

Paweł Wojnarowski*, Jerzy Stopa*

AKTUALNE MOŻLIWOŚCI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI SZCZELINOWANIA HYDRAULICZNEGO W ZŁOŻACH

1. WSTĘP

Zabieg szczelinowania hydraulicznego skały złożowej jest powszechnie stosowany w przemyśle naftowym od lat 40. XX wieku. Początkowo związany był z usuwaniem uszkodzeń strefy przyodwiertowej, a więc jego zasięg był lokalny, ograniczony do skały w bezpośrednim otoczeniu odwiertu. Znaczący rozwój tej technologii wiąże się z eksploatacją złóż niekonwencjonalnych. Wzrost wydobywania ze złóż typu „tight gas” a w późniejszym okresie „shale gas” wiąże się ściśle z rozwojem technologii szczelinowania hydraulicznego, gdyż ekonomicznie opłacalna eksploatacja możliwa jest jedynie po znaczącym podniesieniu przepuszczalności złoża. W tych przypadkach zabieg wieloetapowego szczelinowania hydraulicznego jest podstawowym elementem w procesie udostępnienia złoża.

Rzeczywisty kształt szczeliny jest trudny do przewidzenia ze względu na niejednorodność i anizotropię ośrodka skalnego. Złożoność procesów występujących w trakcie szczelinowania wymaga zastosowania modelowania komputerowego uwzględniającego zarówno właściwości geomechaniczne skał, stan naprężeń panujących w złożu jak i proces szczelinowania, transport podsadzki oraz przepływ gazu w złożu podczas produkcji. Połączenie tych elementów umożliwia określenie spodziewanych efektów procesu co stanowi punkt wyjścia do analizy ekonomicznej.

2. MODELOWANIE ZABIEGU SZCZELINOWANIA HYDRAULICZNEGO I JEGO EFEKTÓW

Do lat 90. XX wieku, zastosowanie w modelowaniu szczelinowania hydraulicznego znajdowały modele dwuwymiarowe (2D). Obecnie coraz częściej stosuje się modele trójwymiarowe (3D) lub pseudo trójwymiarowe (p3D), które jednakże ze względu na swoją

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

złożoność są trudniejsze do zastosowania. Dlatego też modele 2D nadal są wykorzystywane będąc prostą i w wielu przypadkach wystarczająco dokładną aproksymacją rzeczywistej geometrii szczeliny (Economides *et al.*, 2007). Opierają się one na modelowaniu dyskretnym i umożliwiają analizę zabiegu mającego na celu wytworzenie pojedynczej szczeliny o regularnym kształcie (Economides *et al.*, 2000).

W praktyce stosowane są 3 podstawowe modele 2D:

1. Model radialny.
2. Model KGD (Khristianovich-Geertsma-de Klerk).
3. PKN (Perkins-Kern-Nordgen)

Modele 2D różnią się wzajemną zależnością między parametrami szczeliny. W modelu radialnym wysokość szczeliny jest wprost powiązana z jej długością, wysokość szczeliny na ścianie odwiertu równa jest maksymalnemu zasięgowi. W modelu KGD wysokość szczeliny jest stała, szerokość natomiast jest proporcjonalna do długości. Model zakłada również niezmienną szerokość w przekroju szczeliny. Również w modelu PKN zakłada się stałą wysokość szczeliny, lecz jej szerokość zmienia się w funkcji zarówno długości jak i położenia w kierunku pionowym. Stałą wysokość szczeliny zakładaną w modelach, zapewnić może wysoki kontrast w wielkości naprężeń i własnościach mechanicznych w skale złożowej i skałach otaczających. W takich przypadkach modele 2D dają wynik zbliżony do modeli 3D. Sytuacja taka nie występuje jednak w przypadku łupków, gdzie konieczne jest modelowanie 3D lub p3D.

