

Streszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Pasternackiego pt.

OCENA EFEKTYWNOŚCI PROCESU SZCZELINOWANIA HYDRAULICZNEGO W EKSPLOATACJI GAZU ZIEMNEGO Z ŁUPKÓW ILASTYCH NA PODSTAWIE BADAŃ MIKROSEJSMICZNYCH

Data: 04 lipca 2016

Celem rozprawy doktorskiej było określenie możliwości wykorzystania badań mikrosejsmicznych do oceny efektywności procesu szczelinowania hydraulicznego oraz wypracowanie metodyki połączonej interpretacji wyników lokalizacji hipocentrowych trzęsień ziemi z danymi sejsmiki refleksyjnej. Analizie poddano jeden z pierwszych obszarów, na których prowadzono prace stymulacji wydobywania ze złóż niekonwencjonalnych gazu ziemnego na terenie Polski. W pracy przedstawiono komplementarną analizę danych monitoringu mikrosejsmicznego i sejsmiki refleksyjnej, uzupełnioną modelowaniami sejsmicznymi.

Poszukiwanie nagromadzeń węglowodorów w sensie tradycyjnym ogranicza się głównie do określenia lokalizacji, które spełniają podstawowe warunki systemu naftowego, tj. obecność skały zbiornikowej, której efektywność warunkują parametry petrofizyczne, powstanie pułapki i obecność dojrzałej materii organicznej wraz z ich odpowiednim współwystępowaniem czasowo-przestrzennym. Poszukiwanie złóż niekonwencjonalnych ma odmienny charakter, jako że z założenia złoża tego typu nie wymagają obecności pułapki naftowej, a w przypadku złóż typu *shale gas* przedmiotem eksploracji jest sama skała macierzysta. Złoża niekonwencjonalne niekiedy definiuje się jako takie, które bez wykonania dodatkowych zabiegów stymulacji nie byłyby w stanie uzyskać stabilnego i wystarczająco dużego wydatku, aby mogły zostać uznane za komercyjne. Pomimo, iż obecnie trwają prace eksperymentalne, mające na celu rozwój nowych metod stymulacji wydobywania ze złóż niekonwencjonalnych, podstawową i najczęściej stosowaną metodą jest szczelinowanie hydrauliczne z wykorzystaniem wody. Polega ono na zatłaczaniu pod dużym ciśnieniem i z dużym wydatkiem wody, z dodatkami chemicznymi do górotworu, w celu zakłócenia naturalnej równowagi naprężeń, a tym samym wygenerowaniu sieci spękań, których otwarcie jest podtrzymywane przez podsadzkę, dzięki czemu mogą one stanowić drogi przemieszczania się węglowodorów do otworu. Część powstałej w ten sposób energii wyzwolona zostaje w postaci niewielkich wstrząsów.

Przedmiotem badań mikrosejsmiki są wstrząsy wywołane działalnością człowieka, mechanizm ich powstawania, jak i propagacji fal, jest tożsamy jak w przypadku trzęsień ziemi, jednak przy znacznie mniejszej energii. Na skutek prowadzenia eksploatacji górniczej naruszona zostaje naturalna równowaga naprężeń w ośrodku geologicznym, a w wyniku relaksacji zgromadzonej energii generowane są wstrząsy. Wstrząsy mikrosejsmiczne, które monitorowane są w trakcie eksploatacji złóż ropy naftowej, gazu ziemnego i energii geotermalnej, są zjawiskiem spodziewanym i w tym przypadku także pożądanym zakładając, iż wyzwolona energia nie osiągnie wielkości, która mogłaby stanowić zagrożenie. Ich obecność świadczy o powstaniu i rozwoju sieci spękań w wyniku zatłaczania cieczy do górotworu.

Proces szczelinowania hydraulicznego, powinien być kontrolowany, w celu uniknięcia powstania i rozwoju szczelin w kierunkach niepożądanych, takich jak istniejące wcześniej uskoki i spękania pochodzenia tektonicznego, mogących w przypadku ich dalszej stymulacji doprowadzić do szeregu negatywnych zjawisk. Utrata, wtłaczanych uskokami poza obszar złoża, znacznych ilości płynu stosowanego przy szczelinowaniu hydraulicznym powoduje podnoszenie kosztów operacji oraz powstanie ryzyka kontaminacji środowiska naturalnego. Analizując same krzywe zatłaczania możliwe

