

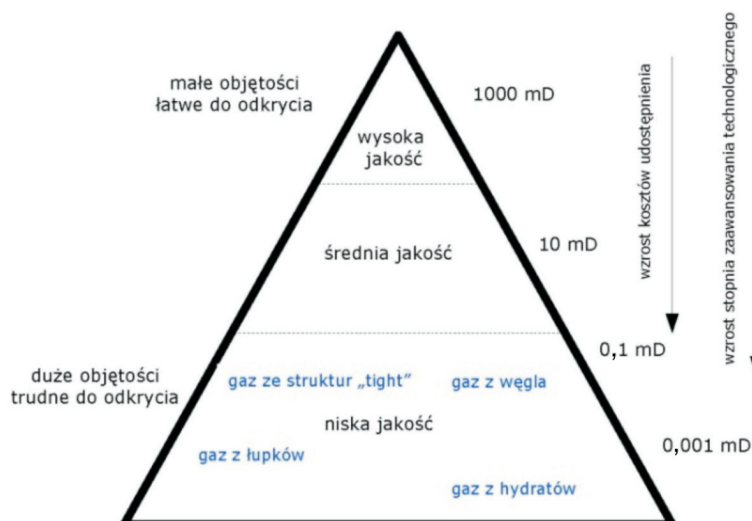
Piotr Kasza

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Zabiegi stymulacji wydobywania w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów

Ponad trzydzieści lat temu została wyodrębniona i scharakteryzowana specyficzna grupa złóż węglowodorów – złoża te zostały określone jako *Tight Reservoirs*. Nazwa wskazuje, że do tej grupy zaliczane są złoża ropy naftowej oraz gazu ziemnego charakteryzujące się małą i bardzo małą przepuszczalnością (złoża zbite). Taka też była pierwsza definicja podana w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Zdecydowano, że nazwą tą określane będą złoża, których przepuszczalność dla gazu wynosić będzie nie więcej niż 0,1 mD. Ta pierwsza definicja miała charakter „polityczny”, gdyż oznaczało to, że w niektórych krajach firmy prowadzące eksploatację ze złóż typu *tight* mogły korzystać z rządowych dotacji, w związku z uzyskiwaniem energii ze źródeł niekonwencjonalnych. Drugim, nie mniej ważnym typem złóż niekonwencjonalnych są łupki gazonośne – *shale gas*. Obecnie stosowana definicja złóż niekonwencjonalnych jest nieco inna i ma charakter inżynierski; jest ona połączeniem wielu parametrów technicznych i ekonomicznych. Ogólna definicja złóż niekonwencjonalnych mówi, że w złożach tych ekonomiczna eksploatacja gazu jest niemożliwa bez wykonania odwiertu poziomego lub odwiertów wielodennych i wykonania w nich wielu zabiegów stymulacji wydobywania. Zgodnie z tą definicją, zasoby węglowodorów zakumulowane w złożach typu *tight* i *shale* zaliczyć należy do zasobów niekonwencjonalnych, które w bardzo ogólny sposób można zobrazować za pomocą trójkąta zasobów gazu ziemnego (rysunek 1) [3]. Złoża te charakteryzują się matrycą o bardzo niskiej przepuszczalności – w niektórych przypadkach rzędu nanodarcy. Aby zabiegi stymulacyjne w tego typu formacjach były skuteczne musi w nich ist-

nieć sieć porów i mikroszczelin, wspomagających proces przepływu mediów złożowych po wykonaniu zabiegów stymulacyjnych. Według danych literaturowych [1], komercyjnie eksploatowane złoża łupków (Barnett, Rhinestreet) charakteryzują się współczynnikiem porowatości w granicach 0,7÷6%, a współczynnik przepuszczalności wyrażony jest w nanodarcy. W łupkach tych podstawowym składnikiem budującym matrycę skalną są minerały nieilaste – głównie kwarc (60÷70%), z dużą zawartością minerałów ilastych – przede wszystkim illitu (30÷40%).



Rys. 1. Trójkąt zasobów gazu ziemnego

Z graficznego przedstawienia zasobów gazu ziemnego na świecie wynika, że niekonwencjonalne zasoby złóż tego surowca (w tym złóż typu *tight* i *shale*) są znacznie większe niż zasoby złóż konwencjonalnych. Eksploatacja węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych to wielkie wyzwanie techniczno-technologiczne – dotyczy to zarówno stosowanych technik, technologii, wiedzy, narzędzi

inżynierskich i sprzętu, jak również kosztów realizacji takiej inwestycji.

