

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Wyznaczanie krętości kanałów porowych metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa (micro-CT) jest nieniszczącym narzędziem analitycznym, które umożliwia trójwymiarową analizę próbek skalnych. W geologii jest ona przede wszystkim wykorzystywana do dostarczania informacji dotyczących rozkładu przestrzennego porowatości. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki krętości geometrycznej kanałów porowych uzyskanych na podstawie danych micro-CT. Parametr ten wyznaczano w trzech kierunkach, ale tylko wtedy, jeżeli w analizowanym kierunku występowały połączone ścieżki przepływu pomiędzy dwoma przeciwległymi bokami badanej podpróbki. Badania wykonano na próbkach skał węglanowych dwóch rejonów poszukiwawczych. Krętość; zarówno najkrótszych, jak i najdłuższych ścieżek przepływu dla mediów złożowych – była większa dla analizowanych próbek z rejonu Lubiatowa, w porównaniu do próbek z rejonu Sowiej Góry.

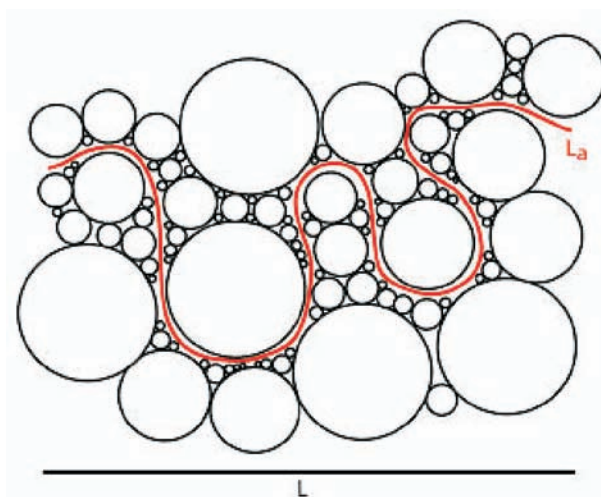
Determination of pore channel tortuosity with computed X-ray microtomography method

Computed X-ray microtomography (micro-CT) is non-destructive analytic tool, which enables three-dimensional analysis of rock samples. In oil geology it's used first of all for delivering information regarding spatial distribution of porosity. This study presents results of pore channel geometrical tortuosity testing, obtained on the grounds of micro-CT. The parameter was determined in three directions, but only then, when connected flow paths were present in analysed direction between two opposite sides of tested sub-sample. The test have been carried out on carbonate rock samples originating from two exploration regions. The tortuosity both for the shortest and the longest flow paths of reservoir media was longer for analysed samples originating from Lubiatow region, as compared to Sowie Gora region samples.

Krętość kanałów porowych (τ) jest ważnym parametrem petrofizycznym, jako że wpływa ona bezpośrednio na przepływ płynów poprzez objętość skały i stanowi kluczowy czynnik w odzyskiwaniu węglowodorów [3]. Krętość jest parametrem bezwymiarowym, z zakresu od 1 – dla linii prostej, do nieskończoności – dla okręgu. Jest ona definiowana jako stopień krzywizny lub skrętu ścieżki płynu poprzez objętość skały. Glemser [4] podaje, że krętość jest wyrażana matematycznie jako stosunek pomiędzy długością ścieżki płynu oraz całkowitej długości pomiędzy jej końcami (rysunek 1).

Metoda mikrotomografii rentgenowskiej pozwala na obliczenie krętości kanałów porowych dla wszystkich połączonych porów istniejących w próbce. Trójwymiarowy charakter micro-CT umożliwia pomiar krętości w trzech kierunkach, prostopadłych względem siebie: X, Y i Z, dostarczając informacji o potencjalnej anizotropii w rozkładzie przestrzeni porowej oraz ścieżkach przepływu płynu w obrębie skał zbiornikowych.

Do przetwarzania i analizy obrazów wytwarzanych przez mikrotomograf rentgenowski służy program MAVI (*Modular Algorithms for Volume Images*), który jest szcze-



Rys. 1. Kręta ścieżka przepływu płynu przez ściśle upakowane kule [4]

gólnie odpowiedni do ilościowej analizy mikrostruktury skał, a dzięki modułowej konstrukcji dobrze sobie radzi także z trójwymiarowymi obrazami najróżniejszych struktur (np. kości).