jest rozpoznanie takich zjawisk, jakkolwiek ich interpretacja jest niejednoznaczna i obarczona dużym błędem pomiaru. W przypadku monitoringu mikrosejsmicznego prowadzonego w czasie rzeczywistym możliwe jest zidentyfikowanie opisywanego zjawiska i ewentualne zatrzymanie procesu stymulacji. Jednym z najistotniejszych zastosowań mikrosejsmiki jest ocena efektywności samego procesu szczelinowania hydraulicznego. Określenie objętości strefy zeszczelinowanej pozwala na ocenę zastosowanego programu stymulacji tj. dobór i skład płynów szczelinujących, ciśnienia i wydatków zatłaczania. Jest to także cenna informacja, w oparciu, o którą wykonać można estymację wydobycia ze złoża węglowodorów niekonwencjonalnych. Monitoring mikrosejsmiczny z jednej strony ma na celu odbiór i rejestrację wywołanych w trakcie szczelinowania wstrząsów sejsmicznych o niewielkich amplitudach, a tym samym magnitudach, z drugiej przetworzenie tych danych w sposób pozwalający na określenie kierunków i rozmiarów powstającej sieci szczelin. Prawidłowo przeprowadzony monitoring mikrosejsmiczny wymaga zaprojektowania systemu obserwacji (akwizycji) umożliwiającego w danych warunkach geologicznych skuteczną rejestrację danych. Istotnym elementem w interpretacji jest określenie niepewności lokalizacji ognisk, jak i zidentyfikowanie problemów wynikających z założonej metody akwizycji. W przypadku monitoringu powierzchniowego, będzie to na przykład niski poziom detekcji, a w głębokim otworze monitorującym zmienny wraz z odległością od otworu monitorującego poziom detekcji oraz niekiedy duże niepewności lokalizacji.

W ramach prac badawczych wykonano przetwarzanie rekordów monitoringu mikrosejsmicznego prowadzonego w odwiercie Lubocino-1 podczas szczelinowania w części horyzontalnej otworu Lubocino-2H. Głównym celem wykonywanych prac było wyjaśnienie wątpliwości, którymi cechowały się wyniki interpretacji archiwalnej, gdzie wstrząsy z poszczególnych etapów szczelinowania hydraulicznego silnie nachodziły wzajemnie na siebie, a dla etapów szczelinowania hydraulicznego położonych najdalej od otworu monitorującego obserwowano anomalne liniowanie się lokalizacji ognisk. Dodatkowo przeprowadzone analizy umożliwiły przetestowanie i zweryfikowanie poszczególnych procedur przetwarzania na danych rzeczywistych. Pole prędkości było kalibrowane zdarzeniami związanymi z perforacjami odpowiednimi dla danego etapu szczelinowania hydraulicznego. Podejście takie pozwala na założenie ośrodka izotropowego bez konieczności uwzględniania zjawiska anizotropii. Założono przy tym, iż zdarzenia sejsmiczne lokalizowane są z wykorzystaniem pola prędkości przystosowanego do analizowanego etapu szczelinowania hydraulicznego, kalibrowanego zdarzeniami o znanej lokalizacji, czyli perforacjami eksplozywnymi wykonywanymi dla tego etapu szczelinowania hydraulicznego. Dodatkowym aspektem pracy było wykonanie serii modelowań sejsmicznych i przetwarzania ich wyników, w celu oceny zastosowanej geometrii pomiarowej, a przede wszystkim zaprojektowanie układu pomiarowego w głębokim otworze monitorującym w trakcie ewentualnego kontynuowania prac poszukiwawczych w obrębie obszaru górniczego odwiertów Lubocino.

W pracy przedstawiono i omówiono również wyniki monitoringu powierzchniowego prowadzonego w trakcie szczelinowania otworu Lubocino-2H. Przyczyny braku wstąpień fal sejsmicznych dla układu powierzchniowego zbadano w oparciu o modelowanie sejsmiczne. W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, iż energia fal nie została całkowicie wytłumiona, a brak zapisów zdarzeń indukowanych należy wiązać ze znacznym poziomem zakłóceń w trakcie prowadzonych prac. Przedstawione rozwiązanie symulacji propagacji fali sprężystej pozwoliło na uzyskanie syntetycznych zapisów, jakich można oczekiwać dla rozpatrywanych typów układów pomiarowych. Wyniki modelowania sugerują, iż fala dochodząca do odwiertów monitorujących

w odległości powyżej 1,5 [km] jest silnie osłabiona, kiedy układ pomiarowy znajduje się na głębokości strefy szczelinowania. W wyniku symulacji wariantów otworowego układu pomiarowego dowiedziono, iż w przypadku umiejscowienia czujników w obrębie warstw o niewielkich kontrastach impedancji akustycznej lokalizacja ognisk wstrząsów jest lepsza.