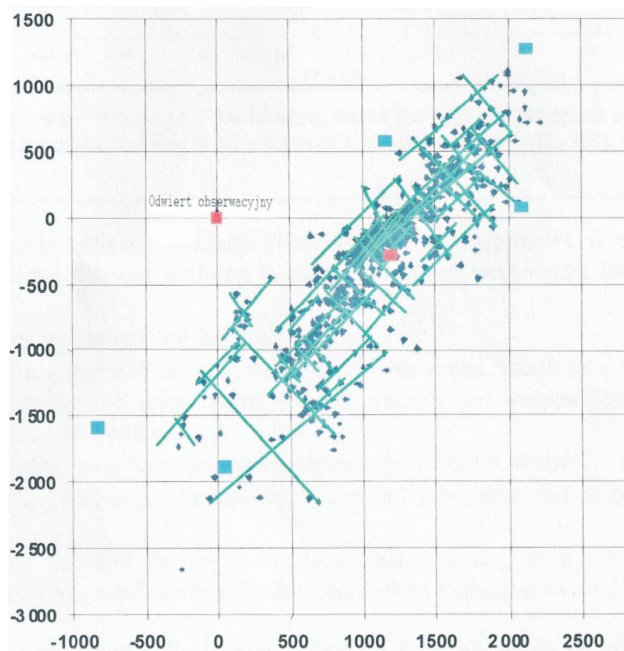
W celu stymulacji złóż zabiegi szczelinowania hydraulicznego stosowane są już od dziesiątków lat. Zabiegi w złożach typu *tight* też nie są niczym nowym; wykonuje się je od lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia. Zabiegi w złożach *tight* mają zazwyczaj charakter konwencjonalny, a od zabiegów w złożach konwencjonalnych różnią się jedynie ilością zatłaczanej cieczy szczelinującej, ilością zatłoczonej podsadzki (dochodzącej do 1000 ton) oraz wymiarami szczeliny (znacznie przekraczającymi wymiary szczelin w złożach konwencjonalnych). Ze względu na niskie i bardzo niskie współczynniki przepuszczalności matrycy złóż *tight* – zabiegi te muszą być odpowiednio większe, dlatego też określono je mianem MHF (*Massive Hydraulic Fracturing*). Poza zwielokrotnieniem ilości użytych materiałów i wytworzeniem szczeliny o imponujących rozmiarach, nie różniły się one jednak niczym od zabiegów w złożach konwencjonalnych; przede wszystkim stosowana technologia, sposób modelowania i projektowania zabiegów oraz ich wykonawstwo było niemal identyczne. Odkrycie złóż typu *shale* w ogromnym stopniu zmieniło techniki i technologie szczelinowania hydraulicznego. W wyniku prowadzenia prób i eksperymentów w złożach łupkowych oraz eksperymentalnych prac laboratoryjnych – popartych rozważaniami teoretycznymi – opracowano technologie szczelinowania cieczą o bardzo niskiej lepkości, nieprzekraczającej 10 cP. Technikę tę nazwano *Slickwater Fracturing* – jest to technologia szczelinowania złóż niekonwencjonalnych. Cieczą technologiczną do wykonania zabiegu w tej technologii jest woda, do której jedynie dodaje się niewielkie ilości (nie przekraczające 1%) poliakryloamidu lub polimeru liniowego. Dodatek ten ma na celu obniżenie oporów przepływu w rurach, perforacji i w szczelinach. Poza obniżeniem koncentracji polimeru oraz rezygnacją z technologii sieciowania polimeru liniowego, wykorzystanie tej metody wiąże się z koniecznością stosowania dużych wydajności tłoczenia – dochodzących nawet do 16 m³/min. Spowodowane jest to koniecznością wtłoczenia odpowiedniej ilości cieczy do przekroczenia ciśnienia szczelinowania i utrzymania propagacji szczelin, przy jednoczesnej obecności wysokiej filtracji w matrycę. W zabiegach tego typu stosuje się też znacznie niższe koncentracje materiału podsadzkowego. Klasyczne zabiegi *Slickwater Fracturing* wykonuje się przy koncentracji podsadzki od 30 do 120 kg/m³. Zabiegi uważane za agresywne w tej technologii charakteryzują się koncentracjami podsadzki dochodzącymi do 360 kg/m³ [6].