W programie MAVI, dla każdego kierunku jest mierzony (cyfrowo) stosunek długości najkrótszej drogi pomię-

dzy dwoma pikselami¹, należącymi do pierwszego planu i usytuowanymi na przeciwległych granicach obrazu, do rozmiaru obrazu w danym kierunku (długość mierzona równoległe do odpowiedniej osi współrzędnych) [1]. Krętość ośrodka porowatego jest to stosunek najkrótszej drogi (ścieżki) L , pomiędzy dwoma punktami w danym ośrodku, do ich najkrótszej odległości w danym kierunku; L_e wyrażana jest wzorem $\tau = L/L_e$ [1].

Pomiary krętości wykonano na próbkach skał węglanowych formacji dolomitu głównego, pochodzących z pięciu otworów wiertniczych dwóch rejonów poszukiwawczych: Lubiatowa (L-1, L-2, L-4) i Sowiej Góry (SG-2K, SG-4).

Średnie wartości porowatości ogólnej K_p (wyznaczonej metodą helową, jako wartości odniesienia) w poszczególnych otworach wiertniczych zmieniały się w przedziale od 8,48 do 20,23%. Najwyższymi wartościami współczynnika K_p charakteryzowały się próbki skał z otworu Lubiatów-1 ($K_{p_{sr}} = 20,23\%$), najniższym zaś próbki z otworów: Sowa Góra-1 ($K_{p_{sr}} = 8,48\%$) oraz Lubiatów-4 ($K_{p_{sr}} = 10,25\%$).

Na podstawie analizy rentgenowskiej stwierdzono, że badane próbki cechowały się mało zróżnicowanym składem mineralnym. Podstawowym i dominującym minerałem w otworach wiertniczych był dolomit, którego zawartość w większości próbek wynosiła powyżej 95%. Pozostałe minerały występowały w niewielkich ilościach lub sporadycznie.

W przedstawionym eksperymencie wykorzystano bardzo nowoczesne rentgenowskie urządzenie mikrotomograficzne Benchtop 160CT z wiązką stożkową, w celu uzyskania zbioru danych cyfrowych struktury porowej. Zasada działania mikrotomografu polega na tym, że lampa rentgenowska emituje wiązkę promieniowania X, które „przeświewa” badaną próbkę, tworząc dwuwymiarową projekcję, która jest rejestrowana za pomocą detektora. Promieniowanie docierające do detektora jest w różnym stopniu absorbowane przez badaną próbkę. Im większa gęstość obiektu, bądź któregoś jego fragmentu, tym bardziej wiązka promieniowania jest osłabiona. Ta aparatura badawcza szczegółowo omówiona została we wcześniejszych pracach [2]. Badania przeprowadzono przy tych samych warunkach pomiarowych dla wszystkich próbek: energii promieniowania 110 kV i natężeniu na poziomie 72 μm . Czas skanowania dla jednej próbki wynosił około

4 godziny. Całkowity kąt obrotu próbki to 360°, przy kroku kąta obrotu 0,5°.

Badaniom poddano próbki walcowe o średnicy 1 cm, ponieważ dla takiego rozmiaru próbek możliwe było zastosowanie dwudziestodwukrotnego powiększenia podczas wykonywania pomiaru, co bezpośrednio przełożyło się na otrzymanie dobrej rozdzielczości uzyskanych obrazów (na poziomie 5,8 μm) i co umożliwiło bardzo dobrą wizualizację mikrostruktury.

Mikrotomografia rentgenowska dostarcza wartościowej informacji wizualnej o mikrostrukturach próbek skały, niemniej jednak niekiedy powstają artefakty obrazu, które mogą wpływać na jakość danych. Powszechnym problemem napotykanym przy obrazowaniu gęstych materiałów, włączając w to próbki geologiczne, jest zjawisko znane jako utwardzanie wiązki. Utwardzanie wiązki powstaje wskutek preferencyjnego pochłaniania promieni X o niższej energii względem promieni X o wyższej energii w gęstych materiałach, powodując pogarszanie obrazu. W celu uniknięcia artefaktu twardnienia wiązki (*beam hardening*), pomiędzy źródłem promieniowania przenikliwego a próbką został zamontowany filtr, wykonany z miedzi o grubości 0,4 mm.