Jednym z założeń niniejszej pracy było określenie możliwości wykorzystania połączonej interpretacji danych mikrosejsmicznych z danymi sejsmiki refleksyjnej. Istotnym elementem analizy było określenie parametrów petrofizycznych w oparciu o standardowe narzędzia analityczne tj. inwersja sejsmiczna i ocena korelacji poszczególnych parametrów petrofizycznych nieestymowanych bezpośrednio z danych sejsmicznych. W celu określenia wielkości udziału materii organicznej opracowano szereg analiz, których nadrzędnym celem była ocena możliwości i ograniczeń estymacji tego parametru bazując na danych sejsmiki refleksyjnej po inwersji. W trakcie realizacji pracy pojawił się szereg pobocznych pytań i analiz, które włączono do niniejszego rozprawy, jako uzupełnienie całości rozważań, tj. ocena efektu *tuningu* w warstwach będących przedmiotem eksploatacji, wpływ obecności materii organicznej na parametry sprężyste, modelowanie sejsmiczne nieciągłości tektonicznej. Istotną częścią pracy stała się analiza λ - μ - ρ , która stanowi narzędzie w identyfikacji tzw. *sweet-spotów*, czyli obszarów charakteryzujących się zwiększoną obecnością materii organicznej i podatnych na szczelinowanie w oparciu o analizę danych sejsmiki refleksyjnej. Wykorzystano także archiwalne dane otworowe, co pozwoliło na weryfikację uzyskanych tą metodą rozkładów parametrów petrofizycznych. Przedstawiona analiza λ - μ - ρ pozwala na ocenę podatności na szczelinowanie nawet w przypadku braku większych offsetów, niepozwalających przy tym na poprawną estymację gęstości. Przedstawione opisy statystyczne udziału materii organicznej dostarczyły istotnych korelacji w kontekście oceny jej udziału z wykorzystaniem danych sejsmiki refleksyjnej. Wyniki interpretacji zdjęcia sejsmicznego Lubocino-3D objęły, zatem zarówno interpretację strukturalną jak i złożową, pozwalając na wyznaczenie miejsc perspektywicznych w jego obrębie. Uzyskane atrybuty sejsmiczne posłużyły także w dalszej części rozważań do połączonej interpretacji z danymi monitoringu mikrosejsmicznego.

Podstawową informacją, jaką uzyskuje się z danych mikrosejsmicznych jest objętość strefy występowania zdarzeń mikrosejsmicznych (MV), którą dla rozpatrywanego przypadku można oszacować na ~ 3 [mln m³]. Analizując uzyskane wyniki pozycji mikrowstrząsów w badanym przypadku, nie można jednak uznać tej objętości produktywną. W wyniku połączonej analizy z danymi sejsmicznymi okazało się, iż szczelinowanie odbywało się w obrębie strefy uskokowej prawie zgodnej co do kierunku z regionalnym naprężeniem, co negatywnie wpłynęło na efektywność procesu stymulacji wydobywania, jako że większa część energii uległa dyssypacji w strefach uskokowych nie tworząc użytecznej dla eksploatacji sieci szczelin w obrębie warstw macierzystych. Powyższą tezę potwierdza także rozkład magnitud, gdzie wielkość współczynnika b miała wartości mniejsze niż 2. Biorąc pod uwagę wyniki analizy λ - μ - ρ można stwierdzić, iż miejsce w którym prowadzono stymulacje nie było optymalnym pod względem podatności na rozwój szczelin indukowanych, jako że warstwy charakteryzowały się względną plastycznością, co częściowo potwierdziła wielkość wskaźnika kruchości.

Potwierdzono zależność pomiędzy lokalizacjami ognisk hipocentrów indukowanych wstrząsów mikrosejsmicznych z wykorzystaniem atrybutów sejsmiki refleksyjnej. Warstwy poddane stymulacji cechowały się wystarczającą ilością materii organicznej, aby uznać je za produktywną dla gazu niekonwencjonalnego, jednak pod względem podatności na szczelinowanie opisanej analizą λ - μ - ρ ,

nie są podatne na rozwój szczelin. Potwierdza to niewielka odległość i objętość strefy zeszczelinowanej (MV) dla pierwszych dwóch i części trzeciego etapu szczelinowania hydraulicznego. Dalszy rozwój MV w etapach 4 do 6 był głównie spowodowany przejściem do strefy, gdzie znajdują się naturalnie występujące szczeliny, co znalazło odzwierciedlenie w wielkości parametru b , opisującego rozkład wielkości amplitud wedle zależności Richtera-Gutenberg.

W oparciu o połączoną analizę atrybutów sejsmicznych z wynikami przetwarzania rekordów otworowego monitoringu mikrosejsmicznego stwierdzono, iż szczelinowanie częściowo odbywało się w obrębie strefy uskokowej. Wpłynęło to negatywnie na efektywność procesu stymulacji wydobywania, jako że większa część energii uległa dyssypacji w strefach uskokowych, nie tworząc użytecznej dla eksploatacji sieci szczelin, w obrębie warstw macierzystych. Analiza sejsmicznie estymowanych modułów sprężystości pozwoliła stwierdzić, iż miejsce, w którym prowadzono stymulacje nie było optymalne pod względem podatności na rozwój szczelin, z powodu plastyczności ośrodka skalnego.