



W GŁĄB SKAŁY

Najnowsze metody badań, takie jak rentgenowska tomografia komputerowa, są pomocne w poszukiwaniach złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. A zastosowanie nowoczesnych metod obliczeniowych pozwala określić rodzaj złoża oraz jego zasobność.

dr inż. Paulina Krakowska

Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie



**dr inż. Paulina
Krakowska**

Zajmuje się petrofizyką i geofizyką otworową. W kręgu jej zainteresowań jest także geologia naftowa oraz komputerowa mechanika płynów.

krakow@agh.edu.pl

Niekonwencjonalne złoża ropy lub gazu zamkniętego w skałach osadowych (ang. *tight gas*, *tight oil*, *shale gas*, *shale oil*) są obecnie przedmiotem zainteresowania przemysłu naftowego oraz ośrodków naukowo-badawczych pod kątem poszukiwań i następnie wydobycia węglowodorów (ropa naftowa, gaz ziemny) w ilościach ekonomicznie opłacalnych. Złoża węglowodorów typu *tight gas* lub *shale gas* charakteryzują się odmiennymi parametrami zbiornikowymi, czyli porowatością całkowitą i efektywną oraz przepuszczalnością absolutną, w porównaniu ze złożami konwencjonalnymi. Przykładem jest złożo ropy naftowej i gazu ziemnego Barnówko-Mostno-Buszewo.

Porowatość całkowita opisuje udział przestrzeni (pory) wypełnionej wodą złożową i/lub węglowodoraми w skale. Efektywna zaś – tylko tę część przestrzeni porowej, która jest ze sobą połączona (możliwy jest przepływ płynów w skale). Przepuszczalność absolutna to parametr określający zdolność skały do transportu zawartych w niej płynów.

Gaz zamknięty (ang. *tight gas*) jest gazem ziemnym skumulowanym w izolowanych porach skalnych (pustych przestrzeniach między fazą stałą skały). Niskoporowate i niskoprzepuszczalne skały magazynujące gaz zamknięty, np. piaskowce lub wapienie, charakteryzują się słabo rozwiniętą przestrzenią porową (np. pory zamknięte, mało lub brak połączeń pomiędzy porami) o przewadze występowania nanoporów (pory o średnicach rzędu nanometrów). Natomiast gaz łupkowy (ang. *shale gas*) jest gazem ziemnym występującym w skałach łupkowych (ilasto-mułowych).

Złoża tych dwóch typów wymagają większego nakładu prac, przede wszystkim na etapie rozpoznania

DR INŻ. PAULINA KRAKOWSKA

złoża, gdyż to głównie w porach zamkniętych akumulowane są węglowodory. W związku z tym eksploatacja tego typu złóż związana jest także z dodatkowymi zabiegami technicznymi, tzw. szczelinowania hydraulicznego (proces zwiększenia wydajności eksploatacji otworu wiertniczego), aby połączyć pory i umożliwić przepływ płynów złożowych.

Nowoczesne podejście do integracji różnorodnych wyników badań laboratoryjnych na rdzeniach wiertniczych (fragment skały wydobyty z otworu wiertniczego do badań) i szczegółowa charakterystyka przestrzeni porowej, możliwa dzięki nowym technikom badania ciał stałych, pozwala rozszerzyć pojęcie skał zbiornikowych poza stosowane do tej pory kryteria. Uzyskiwane wyniki analiz mogą być przydatne w dalszych badaniach poszukiwawczych i rozpoznawczych złóż.

Tomografia komputerowa

Kluczem w zrozumieniu specyfiki skał zbiornikowych jest szczegółowa analiza wykształcenia przestrzeni porowej, w której gromadzone są węglowodory. Od niedawna rentgenowska tomografia komputerowa, jako metoda nowoczesna i bezinwazyjna, jest włączona do analiz skał.

Rentgenowska tomografia komputerowa jest metodą laboratoryjną, która stanowi unikatowe źródło informacji na temat budowy wewnętrznej różnych materiałów, w przypadku skał – przestrzeni porowej. Rozdzielczość mikrotomografów mieści się w przedziale wielkości molekuł gazu i ropy, natomiast nanotomografia dostarcza kluczowej informacji o nanoporach. Skały niskoporowate i niskoprzepuszczalne charakteryzują się w większości niejednorodną strukturą przestrzeni porowej.

Rentgenowska tomografia komputerowa polega na prześwietlaniu próbki skalnej promieniowaniem rentgenowskim (promieniowaniem X), dzięki czemu możliwe jest uzyskanie trójwymiarowego (3D) obrazu skały, czyli szkieletu mineralnego i przestrzeni porowej. Tomograficzny obraz przestrzeni porowej pozwala wyznaczyć precyzyjnie jej cechy geometryczne. Tomografia rentgenowska dostarcza informacji o porowatości, rozkładzie porów w przestrzeni porowej, ich średnicach oraz kształcie, obecności mikroszczelin, a także informacji o krętości kanałków porowych, istotnych przy ocenie zdolności skały do przepływu mediów złożowych.

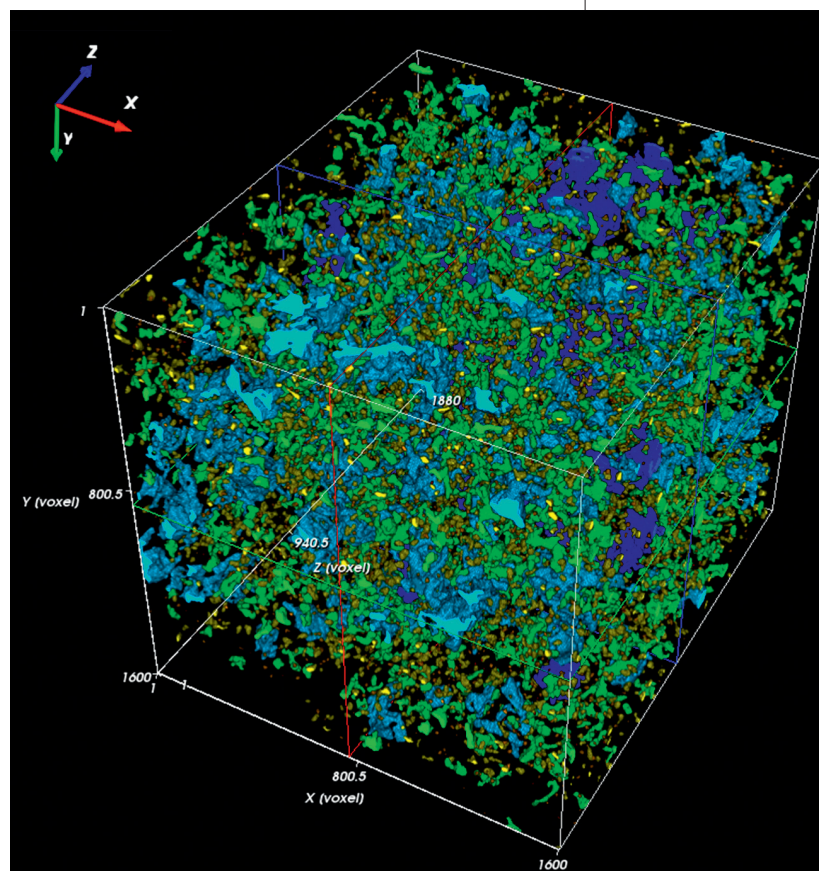
Pomiar komputerowej tomografii rentgenowskiej rozpoczyna się w momencie emisji wiązki promieniowania X przez lampę rentgenowską. Prześwietlana próbka rzuca cień na detektor, tworząc projekcję 2D. Promieniowanie, przechodząc przez próbkę, ulega absorpcji, czyli w zależności od budowy obiektu w różnym stopniu jest osłabiane. Większe osłabienie wiązki wynika z większej gęstości elementu budują-

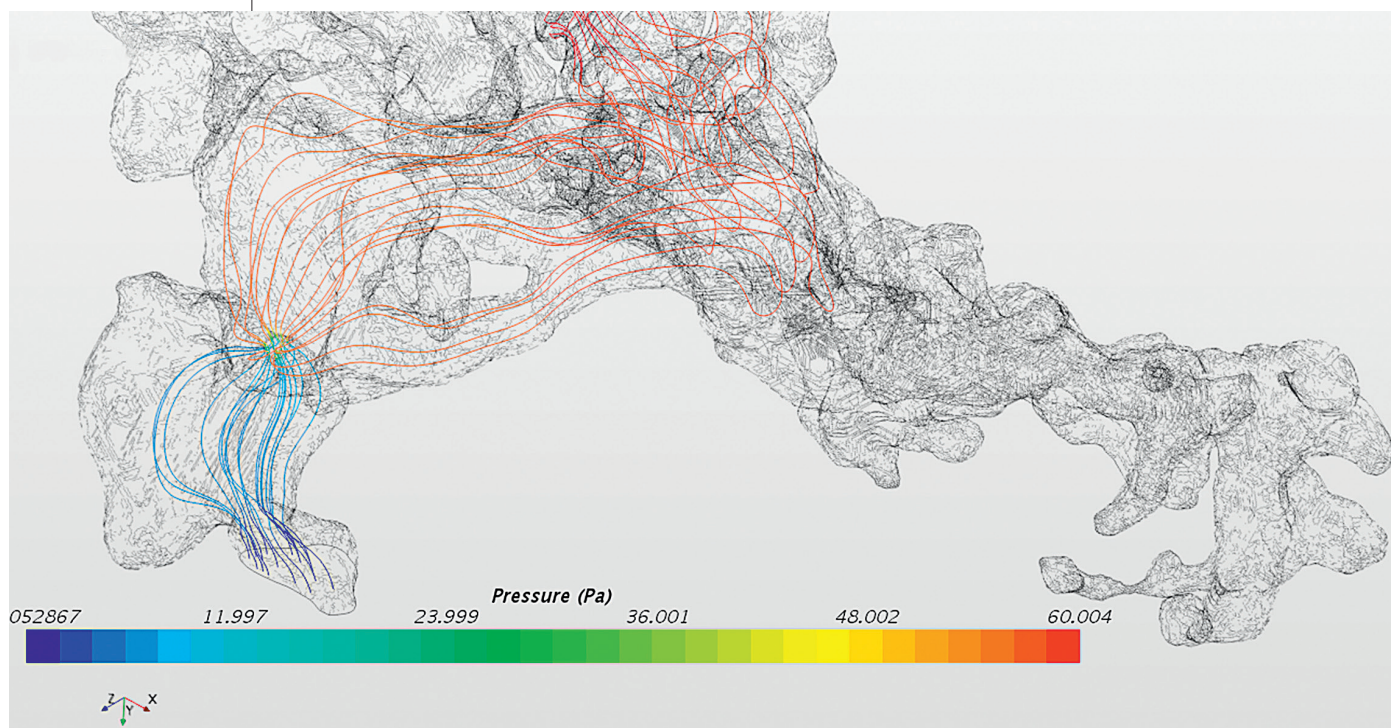
cego obiekt. Zasada pomiaru bazuje na zapisywaniu kolejnych projekcji (rzutu obrazu próbki na płaszczyzną detektora) promieniowania X, różniących się pozycją kątową w zakresie od 0 do 360°. Im mniejszy kąt obrotu próbki, tym większa jest dokładność obrazu, ale także dłuższy czas pomiaru. Aby uzyskać przekroje tomograficzne próbki, czyli cięcia złożonych projekcji, konieczne jest zastosowanie algorytmu, tzw. projekcji wstecznej, który w efekcie pozwala na uzyskanie obrazu zmienności współczynnika pochłaniania liniowego. Algorytm projekcji wstecznej (ang. *back-projection*) stanowi grupę algorytmów rekonstrukcji, czyli procesu matematycznego umożliwiającego pozyskanie przetworzonego obrazu. W miarę jak próbka jest obracana w trakcie pomiaru, zbierane są sekwencyjnie przekroje tworzące zrekonstruowane obrazy 3D. Dzięki komputerowej tomografii rentgenowskiej uzyskuje się pełny obraz przestrzeni porowej badanej próbki skalnej. W zależności od rozdzielczości tomografu zobrazowane są pory o wymiarach mikrometrów (mikrotomografy) lub nanometrów (nanotomografy).

Modelowanie przepływów

Wyniki komputerowej tomografii rentgenowskiej mogą być prezentowane w postaci dwuwymiarowych obrazów lub trójwymiarowej wizualizacji szkieletu mi-

3D obraz przestrzeni porowej piaskowca kambryjskiego, kolory rozróżniają pory pod względem ich objętości.





Fragment przestrzeni porowej z zaznaczonymi ścieżkami przepływu płynu, okno programu Star CCM+.

3D przestrzeni porową uzyskano z wyników rentgenowskiej tomografii komputerowej i zastosowano do symulacji przepływu płynu w celu wyznaczenia właściwości filtracyjnych skały.

neralnego i przestrzeni porowej, samej przestrzeni porowej lub wybranego minerału skałotwórczego.

Analizy tomograficzne okazały się bardzo ważną techniką badania jakościowego i ilościowego przestrzeni porowej skał. Dzięki nim można ocenić porowatość całkowitą skał, złożoność struktury przestrzeni porowej, istotnej m.in. przy projektowaniu procesu szczelinowania, a także wygenerować trójwymiarowy obraz przestrzeni porowej do przeprowadzenia symulacji przepływu płynów przez ośrodek porowaty i obliczenia przepuszczalności absolutnej. Informacja znajdująca się w obrazach tomograficznych jest bardzo istotna przy ilościowym opisie struktury przestrzeni porowej. Dlatego też należy znaleźć sposób, aby z wyników tomografii komputerowej uzyskać liczbowe charakterystyki przestrzeni porowej i ziaren mineralnych (np. średnice, wydłużenie, sferyczność), budujących szkielet skalny. Prawidłowe wyznaczenie wartości porowatości i przepuszczalności utworów skalnych ma ogromne znaczenie, gdyż od tego zależy wielkość szacowanych zasobów eksploatacyjnych węglowodorów.

Przepuszczalność absolutna jest znaczącym parametrem, określającym właściwości filtracyjne skał. Oprócz pomiarów laboratoryjnych na rdzeniach wiertniczych (pomiar bezpośredni) wykorzystuje się komputerowe symulacje przepływu płynu przez ośrodek porowaty i w sposób pośredni wyznacza się przepuszczalność absolutną. W ostatnich latach dokonano intensywnego rozwoju dziedziny komputerowego modelowania przepływów (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD), która stała się ważnym narzędziem

inżynierskim, pozwalającym na szczegółowe analizy przepływu płynu, również w skalnych ośrodkach porowatych. Do wykorzystania symulacyjnego podejścia w wyznaczaniu przepuszczalności absolutnej niezbędne jest dokładne odwzorowanie przestrzeni porowej skały w 3D. Zobrazowanie 2D lub 3D przestrzeni porowej możliwe jest właśnie dzięki komputerowej tomografii rentgenowskiej. Metoda tomografii komputerowej stanowi bazę do utworzenia modelu geometrycznego przestrzeni porowej skały do analizy przepływu płynów. Połączenie wyników tomografii komputerowej i modelowania przepływu płynu przez ośrodek porowaty dostarcza odpowiedzi na pytania dotyczące potencjału filtracyjnego skały. Problem badawczy w przypadku przepływów wielofazowych, z jakimi ma się do czynienia w skałach, np. mieszanina wody złożowej i gazu ziemnego, jest nadal sprawą dyskusji. Rozwinięcie metod symulacji komputerowych do wyznaczania przepuszczalności absolutnej skał w przypadku formacji niskoporowatych i niskoprzepuszczalnych jest ważnym zagadnieniem o szerokiej perspektywie, zarówno w kontekście badawczym, jak i aplikacyjnym.

PAULINA KRAKOWSKA

Projekt był realizowany w ramach programu Lider VI: „Nowatorska metodyka interpretacji niekonwencjonalnych złóż ropy i gazu z wykorzystaniem wyników rentgenowskiej tomografii komputerowej” (umowa LIDER/319/L-6/14/NCBR/2015) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Chcesz wiedzieć więcej?

<https://infolupki.pgi.gov.pl/gaz-lupkowy>

<https://infolupki.pgi.gov.pl/pl/gaz-zamkniety>

Stock S.R. (2008).

MicroComputed Tomography. Methodology and Application. CRS Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York.