Dodatkowe artefakty obrazu, takie jak pierścienie, mogą również pojawić się w danych mikrotomograficznych. Artefakty pierścieniowe (*ring artifact*) są niezależne od typu zastosowanego skanera (choć częściej występują w przypadku stosowania źródeł synchrotronowych) i są typowe przy wysokich strumieniach promieniowania X. Artefakty pierścieniowe są wynikiem nasycenia detektora, powstającego poprzez liczne stymulowania detektora promieniami X w pojedynczym momencie czasu, powodujące „zamrażanie” detektora. Jest to zjawisko powszechnie znane jako efekt czasu martwego detektora. W celu zminimalizowania tego efektu, manipulator podczas pomiaru wykonywał odpowiednie mikroprzesuwki.

Każda próbka była skanowana z umieszczonym na jej górze wzorcem gęstości. Celem tej operacji było sprawdzenie, czy warunki pomiaru były rzeczywiście porównywalne. Z każdego pomiaru uzyskano około 2800 projekcji. Każda z nich powstała z uśrednienia dwóch projekcji wykonanych dla danej pozycji manipulatora, w celu poprawy stosunku sygnału do szumu.

Na podstawie uzyskanych projekcji zrekonstruowano trójwymiarowe obrazy badanych próbek, które następnie zostały zaimportowane do programu AVIZO, w celu przeprowadzenia segmentacji przestrzeni porowej i szkieletu skalnego. Celem segmentacji było przetworzenie danych zawartych w obrazie w taki sposób, aby uzyskać odpowiedni ich podział, który pomoże w rozpoznaniu zawartych

¹ **Piksel** (*ang. pixel*) – wyraz utworzony z dwóch angielskich słów: picture + element. Jest to najmniejszy jednolity element obrazu wyświetlanego w przestrzeni dwuwymiarowej, np. monitora komputerowego, lub uzyskiwanego za pomocą urządzeń przetwarzania obrazu takich jak aparat cyfrowy czy skaner mikrotomograficzny.

w nim obiektów oraz ich interpretacji. Segmentacja posłużyła do uproszczenia opisu obrazu, poprzez zmniejszenie nadmiarowej informacji. W badanym przypadku polegała ona na znalezieniu wartości progowej; oddzielającej woksele² o niskiej wartości pochłaniania i przypisaniu ich do warstwy porów, od wokseli o wysokiej wartości pochłaniania i przypisaniu ich do warstwy szkieletu skalnego. Uzyskano obrazy binarne, składające się tylko z wokseli należących do warstwy „pory” i warstwy „szkielet”. Następnie obrazy te przeskalowano o współczynnik 2 w każdym z trzech kierunków (X, Y, Z) – otrzymując wyjściowe obrazy do wizualizacji i analizy liczbowej, o rozdzielczości 11,6 μm . Obrazy przeskalowano, aby wizualizacja i analiza była możliwa do przeprowadzenia na większej, bardziej reprezentatywnej próbce. Należy mieć jednak na uwadze, że podczas skalowania (w tym przypadku polegającego na uśrednieniu sześciangu o boku 2 piksele, do wyjściowego sześciangu o boku 1 piksel) utracono pewne informacje, takie jak redukcja pojedynczych niepołączonych porów o średnicy 5,8 μm oraz informacje dotyczącą ewentualnych połączeń między porami o średnicy nie większej niż 5,8 μm .

Następnie przeprowadzono trójwymiarową wizualizację przestrzeni porowej. Każda wizualizowana próbka była kostką o wymiarach boku 500 \times 500 \times 175 wokseli – zmierzoną w trzech kierunkach X, Y, Z – tak, jak pokazano to na rysunku 2.