Modele 3D są bardziej realistyczne, uwzględniają własności mechaniczne otaczających skał i niejednorodność skały złożowej. W modelach tych trzy główne wymiary szczeliny: wysokość, szerokość i długość, zmieniają się niezależnie. Pozwala to na modelowanie nieregularnego zespołu szczelin, których kształt warunkowany jest lokalnymi własnościami mechanicznymi i filtracyjnymi ośrodka skalnego. Modele pseudotrójwymiarowe umożliwiają co prawda zdefiniowanie zmienności trzech wymiarów szczeliny oraz uwzględnienie wpływu własności mechanicznych skał otaczających, jednakże powstały w ten sposób model szczeliny ma nadal kształt regularny (peny shape), znacząco idealizujący stan rzeczywisty. Oprócz modelowania samej geometrii szczeliny, modele bardziej zaawansowane umożliwiają wyznaczanie zmiennej przewodności szczeliny, a także koncentracji podszadki.

3. SYMULACJA ZABIEGU SZCZELINOWANIA HYDRAULICZNEGO

Obecnie na rynku funkcjonuje kilka narzędzi służących do modelowania zabiegu szczelinowania. Część firm serwisowych nie oferuje sprzedaży narzędzia służącego do modelowania lecz jedynie usługi projektowania zabiegu zazwyczaj kompleksowo wraz z wykonaniem i analizą wyników zabiegu szczelinowania hydraulicznego (np. FracCADE firmy Schlumberger). Popularnym od lat narzędziem jest program FracProPT produkowany przez firmę Stratagen Engineering będącą częścią koncernu Carbo. Program wykorzystuje mode-

le 2D i p3D, obecnie trwają prace nad wersją FracPro 3D. Brak możliwości modelowania 3D powoduje, że program ten aktualnie znajduje zastosowanie głównie do projektowania i analizy zabiegów w złożach konwencjonalnych.

W związku z coraz większym wykorzystaniem złóż niekonwencjonalnych, na rynku pojawiły się nowe narzędzia uwzględniające specyfikę tych złóż, oferowane przez niewielkie firmy we współpracy ze znaczącymi firmami serwisowymi. Takimi programami są GOHFER firmy Barree & Associates, dystrybuowany przez Core Laboratories oraz Meyer Fracturing (MFrac, MShale) firmy Meyer & Associates, Inc., dystrybuowany przez Baker Hughes Incorporated.

3.1. Symulacja zabiegu szczelinowania za pomocą programu GOHFER

Program GOHFER (*Grid Oriented Hydraulic Fracture Extension Replicator*) jest symulatorem szczelinowania hydraulicznego opartym o trójwymiarowy model geometrii szczeliny (niezależne trzy wymiary szczeliny) propagującej w płaszczyźnie, połączony z modelem transportu cieczy wraz z materiałem podsadzkowym. Skała złożowa w modelu przedstawiona jest w postaci regularnej siatki numerycznej podobnie jak w symulatorach złożowych.

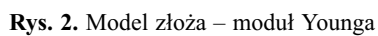
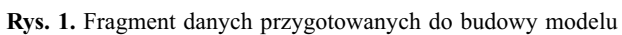
Struktura siatki pozwala na wprowadzenie do modelu złoża zaburzeń zarówno w kierunku poziomym jak i pionowym (asymetria złoża i szczeliny wokół odwiertu, kąt upadu warstwy, uskoki) a także perforacji wielopoziomowych z możliwością modelowania równoczesnej inicjacji szczeliny w kilku perforacjach z uwzględnieniem ich oddziaływania na siebie. Siatka numeryczna wykorzystana jest zarówno do obliczeń geomechanicznych jak i do transportu płynów. Wszystkie parametry (takie jak skład płynów, koncentracja podsadzki, naprężenia, straty cieczy, ciśnienie) definiowane są dla każdego bloku siatki.

Początkowe naprężenia w złożu obliczane są na podstawie ciśnienia złożowego, sprężystości skał oraz ich własności mechanicznych wprowadzanych w postaci krzywych wynikowych z profilowań geofizyki otworowej. Uzyskana geometria szczeliny jest w pełni trójwymiarowa uwzględniająca lokalne zmiany zarówno ciśnienia, naprężeń jak i własności skały złożowej.