Charakterystyczne cechy wyróżniające technologię *Slickwater Fracturing* to:

- minimalizacja uszkodzenia szczelin i matrycy, w związku z minimalną zawartością polimeru,
- duże ilości cieczy technologicznej do wykonania zabiegu,
- stosunkowo niskie koszty cieczy,
- konieczność stosowania bardzo dużych wydajności tłoczenia,
- dobra kontaminacja szczeliny w stymulowanym horyzoncie,
- bardzo złożona geometria szczelin,
- możliwość wielokrotnego użycia cieczy technologicznej,
- wysoka filtracja w matrycę i mikroszczeliny,
- ograniczone właściwości transportowe podsadzki,
- bardzo mała rozwarłość wytworzonych szczelin,
- stosowanie materiałów podsadzkowych o małych rozmiarach,
- brak możliwości stosowania klasycznych modeli propagacji szczeliny (PKN) i symulatorów do projektowania zabiegów,
- szybkie zamknięcie szczeliny po zabiegu,
- brak tzw. *filter cake'u*.

Z przedstawionych argumentów wynika, że wykonanie zabiegu hydraulicznego szczelinowania w złożach niekonwencjonalnych przy użyciu niekonwencjonalnej technologii jest zadaniem trudnym. Zaprojektowanie tego zabiegu w sposób klasyczny nie jest możliwe, gdyż większość modeli i przyjętych założeń w tej technologii nie obowiązuje w złożach niekonwencjonalnych, zatem użycie symulatorów do projektowania zabiegów może prowadzić do uzyskania błędnych wyników. W wielu przypadkach projektowanie i przygotowanie zabiegów w tej technologii ma charakter empiryczny – oparty na zebranych doświadczeniach, obserwacjach i pomiarach z wykonanych zabiegów oraz uzyskanych efektach produkcyjnych. Jak już wspomniano, w wyniku szczelinowania złóż typu *shale* tworzy się skomplikowany system szczelin – w odróżnieniu od klasycznego zabiegu w klasycznym złożu, gdzie zazwyczaj tworzą się dwa skrzydła szczeliny. Obecnie opisanie takiego systemu szczelin istniejącymi modelami czy programami nie jest możliwe. Modele te trzeba dopiero stworzyć oraz opracować odpowiednie oprogramowanie do analizy i projektowania tego typu zabiegów. Ale to sprawa przyszłości; w chwili obecnej ogromną uwagę skupia się na analizie danych z zabiegu, w nawiązaniu do uzyskanych efektów. Nowym narzędziem w tej diagnostyce jest tworzenie map mikrosejsmicznych. Do interpretacji efektywności i zasięgu zabiegu niezbędna

jest analiza zdarzeń mikrosejsmicznych rejestrowanych w trakcie szczelinowania. Pozwala ona na opracowanie mapy zdarzeń sejsmicznych w czasie i przestrzeni, która może stanowić podstawę do interpretacji geometrii wytworzonego systemu szczelin. Jak pokazują doświadczenia z takich analiz, wytworzony system szczelin jest systemem w pełni trójwymiarowym. W trakcie zabiegu powstaje bardzo wiele szczelin o niewielkiej rozwarości i dużym zasięgu, tworząc sieć umożliwiającą kontakt z naturalnymi mikroszczelinami (rysunek 2).



Rys. 2. Mikrosejsmiczna interpretacja geometrii szczeliny

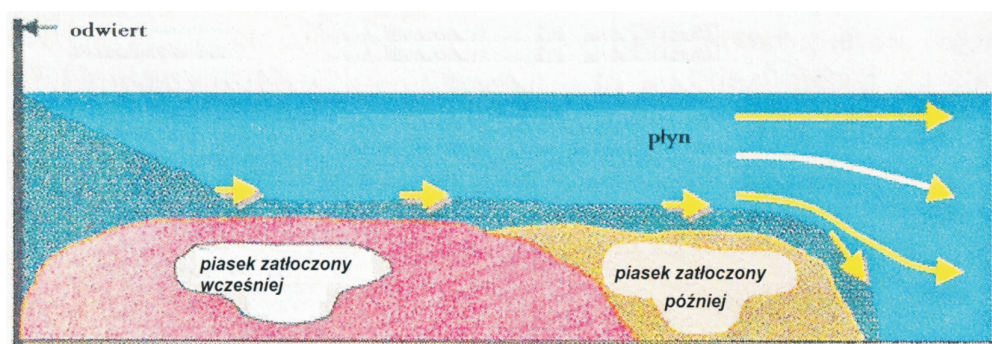
Takie pojęcie „szczeliny” w złożach typu *shale* spowodowało konieczność wprowadzenia nowego parametru, nie stosowanego przy opisie szczelin wykonanych klasyczną metodą w złożach konwencjonalnych. Parametr ten określa objętość złoża objętą procesem stymulacji – oznacza się go jako SRV (*Stimulation Reservoir Volume*). Teoretyczne i praktyczne próby definicji oraz opisu procesu tworzenia się objętościowego systemu szczelin w złożach typu *shale* pozwoliły stwierdzić, że:

- metoda *Slickwater Fracturing* w łupkach, w dużej objętości szczelinowanego interwału powoduje utworzenie systemu szczelin,
- podczas wykonywania zabiegu szczelinowania, do próby opisu geometrii systemu szczelin

- niezbędne jest wykonanie badań mikrosejsmicznych,
- wytworzony system szczelin posiada powierzchnię 10÷100-krotnie większą niż tradycyjne szczeliny dwuskrzydłowe,
- obecne modele do projektowania szczelinowania hydraulicznego metodą *Slickwater Fracturing* są nieprzydatne w złożach typu *shale*.

Kolejnym bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia efektywności zabiegu jest problem transportu materiału podsadzkowego. W klasycznych zabiegach hydraulicznego szczelinowania, wysoka lepkość sieciowanej cieczy szczelinującej pozwala na zawieszenie ziaren podsadzki w cieczy zabiegowej przy minimalnej prędkości opadania grawitacyjnego. Stosując ciecz o lepkości nieprzekraczającej 10 cP uzyskanie zawieszenia podsadzki w cieczy technologicznej jest niemożliwe. Jednym z dostępnych rozwiązań jest stosowanie podsadzek o jak najniższej gęstości. Częściowe ograniczenie zjawiska opadania grawitacyjnego można osiągnąć zmniejszając wielkość ziaren podsadzki. Problem transportu podsadzki w bardzo wąskich szczelinach przy użyciu cieczy o niskiej lepkości, zatłaczanej z dużą wydajnością, był wielokrotnie badany w laboratoriach. Stwierdzono, że wpływająca w takich warunkach podsadzka będzie się osadzać na spodzie wytworzonej szczeliny zaraz po przejściu przez perforację – tworząc tzw. „bank”. Jego wysokość jest ściśle zależna od lepkości cieczy, koncentracji w niej materiału podsadzkowego oraz od wydajności tłoczenia. W związku z tym zatłoczona podsadzka w pierwszej kolejności osadza się blisko otworu, a kolejne jej porcje – „ślizgając” się po już osadzonej podsadzce – przenoszone są z płynem w dalsze rejony szczeliny dzięki zjawiskom fluidyzacji i sedymentacji grawitacyjnej (rysunek 3).

Z rozważań tych wynika, że transport podsadzki odbywa się odwrotnie niż w szczelinowaniu klasycznym, gdzie materiał podsadzkowy, który został zatoczony najwcześniej dociera do najbardziej odległego miejsca w szczelinie. Powoduje to konieczność zmiany strategii pompowania.



Rys. 3. Układanie podsadzki podczas zabiegu *Slickwater Fracturing*

Wiadomo, że jednym z ważniejszych skutków szczelinowania jest uzyskanie wysokiej przewodności szczeliny na ścianie odwiertu. Dlatego w klasycznym szczelinowaniu, w ostatniej fazie zatłaczania dodaje się maksymalne koncentracje podsadzki i największe rozmiary ziaren, aby znalazły się one na wlocie do szczeliny. Chcąc osiągnąć ten sam cel w szczelinowaniu złóż niekonwencjonalnych, największe rozmiary ziaren i największa koncentracja powinna być użyta w pierwszym etapie zatłaczania.

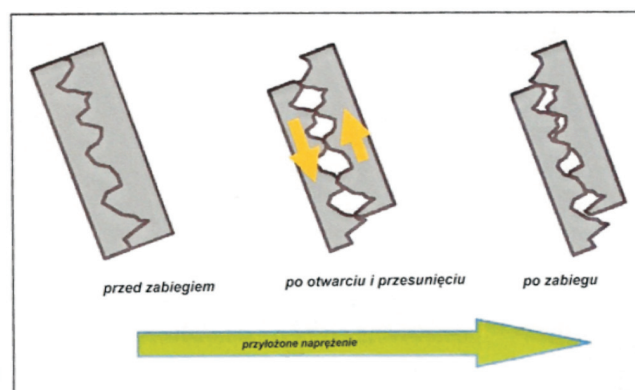
Badania laboratoryjne i terenowe z użyciem znaczników promieniotwórczych nad transportem oraz układaniem się materiału podsadzkowego w szczelinie dowiodły, że zawieszenie podsadzki w płynie szczelinującym nie jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na podsadzenie szczeliny – czynnikami tymi są: fluidyzacja i sedymentacja. Stwierdzono, że zasięg transportu 100-meshowego materiału podsadzkowego w szczelinie wynosi do 400 metrów, a materiału podsadzkowego 40÷70 mesh – ok. 170 metrów [6].

Wytwarzany w procesie hydraulicznego szczelinowania system szczelin w złożach niekonwencjonalnych charakteryzuje się bardzo małą rozwartością tych szczelin, co powoduje konieczność stosowania podsadzek o małych lub bardzo małych średnicach ziaren. Uwzględniając dodatkowo niskie koncentracje materiału podsadzkowego w zatłaczanej cieczy technologicznej, pojawia się problem uzyskania odpowiedniej przewodności szczelin; będą one zapewne wielokrotnie mniejsze niż w przypadku szczelin w złożach konwencjonalnych, jednak nie będą uszkodzone pozostałościami polimeru i *filter cake*'u. W przypadku złóż konwencjonalnych uszkodzenie przewodności może sięgać nawet 95%. Wytworzony w złożu niekonwencjonalnym system szczelin o niskiej przewodności może być równie efektywny jak szczelina o wysokiej przewodności w złożu konwencjonalnym z dużym uszkodzeniem. W trakcie podsadzania systemu szczelin w złożach typu *shale* materiał podsadzkowy może generować przewodność szczeliny na trzy różne sposoby:

- podsadzka może układać się wielowarstwowo (jak przy klasycznym szczelinowaniu) – zachodzi to tylko w obszarze tworzenia się tzw. *bank*'u,
- podsadzka może zawieszać się oraz blokować w przewężeniach szczelin i mikroszczelin,
- trzecim możliwym sposobem ułożenia podsadzki w szczelinie jest utworzenie częściowej, pojedynczej warstwy [6].

Dodatkowo w złożach łupkowych podczas zabiegu hydraulicznego szczelinowania może zachodzić zjawisko ślizgania się poszczególnych warstw łupku w wyniku dzia-

łających naprężeń i wytworzenie dodatkowej przewodności bez lub z jej podsadzeniem materiałem podsadzkowym (rysunek 4).



Rys. 4. Dodatkowa przewodność przy szczelinowaniu łupków

Ogromny postęp nastąpił również w dziedzinie materiałów podsadzkowych służących do stymulacji złóż niekonwencjonalnych. Zmierzając do jak najbardziej efektywnego podsadzania systemu szczelin i mikroszczelin, do komercyjnego stosowania wprowadzono nowe typy materiałów podsadzkowych. Pierwszą taką grupę stanowią materiały podsadzkowe o gęstości zbliżonej do gęstości wody ($1,05 \text{ g/cm}^3$). Materiały te niemal pływają w cieczy zabiegowej, umożliwiając wydłużenie zasięgu szczelin. Kolejną nową grupę stanowią materiały podsadzkowe porowate – ich zastosowanie zmniejsza gęstość podsadzki oraz otwiera dodatkowe kanały przepływu dla gazu. Następną grupą nowych podsadzek są materiały termoplastyczne, które pod wpływem naprężeń i temperatury zmieniają swój kształt, stając się bardziej odpornymi na naprężenia ściskające.

Dobór techniki umieszczenia podsadzki, jej rodzaju i koncentracji zawsze będzie sprawą inżynierów projektujących zabiegi szczelinowania; muszą oni uwzględniać zarówno aspekty techniczne i ekonomiczne – do czasu, kiedy wynaleziony zostanie doskonały materiał podsadzkowy: lekki jak woda, twardy jak diament i tani jak piasek.

Poza nowoczesną i całkiem odmienną od klasycznej technologią wykonywania zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż niekonwencjonalnych, wielki postęp dokonał się także w dziedzinie technik przygotowania odwiertów do zabiegu – jedną z nich jest stosowanie nowoczesnego uzbrojenia odwiertu typu STMSS (*Single Trip Multi Stimulation System*) [2]. System ten wykorzystywany jest głównie do odwiertów poziomych, nieorurowanych, udostępniających złoża niekonwencjonalne wymagające

wielokrotnych zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Jest to rodzaj linera, zapinanego w ostatniej kolumnie rur okładzinowych pionowej części otworu. Zastosowanie takiego uzbrojenia pozwala na pominięcie operacji zapuszczania rur w odcinek poziomy, cementowania tych rur, perforacji oraz wykonywania operacji zapuszczania i zapinania pakerów do każdego z zabiegów. Dodatkowo,

po zapuszczeniu odpowiednio przygotowanego STMSS (z pakerami usytuowanymi do zabiegów w danym odwiercie), posadowieniu i zapięciu go w rurach oraz zapięciu pakerów zabiegowych, urządzenie wiertnicze może być przeniesione do innej lokalizacji. Wszystkie kolejne zabiegi hydraulicznego szczelinowania wykonuje się odpowiednio sterując przepływami w STMSS.

Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia związane ze stymulacją złóż niekonwencjonalnych typu *tight* i *shale*. Jak pokazano, złoża takie wymagają niekonwencjonalnego podejścia oraz niekonwencjonalnych technologii i technik stymulacji. Jako skrajnie niekonwencjonalne podejście do zabiegów hydraulicznego szczelinowania złóż tego typu można zacytować przykłady z rzeczywistych zabiegów: stymulując formację Codell w basenie Colorado stwierdzono, że najlepsze efekty szczelinowania hydraulicznego uzyskuje się wywołując odwiert po ok. 2 miesiącach od zabiegu! Często wykonuje się też tzw. „zabiegi hybrydowe”: po niewielkiej ilości padu rozpoczyna się tłoczenie podsadzki w etapach – naprzemiennie z etapami bez niej (*sweep stage*), które pomagają przetransportować zatłoczoną wcześniej podsadzkę dalej w szczelinę.

Podsumowując przedstawione zagadnienia związane z hydraulicznym szczelinowaniem złóż niekonwencjonalnych można sformułować następujące wnioski:

- szczelinowanie hydrauliczne za pomocą mało lepkiej cieczy roboczej na bazie wody jest skuteczną metodą stymulacji złóż niekonwencjonalnych,

- zabiegi te wymagają stosowania dużej ilości cieczy roboczej i podsadzki oraz dużej wydajności tłoczenia,
- technika tworzenia map mikrosejsmicznych jest podstawową metodą oceny geometrii systemu wytworzonych szczelin,
- zabiegi wykonywane w złożach niekonwencjonalnych przy użyciu mało lepkiej cieczy nie mogą być projektowane za pomocą symulatorów stosowanych do złóż i technik konwencjonalnych,
- sposób transportu i układania podsadzki w szczelinach w złożach niekonwencjonalnych jest zupełnie odmienny od przebiegu tych zjawisk podczas zabiegów konwencjonalnych,
- doskonalenie technologii stymulacji złóż niekonwencjonalnych wymusiło zastosowanie nowych, niekonwencjonalnych rodzajów materiałów podsadzkowych,
- doskonalenie techniki zabiegów w tego typu złożach przyczyniło się do powstania nowych metod i narzędzi wykorzystywanych podczas szczelinowania hydraulicznego.

Artykuł nadesłano do Redakcji 26.07.2011 r. Przyjęto do druku 4.08.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Contreras J.D., Dust D.G., Harris T., Watson D.R.: *High impact techniques and technology increase ultimate recovery in tight formation*. SPE 115081, 2008.
- [2] Cramer D.D.: *Stimulating unconventional reservoirs: lesson learned, successful practices, areas for improvement*. SPE 114172, 2008.
- [3] Paktinat J., Pinkhouse J.A., Johanson N., Williams C., Lash G.G., Penny G.S., Goff D.A.: *Case study: optimizing hydraulic fracturing performance in northeastern United States fractured shale formation*. SPE 104306, 2006.
- [4] Palish T.T., Vincent M.C., Handren P.J.: *Slickwater fracturing – food for thought*. SPE 115766, 2008.



Dr inż. Piotr KASZA – adiunkt w Instytucie Nafity i Gazu, kierownik Zakładu Stymulacji Wydobycia Węglowodorów. Absolwent i doktorant Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Autor wielu publikacji w kraju i za granicą. Członek Society of Petroleum Engineers. Specjalizuje się w zagadnieniach związanych ze stymulacją złóż węglowodorów.