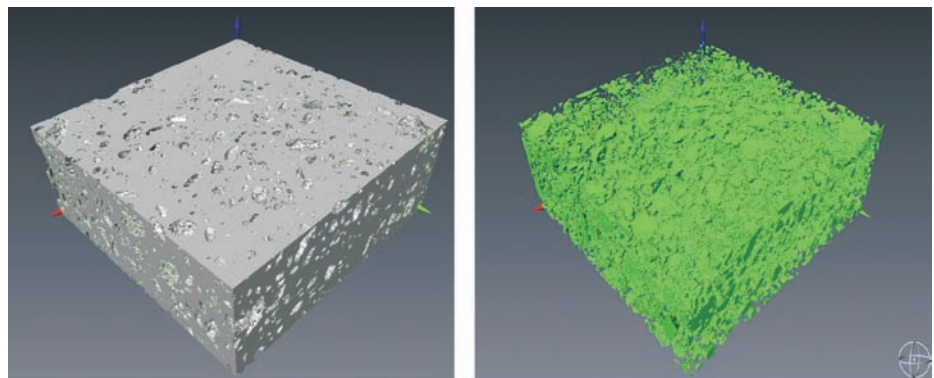
Ponieważ generowanie obrazów micro-CT jest zadaniem bardzo czasochłonnym; znacznie obciążającym pamięć i prędkość komputera, dlatego w celu ograniczenia czasu przetwarzania i analizy otrzymanych wyników każdą próbkę podzielono na dwie podpróbki, oznaczając je symbolem A i B,

w sposób przedstawiony na rysunku 3. Taki sam podział zastosowano do wszystkich badanych próbek.

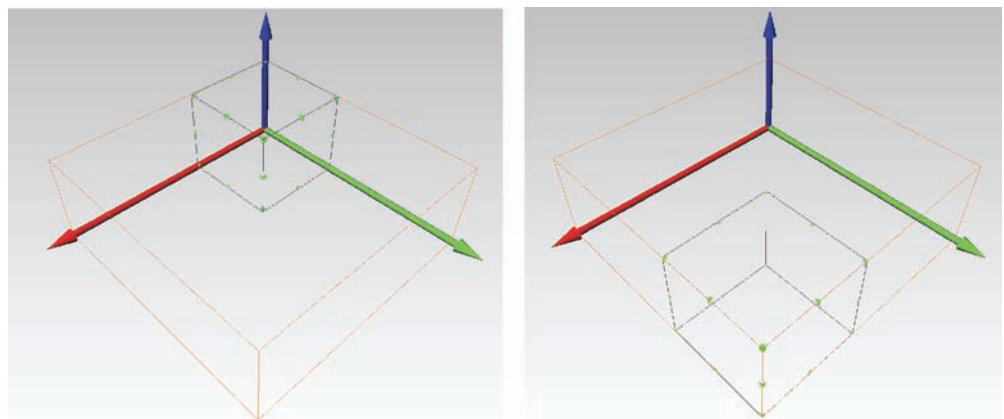
Badaniom poddano 16 prób pochodzących z rdzeni wiertniczych, przy czym krętość wszystkich potencjalnych ścieżek przepływu w trzech kierunkach wyznaczano tylko wtedy, jeżeli w analizowanym kierunku (X, Y, Z) występowały połączenia kanalików porowych pomiędzy dwoma przeciwległymi bokami badanej podpróbki.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy obraz micro-CT wszystkich połączonych ścieżek przepływu płynu w próbce, oznaczając kierunek X od prawej do lewej. Rysunek 4A prezentuje krętość najdłuższych ścieżek przepływu w kierunku X, gdzie średnia wartość wynosiła 1,75, a rysunek 4B ilustruje krętość najkrótszych ścieżek przepływu w kierunku X, przy średniej wartości 1,63.