Program może pracować w kilku trybach:

1. Tryb projektowania zabiegu szczelinowania hydraulicznego.
2. Tryb analizy i interpretacji testu zatłaczania płynu przed zabiegiem.
3. Tryb poboru danych z zabiegu szczelinowania w czasie rzeczywistym i ich analizy.

Tryb projektowania zabiegu szczelinowania hydraulicznego służy do opracowania projektu zabiegu szczelinowania z uwzględnieniem użytych cieczy szczelinujących, materiału podsadzkowego oraz przyjętego schematu zatłaczania. W oparciu o zbudowany na podstawie pomiarów geofizyki otworowej model złoża (rys. 1 i 2) i przyjęte parametry technologiczne zabiegu, za pomocą symulacji numerycznej modelowany jest przebieg szczelinowania. Program wyposażony jest w bazę cieczy szczelinujących oraz materiałów podsadzkowych, która może być rozbudowywana przez użytkownika.

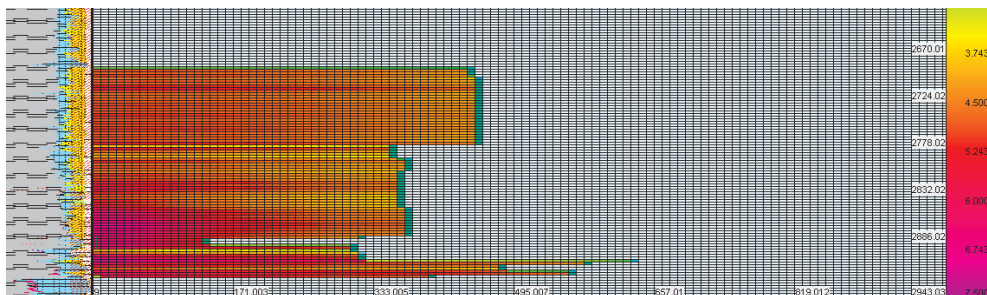


Tryb analizy testu służy do wyznaczania podstawowych własności mechanicznych oraz hydraulicznych skały złożowej w oparciu o wcześniej wykonany test typu „mini frac”.

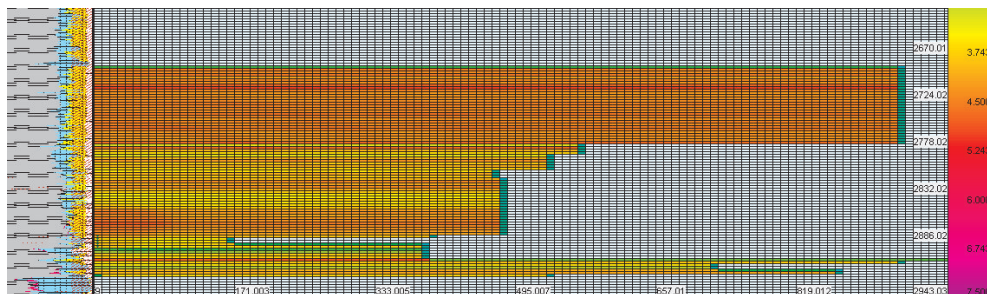
Tryb poboru danych służy do rejestracji przebiegu zabiegu szczelinowania z możliwością obserwacji zmian, analizy uzyskanych wyników w czasie rzeczywistym, aktualizacji schematu tłoczenia na podstawie bieżących wyników.

Program wyposażony jest również w moduł prognozy produkcji wraz z uproszczoną analizą ekonomiczną opartą o NPV. Prognoza produkcji opiera się o analityczne równanie dopływu do odwiertu w którym na podstawie rezultatów symulacji zabiegu szczelinowania uwzględniony jest wpływ szczeliny na przyrost wydajności wg metodyki Cinco-Ley (Cinco-Ley, 1978).

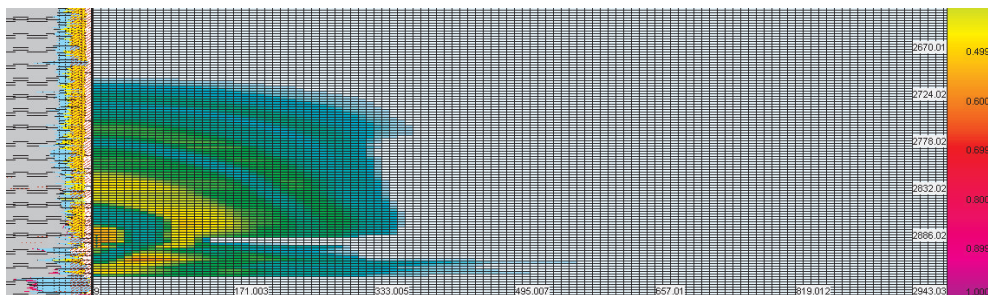
W procesie projektowania definiowany jest harmonogram zatłaczania w czasie zabiegu z definicją wydatku tłoczenia, koncentracją podsadzki oraz rodzajem cieczy i podsadzki na podstawie załączonych baz danych. Tak przygotowany zestaw danych umożliwia wykonanie symulacji, której rezultaty prezentowane są w formie wykresów czasowych jak również wizualizacji w płaszczyźnie siatki obliczeniowej z możliwością wykonania animacji w funkcji czasu. Na rysunkach 3–6 przedstawiono wyniki testowych obliczeń wykonanych przez autorów w interwale o miąższości ok. 300 m, na głębokości ok. 2900 m dla otworu pionowego i danych zbliżonych do wartości z warstw łupkowych w obszarze Basenu Bałtyckiego z wykorzystaniem programu GOHFER.



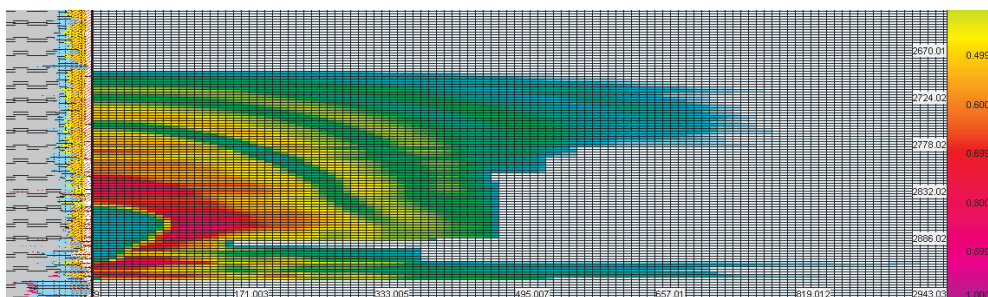
Rys. 3. Zmiany szerokości szczeliny (mm) – 120 minut zabiegu, wtłoczono ok. 1600 m³ cieczy zabiegowej i ok. 87 ton podsadzki



Rys. 4. Zmiany szerokości szczeliny (mm) – koniec zabiegu, wtłoczono ok. 1600 m³ cieczy zabiegowej i ok. 87 ton podsadzki



Rys. 5. Rozkład koncentracji podsadzki (kg/m^2) – 120 minut zabiegu



Rys. 6. Rozkład koncentracji podsadzki po zabiegu (kg/m^2)

Powstała w wyniku symulacji szczelina ma nieregularny kształt. Propagację szczeliny w kierunku pionowym ograniczają strefy o odmiennych własnościach mechanicznych.

3.2. Symulacja zabiegu szczelinowania za pomocą pakietu Meyer Fracturing

Meyer Fracturing jest pakietem programów służących do projektowania i analizy zabiegów szczelinowania hydraulicznego. Głównymi elementami pakietu są programy MFrac, MShale, MProd i MNpv.

Program MFrac jest narzędziem służącym do projektowania zabiegów szczelinowania hydraulicznego w oparciu o model pseudo 3D. Istnieje również możliwość wykorzystania modeli 2D (PKN, KGD). Program oblicza propagację szczeliny równocześnie z transportem podsadzki. Wykorzystywany w programie model p3D powoduje, iż powstała szczelina nie jest obliczana w siatce numerycznej, lecz jej kształt jest ograniczony charakterem modelu (peny shape). Program wyposażony jest w bazę cieczy szczelinujących i materiału podsadzkowego.

Program MShale zbudowany jest na bazie MFrac. Jediną dodatkową opcją w nim jest możliwość zdefiniowania dyskretnej siatki naturalnych szczelin w złożu (DFN) (Meyer, Bazan, 2011). Opcja ta umożliwia zdefiniowanie w złożu regularnej siatki szczelin reprezentującej naturalne spękania. Wymaga to jednak wprowadzenia szeregu dodatkowych

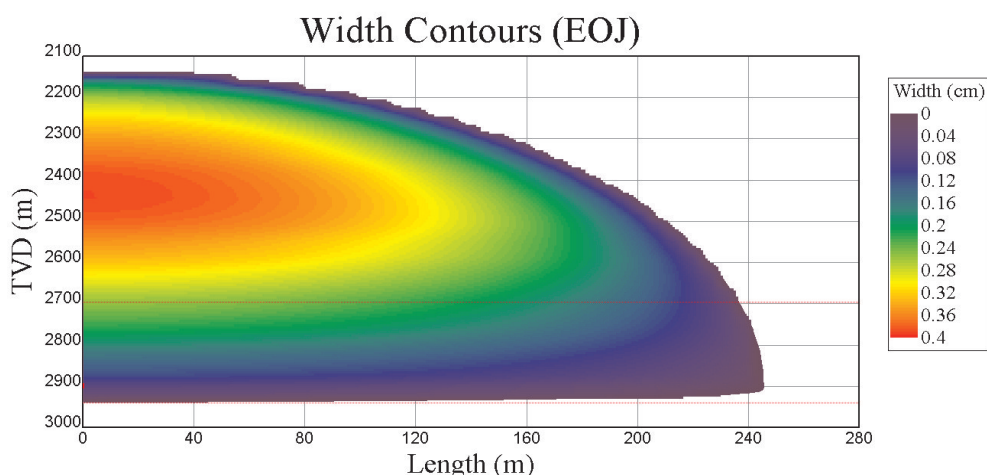
informacji, które w przypadku słabego rozpoznania złoża mogą być trudne do określenia. Uzyskane wyniki są w znacznym stopniu wrażliwe na zmianę parametrów zdefiniowanej siatki.

Program MProd służy do wykonania prognozy wydobywania z odwiertu po zabiegu szczelinowania w oparciu o model analityczny Cinco-Ley, gdzie szczelina reprezentowana jest przez współczynnik skin effectu.

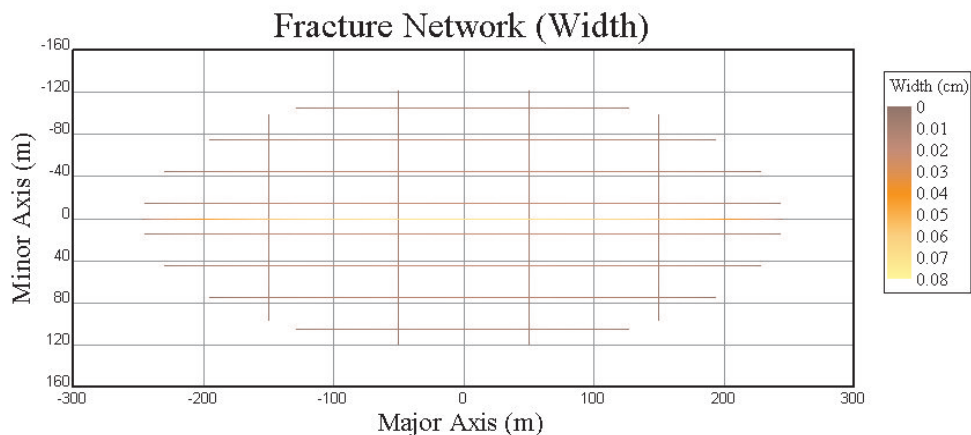
Po wprowadzeniu niezbędnych danych możliwe jest wykonanie symulacji w trakcie której możliwa jest obserwacja zmian podstawowych parametrów zabiegu w czasie. Parametrami wymaganymi przez program są: naprężenia, moduł Younga, współczynnik Poissona, odporność szczeliny na obciążenia (Fracture Toughness), naprężenia krytyczne, porowatowość, przepuszczalność, ciśnienie złożowe. W przeciwieństwie do programu GOHFER nie ma możliwości analizy i interpretacji danych pomiarowych z profilowań geofizyki otworowej. Zmiany głównych właściwości mechanicznych z głębokością determinują podział profilu na strefy, co może być stosunkowo łatwe w przypadku złóż konwencjonalnych (kilka stref o wyraźnym kontraście właściwości mechanicznych).

Wymagane jest również zdefiniowanie zmian empirycznych współczynników strat cieczy szczelinującej (Leakoff Coefficient, Spurt Loss Coefficient) w zależności od rodzaju skały w profilu odwiertu. Wartość przyjętych współczynników znacząco wpływa na propagację szczeliny.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wizualizację rezultatów testowych symulacji zabiegu szczelinowania w otworze pionowym dla danych zbliżonych do wartości z warstw łupkowych z obszaru Basenu Bałtyckiego (w modelu wykorzystano ciecz szczelinującą i podadzkę dostępne w bazie programu, co wpływa na uzyskane wyniki). Wartości liczbowe parametrów przyjęto na podstawie informacji dostępnych na stronach internetowych firm zagranicznych prowadzących w Polsce poszukiwania gazu łupkowego.



Rys. 7. Rozkład szerokości szczeliny (EOJ – koniec zabiegu)



Rys. 8. Wizualizacja uzyskanej w wyniku obliczeń dyskretnej siatki szczelin (DFN) widok z góry

Powstała sieć szczelin ma regularny kształt. Spowodowane jest to przyjętym pseudo 3D modelem szczeliny. Ze względu na mały kontrast własności mechanicznych szczelina propaguje znacznie w kierunku pionowym, co wynika też po części z przyjętego modelu (brak pełnego uniezależnienia wysokości szczeliny od pozostałych wymiarów).

4. PODSUMOWANIE

Ze względu na specyfikę złóż niekonwencjonalnych, w modelowaniu zabiegu szczelinowania hydraulicznego coraz szersze zastosowanie znajdować będą modele trójwymiarowe umożliwiające uwzględnienie odmiennej budowy takich złóż. Rozwiązaniem częściowym może być wykorzystanie modeli pseudo 3D rozbudowanych o opcję modelowania naturalnej sieci szczelin.

Analizowane oprogramowanie jest wykorzystywane do projektowania zabiegu szczelinowania w złożach niekonwencjonalnych. Programy różnią się przede wszystkim sposobem modelowania zabiegu szczelinowania. Program GOHFER jest w pełni trójwymiarowym symulatorem (wszystkie 3 wymiary szczeliny niezależne), pakiet Meyer Fracturing (MFrac i MShale) opiera się o model pseudo 3D. Dlatego też w przypadku modelowania złóż niekonwencjonalnych, bardziej realistyczne wyniki uzyskać można za pomocą programu GOHFER. Zaletą programu MShale jest możliwość zdefiniowania dyskretnej siatki reprezentującej naturalne szczeliny, co powoduje uzyskanie sieci spękań, jednakże o kształcie regularnym na skutek stosowania modelu p3D. Aktualnym problemem pozostaje określenie geometrii naturalnych szczelin występujących w złożu.

LITERATURA

Brady B., Poe B., Elbel J., Mack M., Morales H., Nolte K.: *Cracking Rock: progress in Fracture Treatment Design*. Oilfield Review, October 1992.

Cinco-Ley H., Samaniego-V.F., Dominguez N.: *Transient Pressure Behavior for a Well with a Finite-Conductivity Vertical Fracture*. SPE 6014, 1978.

Economides M.J., Martin T.: *Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production*. ET Publishing Inc., Houston 2007.

Economides M.J., Nolte K.G.: *Reservoir Stimulation*. 3rd edition, John Wiley & Sons Inc, 2000.

GOHFER – Manual. 2011.

Meyer B.R., Bazan L.W.: *A Discrete Fracture Network Model for Hydraulically Induced Fractures: Theory, Parametric and Case Studies*. SPE 140514, 2011.

Meyer Fracturing – Reference Manual. 2011.