatem daną wartość przyłożonego ciśnienia, można określić średnice najmniejszych gardzieli porów nasyconych rtęcią.

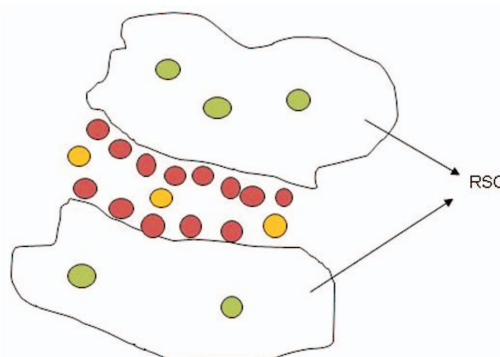
Pomiary porozymetryczne wykonywane dla skrajnie wysokich ciśnień, do 60 000 psi, pozwalają na osiągnięcie granicy 3 nm gardzieli porów. To wielkość, dla której przekroczona zostaje granica przepływów w przestrzeni porowej [5, 6] (rysunek 1). Średnica cząsteczki metanu jest równa 3,5 nm. Biorąc pod uwagę kształty przekrojów gardzieli porów, można stwierdzić, że przepływy będą związane z wielkościami gardzieli porów rzędu 4÷5 nm.

Co poniżej tej wielkości? Cząsteczki metanu uwięzione są w masie rezydualnej substancji organicznej, która tworzy



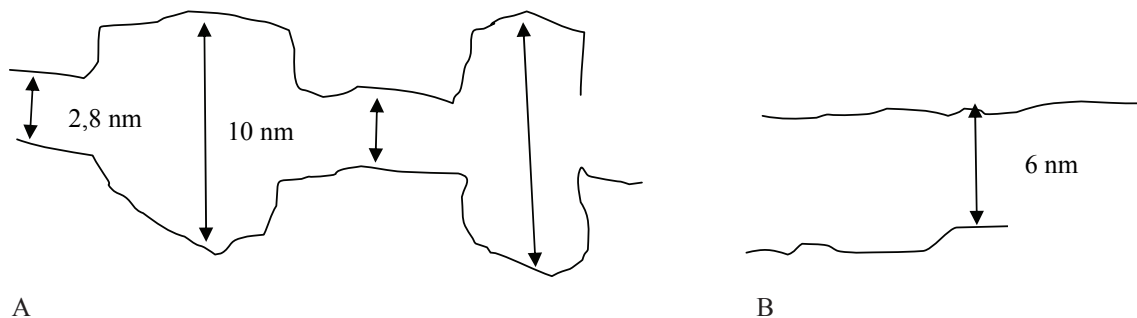
Rys. 1. Schemat dolnego ograniczenia przepływów metanu w przestrzeni porowej (strzałka czarna – średnica cząsteczki metanu, strzałka czerwona – odpowiadająca jej wielkość gardzieli porowej)

własną przestrzeń porową. Schemat rozmieszczenia cząstek metanu zamieszczono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie cząsteczek metanu w nanoprzestrzeni porowej, tworzonej przez rezydualną substancję organiczną (kolor żółty – cząsteczki swobodne, kolor bordowy – cząsteczki zaabsorbowane na powierzchni porów, kolor zielony – cząsteczki znajdujące się w masie rezydualnej substancji organicznej)

Jak w tym kontekście należałoby interpretować pomiar porozymetryczny? Proces wciskania rtęci do próbki znamionuje, że rtęć w przestrzeni porowej musi utworzyć ciągle ścieżki przepływu. Oznacza to mierzenie nie tyle rozkładu komór porowych, lecz kanałów łączących poszczególne pory, tzn. że w przestrzeni porowej mogą istnieć stosunkowo duże pory niepenetrowane przez rtęć, jeśli tylko kanały łączące je z resztą przestrzeni porowej są odpowiednio wąskie (rysunek 3).



Rys. 3. Skuteczność nasycania rtęcią przestrzeni porowej: A – pory o średnicy 10 nm pozostają nienasycone ze względu na zbyt wąskie kanały łączące, B – cylindryczny por o średnicy 6 nm jest w całości nasycony

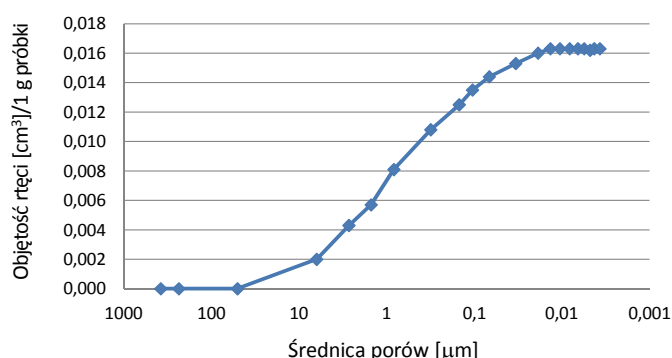
Typowe wykształcenia parametrów przestrzeni porowej dla skał łupkowych zalegających w Polsce

W pracy przeanalizowano typowe wykształcenia parametrów przestrzeni porowej dla sylurskich skał łupkowych [10]. Zasadniczo dla potrzeb analizy porowatości efektywnej można ten podział ograniczyć do dwóch typów:

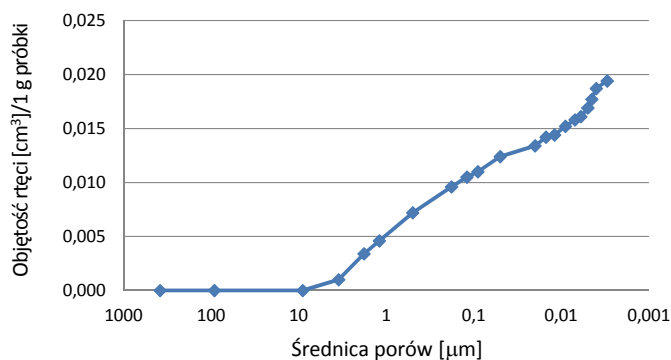
- 1) Prezentowany na rysunku 4 typ krzywej charakteryzuje się praktycznym brakiem porów w zakresie poniżej 10 nm. Tym niemniej na podstawie badań porowatości otwartej metodami porometrii helowej można obliczyć, ile nanoporów mniejszych niż 5 nm znajduje się w przestrzeni porowej.
- 2) Na rysunku 5 zaprezentowano drugi typowy przebieg krzywej kumulacyjnej rozkładu średnic porów. W odróżnieniu od poprzedniego charakteryzuje się on rozbudowaną nanoporową częścią krzywej kumulacyjnej rozkładu średnic porów (pory o średnicach poniżej 10 nm).

Trzecie typowe wykształcenie (z uskokiem na krzywej, będącym odbiciem istnienia szczeliny) jest dla niniejszych rozważań nieistotne.

Przygotowano bazę danych obejmującą po dwadzieścia osiem losowo wybranych próbek łupków reprezentujących oba typy wykształcenia przestrzeni porowej.



Rys. 4. Pierwszy typ krzywej kumulacyjnej



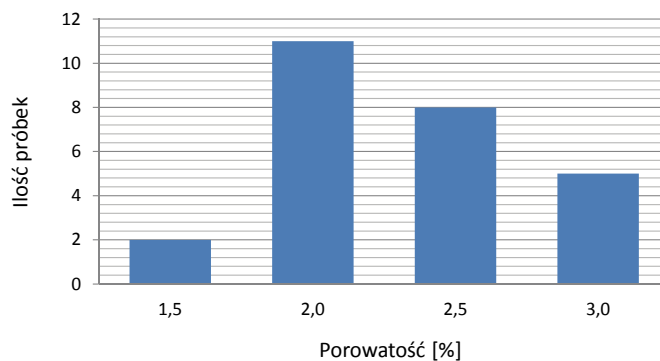
Rys. 5. Drugi typ krzywej kumulacyjnej

Typ I – w bazie danych zestawiono wyniki badań całkowitej porowatości otwartej oraz porowatości tworzonej przez pory o średnicach większych od 10 nm – praktycznie

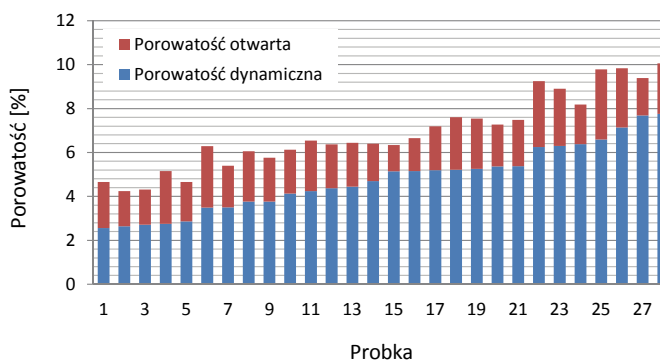
w zakresie 3÷10 nm nie znaleziono znaczących ilości porów. W sumie porowatość tworzona przez pory o średnicach większych niż 10 nm jest równa tworzonej przez pory większe od 3 nm.

Wartości porowatości całkowitej (otwartej) dla tej grupy zawierają się w granicach 2,56÷7,76%, przy wartości średniej tego parametru równej 4,8%. Porowatość dynamiczna (złożona z porów większych niż 10 nm) jest znacznie niższa. Wartość średnia tego parametru wynosi 2,11%. Na rysunku 6 zamieszczono diagram częstości tego parametru. Pokazuje on, że większość skał tego typu charakteryzuje się porowatością dynamiczną rzędu 1,5÷2,5%. Rysunek 7 prezentuje wykresy obrazujące przebieg zmienności obu porowatości dla badanych próbek (zgodnie z rosnącą wartością całkowitej porowatości otwartej). Widać wyraźnie, że niezależnie od wartości porowatości otwartej porowatość dynamiczna jest bardzo ujednoczona. Oznacza to, że:

- wraz ze wzrostem porowatości otwartej rośnie procentowa zawartość porów o średnicach mniejszych niż 3 nm;
- pory mniejsze od 3 nm dominują objętościowo w przestrzeni porowej, co znamionuje dominację przepływu dyfuzyjnego.



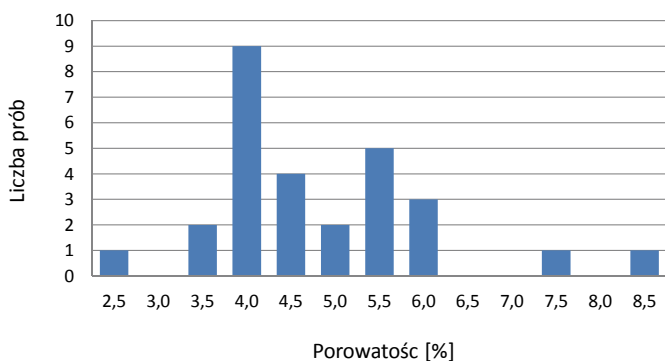
Rys. 6. Diagram częstości dla porowatości dynamicznej (krzywe I typu)



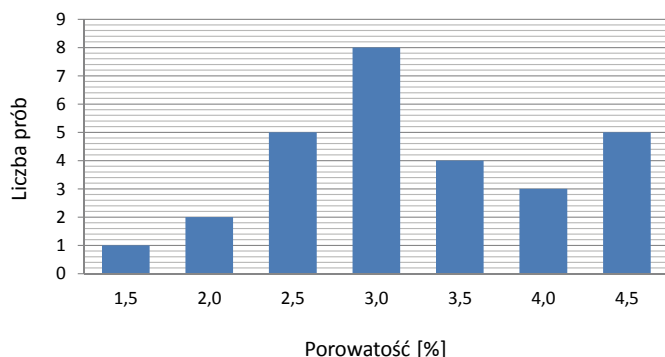
Rys. 7. Przebiegi zestawionych porowatości dla próbek I typu: Porowatość otwarta – kolor czerwony, Porowatości dynamiczna – kolor niebieski

Na rysunku 5 zamieszczono drugi typowy przebieg krzywej kumulacyjnej rozkładu średnic porów. Dla tego typu skał istnieje ciągle rozkład średnic porów w całym zakresie pomiarowym.

Analiza przebiegu takich krzywych pokazuje ogromny rozrzut parametrów przestrzeni porowej przy zasadniczo wyższych parametrach zbiornikowych. Średnia wartość porowatości otwartej wynosi 6,07%, a porowatości dynamicznej: 4,6%. Ta druga przeszło dwukrotnie przewyższa średnią porowatość dynamiczną dla grupy I, przy czym rozrzut jest bardzo duży.



Rys. 8. Diagram częstości dla porowatości dynamicznej II typu skał

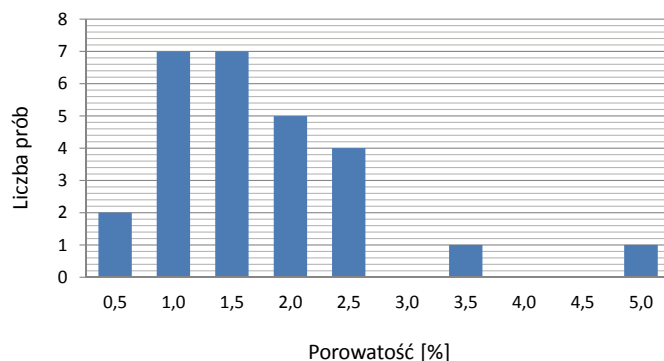


Rys. 9. Diagram częstości porowatości tworzonej przez pory o średnicach większych od 10 nm

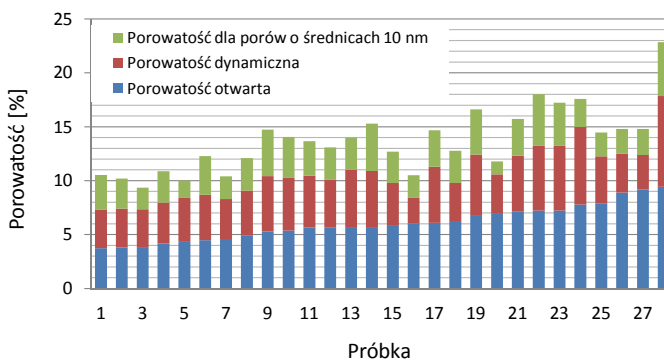
Badając cechy charakterystyczne porowatości dynamicznej, rozbito ją na dwie części [1, 5]:

- tworzoną przez pory o średnicach większych od 10 nm;
- tworzoną przez pory o średnicach mniejszych od 10 nm.

Ich diagramy częstości zamieszczono odpowiednio na rysunkach 9 i 10. Wartość średnia porowatości dynamicznej tworzonej przez pory większe od 10 nm wynosi 3,08%, a w przypadku porów mniejszych od 10 nm jest to 1,51%.



Rys. 10. Diagram częstości porowatości tworzonej przez pory o średnicach mniejszych od 10 nm



Rys. 11. Rozkład porowatości dla próbek z zestawionej bazy danych: porowatość otwarta – kolor niebieski, porowatość dynamiczna – kolor czerwony, porowatość zbudowana z porów o średnicach większych od 10 nm – kolor zielony

Wnioski

Badanie kształtów krzywych kumulacyjnych rozkładu średnic porów dla skał łupkowych pozwoliło wydzielić dwa główne typy krzywych, które zdecydowanie dominują w przypadku wybranych skał. Analizy porowatości otwartej,

dynamicznej oraz przebiegu zmienności pozwoliły na wyodrębnienie podstawowych parametrów charakterystycznych dla obu grup skał. Najistotniejsze statystyki dotyczące tego zagadnienia zamieszczono w tabelicy 1.

Tablica 1. Parametry wydzielonych typów skał zbiornikowych

| Typ | Porowatość całkowita (otwarta) (min.–max./śr.) [%] | Porowatość dynamiczna (min.–max./śr.) [%] | Mediana rozkładu średnic porów [µm] |
|-----|--|---|-------------------------------------|
| I | 2,56÷7,76 / 4,8 | 1,2÷3,2 / 2,11 | 0,8÷1,2/ 1 |
| II | 3,73÷9,44 / 6,07 | 2,4÷8,4 / 4,6 | 0,08÷0,12/ 0,1 |

W przestrzeni porowej w przypadku próbek typu I dominują nanopory o średnicach mniejszych niż 3 μm . Pozostała część porowatości zbudowana jest z relatywnie dużych porów.

Próbki typu II charakteryzują się ciągłym rozkładem średnic porów, w rezultacie mediana rozkładu średnic jest o rząd wielkości mniejsza od mediany dla I typu.

Analiza krzywych kumulacyjnych wskazuje, że wartość całkowitej porowatości otwartej ma znaczenie jedynie dla modelowych obliczeń absorpcji i zawartości gazu w skale. Na-

tomiast w przypadku obliczeń związanych z eksploatacją gazu, z uwagi na rozmiary cząstek metanu i zawartość nanoporów:

- dla I typu można stosować wartość porowatości dynamicznej;
- dla II typu nawet ta wielkość jest zawyżona (ze względu na przepływy w zakresie średnic porów 5÷10 nm).

Jeśli w danym profilu obecne są oba typy skał, metody eksploatacji należy dobierać pod kątem wielkości produkcji zapewniającej dodatni wynik ekonomiczny.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 7, s. 411–415

Literatura

- [1] Bodi T.: *Gas Flow in the Nano Size Pore Channels of Tight and Non Conventional Gas Storage Formations*. Geosciences and Engineering 2012, vol. 1, no. 1, pp. 49–63.
- [2] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M., Such P.: *Nowe możliwości analityczne i interpretacyjne w badaniach właściwości petrofizycznych skal łupkowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 11, s. 783–787.
- [3] Donaldson E. C., Tiab G.: *Petrophysics*. Houston, Texas, Gulf Publishing Comp., 1996.
- [4] Javadpour F., Fisher D., Unsworth M.: *Nanoscale gas flow in shale gas sediments*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2007, vol. 46, issue 10, pp. 55–61.
- [5] Javadpour F.: *Nanopores and Apparent Permeability of Gas Flow in Mudrocks (Shales and Siltstone)*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2009, vol. 48, issue 8, pp. 16–21.
- [6] Loucks R. G., Reed R. M., Ruppel S. C., Hammes U.: *Spectrum of Pore Types in Siliceous Mudstones in Shale-Gas Systems*. AAPG Hedberg Conf. 5–10 December 2010, Austin, Texas.
- [7] Roy S., Raju R., Chuang H. F., Cruden B. A., Meyyappan M.: *Modeling Gas Flow Through Microchannels and Nanopores*. Journal of Applied Physics 2003, vol. 93, no. 8, pp. 4870–4879.
- [8] Praca pod redakcją M. Ciechanowskiej: *Rzeczpospolita łupkowa – studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych*. Prace Naukowe INiG 2012, nr 183, s. 310.
- [9] Such P., Lesniak G., Budak P.: *Kompleksowa metodyka badania właściwości petrofizycznych skal*. Prace Naukowe INiG 2007, nr 142, s. 69.
- [10] Such P.: *Przestrzeń porowa skal łupkowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 9, s. 558–561.
- [11] Wang R., Zhang N., Liu X., Wu X., Yan J.: *Characterization of Gas Flow Ability and Contribution of Diffusion to Total Mass Flux in the Shale*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 2013, vol. 6, issue 9, pp. 1663–1668.



Prof. nzw. dr hab. Piotr SUCH
Zastępca Dyrektora ds. Poszukiwania Złóż Węglowodorów.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: such@inig.pl