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki ilościowej charakterystyki parametru krętości geometrycznej kanalików porowych, wyznaczonej metodą micro-CT dla próbek



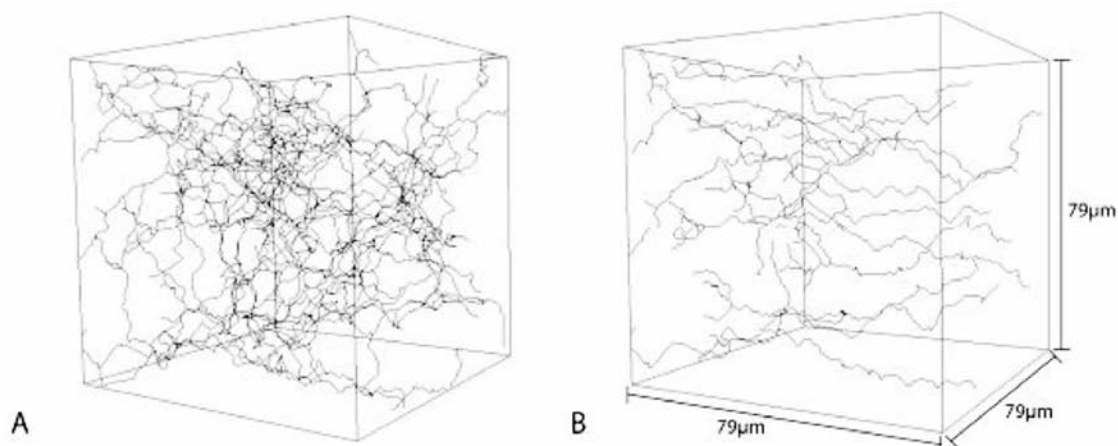
Rys. 2. Przestrzenna wizualizacja pierwotnej struktury skały (cała próbka); po lewej – 3D szkielet skały (bez porów), po prawej – 3D przestrzeń porowa



Rys. 3. Metoda podziału próbki na dwie podpróbki; po lewej podpróbka A, po prawej podpróbka B

² Voxel (*ang. volumetric element*, w j. polskim – woksel) – utworzony analogicznie do słowa piksel. W grafice – najmniejszy element przestrzeni trójwymiarowej, odpowiednik piksela w grafice dwuwymiarowej. Przy użyciu wokseli scenę przedstawia się jako trójwymiarową tablicę, na przykład 512 \times 512 \times 512 wokseli.

skal węglanowych. Parametr ten był analizowany dla wszystkich próbek, natomiast liczony tylko wtedy, gdy w analizowanym kierunku występowały połączenia kanalików porowych pomiędzy dwoma przeciwległymi bokami



Rys. 4. Przykładowy obraz micro-CT wszystkich połączonych ścieżek przepływu płynu w próbce – kierunek X od prawej do lewej

A – krętość najdłuższych ścieżek przepływu w kierunku X (średnia wartość 1,75)
 B – krętość najkrótszych ścieżek przepływu w kierunku X (średnia wartość 1,63)

Tablica 1. Wyniki pomiaru krętości geometrycznej kanalików porowych metodą micro-CT

Próbka	Kierunek analizy krętości	Bezwzględna ilość wokseli z tunelu	Względna ilość wokseli z tunelu	Średnia krętość	Maksymalna krętość	Minimalna krętość	Odchylenie standardowe
1	2	3	4	5	6	7	8
Lubiatów-1							
9111 podpróbka A	X	2720	0,068	2,126	3,459	1,310	0,504
	Y	1100	0,027	2,181	2,451	2,010	0,084
	Z	460	0,011	2,451	2,655	2,115	0,123
9111 podpróbka B	X	5037	0,126	1,882	3,443	1,325	0,372
	Y	4485	0,112	2,027	3,040	1,350	0,555
	Z	3946	0,099	2,399	3,042	1,910	0,303
9112 podpróbka A	X	3921	0,111	2,051	2,781	1,658	0,257
	Y	2999	0,085	1,427	1,609	1,184	0,085
	Z	275	0,007	1,586	1,964	1,429	0,173
9112 podpróbka B	X	4488	0,128	1,806	2,477	1,452	0,243
	Y	2419	0,069	1,604	1,992	1,278	0,204
	Z	2402	0,060	2,237	2,615	1,903	0,135
9116 podpróbka A	X	Brak połączenia kanalików porowych					
	Y	524	0,015	1,352	1,620	1,275	0,071
	Z	Brak					
9119 podpróbka A	X	705	0,016	1,621	1,753	1,313	0,105
	Y	699	0,016	1,457	1,726	1,234	0,125
	Z	3649	0,090	1,558	2,013	1,363	0,198
Lubiatów-2							
9123 podpróbka A	X	1294	0,032	1,980	2,546	1,619	0,243
	Y	108	0,003	1,754	1,806	1,721	0,025
	Z	1847	0,046	1,982	2,807	1,425	0,391
9123 podpróbka B	X	1438	0,036	2,258	2,947	1,554	0,312
	Y	3203	0,080	3,190	4,207	2,121	0,855
	Z	1340	0,033	2,062	2,748	1,392	0,472
9124 podpróbka A	X	2721	0,069	1,864	2,395	1,290	0,315
	Y	2971	0,075	1,958	2,718	1,300	0,411
	Z	3202	0,079	1,610	2,107	1,116	0,181

Próbka	Kierunek analizy krętości	Bezwzględna ilość wokseli z tunelu	Względna ilość wokseli z tunelu	Średnia krętość	Maksymalna krętość	Minimalna krętość	Odchylenie standardowe
1	2	3	4	5	6	7	8
9124 podpróbka B	X	7663	0,195	1,396	1,922	1,180	0,173
	Y	7109	0,181	1,494	1,903	1,162	0,136
	Z	4487	0,112	1,588	2,202	1,344	0,188
9126 podpróbka A	X	655	0,016	1,177	1,265	1,108	0,042
	Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	Brak połączenia kanalików porowych					
Lubiatów-4							
9137 podpróbka A	X	324	0,009	1,674	1,706	1,640	0,016
	Y	774	0,022	1,741	2,267	1,602	0,145
	Z	Brak połączenia kanalików porowych					
9137 podpróbka B	X	Brak połączenia kanalików porowych					
	Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	258	0,006	1,462	1,533	1,331	0,046
Sowia Góra-2K							
9158 podpróbka A	X	5886	0,167	1,215	1,378	1,096	0,064
	Y	6407	0,182	1,167	1,345	1,085	0,040
	Z	8592	0,213	1,227	1,446	1,063	0,066
9158 podpróbka B	X	5526	0,158	1,141	1,348	1,063	0,057
	Y	6328	0,181	1,164	1,413	1,065	0,071
	Z	6631	0,166	1,176	1,486	1,080	0,063
9161 podpróbka A	X	Brak połączenia kanalików porowych					
	Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	1076	0,027	1,507	1,890	1,177	0,0263
9162 podpróbka A	X	2142	0,061	1,521	1,912	1,212	0,169
	Y	2503	0,071	1,256	1,902	1,146	0,117
	Z	4729	0,117	1,272	1,575	1,154	0,086
9168 podpróbka A	X	2204	0,063	1,670	2,149	1,481	0,177
	Y	263	0,007	1,625	1,678	1,239	0,074
	Z	14	0,000	1,746	1,752	1,722	0,007
Sowia Góra-4							
9174 podpróbka A	X	Brak połączenia kanalików porowych					
	Y	Brak połączenia kanalików porowych					
	Z	3307	0,082	1,207	1,533	1,078	0,093
9176 podpróbka A	X	18 327	0,521	1,098	1,338	1,033	0,039
	Y	14 529	0,413	1,086	1,245	1,018	0,031
	Z	18 262	0,452	1,099	1,354	1,017	0,041
9176 podpróbka B	X	9648	0,276	1,187	1,658	1,052	0,113
	Y	10 623	0,304	1,189	1,397	1,050	0,058
	Z	12 481	0,312	1,122	1,385	1,011	0,062
9178 podpróbka A	X	1917	0,054	1,656	1,988	1,396	0,122
	Y	1315	0,037	1,610	1,837	1,469	0,105
	Z	5323	0,132	1,644	2,314	1,392	0,140
9178 podpróbka B	X	3604	0,103	1,201	1,400	1,122	0,056
	Y	4654	0,133	1,293	1,882	1,137	0,127
	Z	3329	0,083	1,354	1,815	1,099	0,196

„Brak połączenia kanalików porowych” – oznacza brak połączenia kanalików porowych pomiędzy dwoma przeciwległymi bokami badanej próbki w określonym kierunku

podpróbki. Kolumna 3 tej tablicy – „bezwzględna ilość wokseli z tunelu” (*ang. absolute occurrence of path pi-*

xels) – oznacza liczbę wszystkich wokseli należących do tunelu, w analizowanym kierunku. Liczba ta uzyskiwana

jest poprzez dodawanie wokseli należących do tunelu na n przekrojach, przy czym każdy należący do tunelu wksel jest liczony tylko jeden raz. Kolumna 4 – „względna ilość wokseli z tunelu” – otrzymywana jest przez podzielenie bezwzględnej ilości wokseli z tunelu (*absolute occurrence of path pixels*) przez pole powierzchni jednego przekroju przecięcia płaszczyzny, przecinającego próbkę. Kolumna 5 to wartość średniej krętości występującej w danym kierunku. Kolumny 6 i 7 to odpowiednio maksymalna i minimalna wartość krętości występującej w danym kierunku. Ostatnia kolumna podaje odchylenie standardowe od wartości średniej krętości geometrycznej.

Dla próbek z rejonu Lubiatowa krętość maksymalna zmierzona dla wszystkich trzech kierunków zmieniała się w zakresie od 1,265 do 4,207, dając wartość średnią równą 2,366, podczas gdy krętość minimalna najkrótszych zmierzonych ścieżek przepływu należała do zakresu od 1,108 do 2,121, z wartością średnią równą 1,469. Średnia wartość krętości w tym rejonie zawierała się w granicach od 1,177 do 3,19 (tablica 1).

Nieco niższe wartości tego parametru zaobserwowano w rejonie Sowiej Góry, gdzie krętość maksymalna,

zmierzona także w trzech kierunkach, zmieniała się w zakresie od 1,245 do 2,314, dając wartość średnią równą 1,632, podczas gdy krętość najkrótszych zmierzonych ścieżek przepływu należała do przedziału od 1,011 do 1,722, z wartością średnią równą 1,171. Średnia wartość krętości w analizowanym rejonie zawierała się w granicach od 1,086 do 1,746.

Należy zauważyć, że w paru próbkach obserwowano krętość kanałów porowych w kierunku X (np. próbka 9126 z głębokości 3275,70 m) i jej brak w kierunku Y i Z. Inna sytuacja ma miejsce np. w przypadku próbki 9731 z głębokości 3226,6 m, gdzie podpróbka A wykazuje krętość w kierunku X i Y, a brak jej w kierunku Z, natomiast podpróbka B nie posiada tego parametru w kierunku X i Y, a wykazuje go w kierunku Z.

Próbki skał węglanowych zostały przeanalizowane przy zastosowaniu rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej i umożliwiły pozyskanie obrazów z rozdzielczością przestrzenną 5,8 μm . Obrazy te, o wysokiej rozdzielczości, pozwoliły na wizualizację szczegółów mikrostrukturalnych, które zostały wykorzystane do ilościowego ujęcia ilości i wielkości krętości geometrycznej kanalików porowych.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Fragment prezentacji pt.: „Analiza 3D wewnętrznej przestrzeni porowej skał na podstawie obrazów mikrotomografii rentgenowskiej” – przedstawionej na Konferencji Naukowo-Technicznej „Ropa i gaz a skały klastyczne Polski”, Czarna 17-20 marca 2009 r.

Literatura

- [1] Armbrecht J., Sych T., Robb K.: *Mavi-Modular Algorithms for Volume Images V 1.9.1*. Handbook, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, 2006.
- [2] Dohnalik M., Zalewska J.: *Zastosowanie mikrotomografii rentgenowskiej do rozwiązywania zagadnień geologicznych i geofizycznych*. Prace INiG Nr 157, 2009.
- [3] Ehrenberg S.N., Eberli G.P., Keramati M., Moallemi S.A.: *Porosity, permeability relationships in interlayered limestone-dolomite reservoirs*. AAPG Bulletin, vol. 90, p. 91-114, 2006.
- [4] Glemser C.T.: *Petrophysical and geochemical characterization of Midale Carbonates from the Weyburn oilfield using synchrotron X-ray computed microtomography*. Thesis. 2007.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.



Mgr inż. Marek DOHNALIK – absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej. Pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Specjalizuje się w badaniach skał metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej.