

Piotr Kasza

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Zabiegi hydraulicznego szczelinowania w formacjach łupkowych

Wstęp

W ostatnich latach łupki gazonośne stały się obiektem intensywnych prac poszukiwawczych oraz eksploacyjnych. Nowoczesne rozwiązania techniczne i technologiczne umożliwiły efektywne, a przede wszystkim ekonomicznie opłacalne wydobycie gazu ziemnego zakumulowanego w tych formacjach skalnych. Łupki charakteryzują się bardzo dużą zmiennością; ich struktura zależy w dużej mierze od panujących warunków geologicznych i aktualnego stanu naprężeń w górotworze. Jak wiadomo, eksploatacja gazu z łupków jest możliwa jedynie po wykonaniu serii zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Lata doświadczeń w stymulacji łupków pozwoliły przetestować wiele rozwiązań technicznych i technologicznych. Wniosek z tych poczyniń jest jeden: nie ma jedynej skutecznej technologii szczelinowania takich formacji skalnych. Tysiące wykonanych zabiegów szczelinowania w łupkach umożliwiły doskonalenie tej technologii, co pozwoliło uzyskać znaczący postęp w efektywności wykonywanych stymulacji. Wzrost ten jest znaczący; początkowo prace pozwalały na wydobycie jedynie 2% gazu zgromadzonego w złożu (GIP), natomiast technologie stosowane obecnie pozwalają na uzyskanie szczytów ok. 50% GIP. Charakterystyczny dla eksploatacji gazu z łupków jest szybki spadek wydajności odwiertu w początkowej fazie eksploatacji – jest to związane z mechanizmami produkcji gazu ze złoża. W początkowej fazie gaz produkowany jest przede wszystkim z połączonych szczelin i mikroszczelin. Ten wolny gaz szybko się wyczerpuje i następuje proces desorpcji gazu z matrycy łupków.

Uruchomienie komercyjnej eksploatacji gazu z łupków wymagało znalezienia nowych rozwiązań technologicznych lub adaptacji już istniejących. Przede wszystkim wykorzystano do tego celu odwierty poziome. Nowością

w stymulacji łupków było wykorzystanie cieczy o niskiej lepkości (< 10 cP) – tzw. *slick water*. Sprawdzone rozwiązanie okazało się też wykonywanie bardzo wielu zabiegów szczelinowania z użyciem dużej ilości cieczy szczelinującej. Zastosowanie do szczelinowania wody z niewielką ilością polimeru oraz kilku innych dodatków okazało się o wiele bardziej efektywne niż tradycyjne technologie oparte na cieczach żelowanych czy pianach. Wykorzystanie *slick water* do szczelinowania ograniczyło też koszty cieczy, zwiększyło zasięg zabiegów, pozwoliło na otwarcie naturalnych szczelin i mikroszczelin oraz znacznie zwiększyło powierzchnię kontaktu złoża z odwiertem. Jednym z niewielu mankamentów tej cieczy są jej ograniczone możliwości transportowania materiału podszkawkowego.

Odwierty poziome przy udostępnianiu łupków zastąpiły odwierty pionowe. Obecnie długość poziomych odcinków dochodzi do 1600 m. Oś odwiertu poziomego jest projektowana w taki sposób, aby była prostopadła do kierunku propagacji szczelin. W celu lepszego udostępnienia złoża gazu w każdym z odwiertów poziomych wykonuje się 10÷20 zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Wytworzony w zabiegach system szczelin pozwala na uzyskanie większych wydajności z odwiertów i zwiększenie współczynnika szczytów złoża.

Dane ze złoża Marcellus dowodzą, że im bardziej zaawansowane udostępnienie złoża tym bardziej wzrasta ilość wydobytego gazu. W 2006 r. na tym złożu wykonywano średnie zabiegi o wielkości 8300 m³ cieczy i 418 ton propantu na zabieg, uzyskując współczynnik produkcji (IP) równy $5,7 \times 10^3$ m³/d. W roku 2009 średni zabieg na tym złożu wyniósł 13 000 m³ cieczy i 1800 ton propantu, a uzyskany współczynnik produkcji – $42,4 \times 10^3$ m³/d [8].

Udostępnianie złóż gazu w łupkach

Zastosowana w poszukiwaniach nowoczesna technika jest w stanie dostarczyć bardzo wielu informacji na temat potencjalnych struktur akumulacji węglowodorów. Ilość danych, jakimi dysponują inżynierowie w chwili obecnej jest ogromna i aby ocenić ich przydatność niezbędne jest duże doświadczenie. Przy udostępnianiu łupków dane złożowe podzielono na kategorie, uwzględniające stopień ważności informacji. Podział ten przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1. Kryterium ważności danych przy udostępnianiu złoża gazu w łupkach

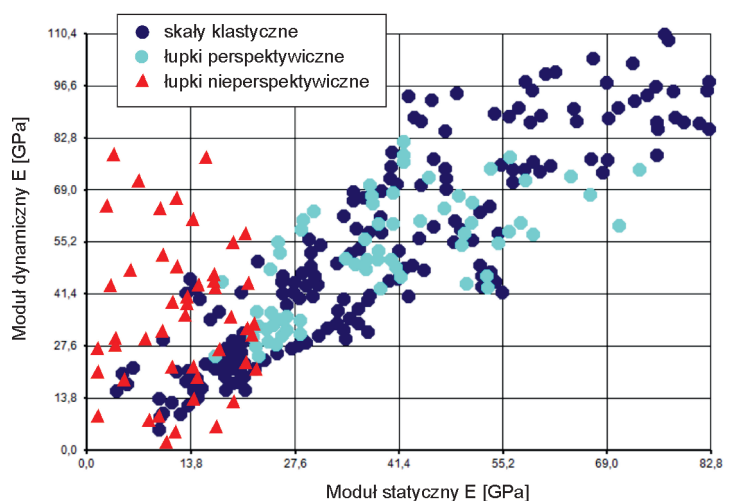
Ranga informacji o złożu			
Potrzebne	Ważne	Bardzo ważne	Krytyczne
Przepuszczalność matrycy	Rozkład naprężeń	Zawartość materiału organicznego	Diageneza
Zarządzanie wodą	Zagrożenia geologiczne	Obecna wydajność gazu	Mięszczość
Zaadsorbowany gaz	Wrażliwość na wodę	Głębokość	Ciśnienie
Bariery propagacji szczeliny	Typ kerogenu	Wolny gaz	Szczelinowatość naturalna
		Kruchość	Ilość gazu
		Skład mineralny	

Bezpośredni wpływ na potencjał wydobywczy odwiertu ma wielkość ciśnienia złożowego. Wyższe ciśnienie złożowe wpływa na wzrost ilości wolnego gazu w porach oraz wzrost ilości gazu zaadsorbowanego w materiale organicznym. Powoduje też ono, że gaz zaadsorbowany uruchamiany jest później. Jeżeli gaz w łupkach jest mniej dojrzały, istnieje możliwość występowania tam ciekłych węglowodorów. Ich obecność powoduje obniżenie przepuszczalności względnej oraz ograniczenie przepływu gazu. Dla efektywnego i skutecznego przeprowadzenia procesu hydraulicznego szczelinowania ważna jest mięszczość horyzontu produktywnego – im jest ona większa, tym większa jest ilość zakumulowanego gazu i większa swoboda w szczelinowaniu (kontaminacja szczeliny w horyzoncie produktywnym). Duże znaczenie i bezpośredni wpływ na przebieg procesu hydraulicznego szczelinowania w łupkach ma także aktualny stan naprężeń górotworu; to on determinuje i kontroluje proces inicjacji oraz propagacji szczeliny. Wykonanie szczeliny i wtłoczenie dużej ilości cieczy szczelinującej prowadzi do zmiany stanu naprężeń w złożu, co może mieć znaczący wpływ na zmianę kierunku propagacji kolejnej wykonywanej szczeliny. Taki efekt oddziaływania wykonanych wcześniej zabiegów szczelinowania potwierdzają pomiary mikrosejsmiczne.

Łupki z wysoką wartością modułu Younga i małą współczynnika Poissona (często ze zwiększoną zawarto-

ścią krzemionki) nazywa się kruchymi. Łupki te łatwo się szczelinuje. Powstałe mikroszczeliny – nawet niewypełnione podsadzką – pozostają otwarte, przez co szybciej uzyskuje się przepływ gazu. Łupki bardziej plastyczne wymagają szczelinowania ze znacznie lepszym wypełnieniem szczelin materiałem podsadzkowym. W wyniku wieloletnich doświadczeń wypracowano empiryczny model oceny „komercyjnej przydatności” na podstawie

pomiarów modułu Younga. Model ten opiera się na statycznych i dynamicznych pomiarach ww. modułu [8]. Pomiar dynamiczny (E_d) otrzymuje się z interpretacji pomiarów geofizycznych, wykonanych długą sondą akustyczną. Pomiary w warunkach statycznych (E_s) uzyskuje się podczas badań laboratoryjnych na rdzeniach naturalnych. Na wykresie funkcji $E_d = f(E_s)$ widoczna jest wyraźna, liniowa korelacja. Zaprezentowano ją na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ modułu Younga na perspektywiczność łupków

Łupki spełniające kryterium proporcjonalności modułów Younga przypominają charakterystyką skały klastyczne i są bardziej perspektywiczne w wydobyciu gazu.

Łupki niespełniające tego kryterium są zazwyczaj skałą o zwiększonej zawartości minerałów ilastych, co ogranicza ich potencjał wydobywczy.

Przepuszczalność łupków jest związana z obecnością naturalnych mikroszczelin i przepuszczalnością matrycy. W pierwszym etapie eksploatacji gazu główną rolę transportową odgrywają mikroszczeliny, natomiast przepuszczalność matrycy ma bezpośredni wpływ na charakter krzywej spadku wydobywania gazu oraz całkowite jego wydobywanie. Im mniejsza jest przepuszczalność matrycy tym większy zabieg szczelinowania jest potrzebny do uruchomienia produkcji. Naturalne mikroszczeliny – nawet jeżeli są zamknięte lub częściowo, a nawet całkowicie zmineralizowane – stanowią o wiele lepszą drogę dla migracji gazu niż sama matryca łupka. Szacuje się, że przepuszczalność tych szczelin jest dwu- trzykrotnie większa niż matrycy. Spowodowane jest to faktem, że w matrycy łupków o przepuszczalności rzędu nano darcy kanały i przewężenia porów mają tak niewielkie rozmiary, iż w krótkim czasie przepływ gazu w sposób „konwencjonalny” nie jest możliwy. Dlatego matryca o przepuszczalności przekraczającej 100 nD jest niewątpliwie bardziej pożądana przy eksploatacji łupków.

Badania mineralogiczne pozwalają zidentyfikować takie minerały jak: krzemionka, wapień, dolomit i minerały ilaste. Procentowa zawartość tych minerałów w łupkach decyduje o ich kruchości, a co za tym idzie – podatności na szczelinowanie. Jako perspektywiczne uznaje się te łupki, w których: zawartość minerałów ilastych jest mniejsza niż 40%, statyczny moduł Younga jest większy niż $3,5 \times 10^6$ psi (24 131 MPa) oraz stosunek dynamicznego do statycznego modułu Younga zbliża się do wartości charakterystycznych dla skał klastycznych.

Naturalna szczelinowatość jest charakterystyczna dla łupków. Sieć mikroszczelin, których rozwartość jest mniejsza niż 0,05 mm bywa jednak mało użyteczna w przewodzeniu węglowodorów – do momentu aż zostanie ona połączona ze szczeliną powstałą w wyniku szczelinowania hydraulicznego. Mikroszczeliny zamknięte oraz zmineralizowane stanowią bardzo słabe miejsca pod względem wytrzymałości mechanicznej. Jest to spowodowane tym, że wypełniający szczelinę kalcyt wzrasta na materiale nie węglanowym i między tymi materiałami nie występują siły związane z wiązaniami chemicznymi. Dlatego też do ich otwarcia potrzeba znacznie niższego ciśnienia niż do wywołania pęknięcia w jednolitym materiale skalnym. Literatura podaje [3], że na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych stwierdzono iż ciśnienie otwarcia istniejących mikroszczelin jest nawet do 50% niższe od

ciśnienia otwarcia szczelin na obszarach bez naturalnej mikroszczelinowatości.

Badając techniczne aspekty szczelinowania hydraulicznego łupków stwierdzono, że uruchomienie procesu otwierania mikroszczelin jest bardziej efektywne przy zwiększaniu wydajności tłoczenia cieczy szczelinującej małymi krokami, natomiast gdy szybkość tłoczenia zwiększa się w znaczący sposób, wówczas następuje uruchomienie propagacji głównej szczeliny w łupkach. Sposób propagacji głównej szczeliny zależy też od ilości i lepkości cieczy wyprzedzającej (padu). Mechanizm otwierania i tworzenia mikroszczelin jest zapewne bardziej skomplikowany niż przedstawiony powyżej. Jak pokazują pomiary mikrosejsmiczne, *tilt meter* i sejsmiki otworowej, w trakcie szczelinowania następuje jednoczesne otwieranie szczelin w wielu obszarach złoża, co spowodowane jest bezpośrednią filtracją cieczy zabiegowej z głównej szczeliny do mikroszczelin, z pominięciem filtracji w pory. W związku z tym ciśnienie cieczy zabiegowej bardzo szybko przekazywane jest do filtratu wypełniającego mikroszczeliny. Ponieważ w trakcie zabiegu jest ono wyższe od ciśnienia szczelinowania, powoduje dalsze pęknięcie skały poza obszarem mikroszczelin.

Przy wyborze odpowiedniego uzbrojenia odwiertu należy pamiętać, że odwierty udostępniające złoża niekonwencjonalne muszą uwzględniać konieczność wykonywania zabiegów stymulacyjnych, a co za tym idzie – konieczność tłoczenia cieczy zabiegowych z dużą wydajnością i przy wysokim ciśnieniu. Kolumna rur eksploatacyjnych ma zazwyczaj średnicę 4 ½ lub 5 ½ cala. W trakcie zabiegów szczelinowania łupków wydajność tłoczenia dochodzi do 16 m³/min, przy maksymalnej koncentracji materiału podsadzkowego na poziomie 360 kg/m³. Tak intensywny przepływ cieczy zabiegowej z podsadzką powoduje znaczące oddziaływanie abrazyjne na rury, które musi zostać uwzględnione.

Badania i doświadczenia potwierdziły (Barnett) [1], że wraz ze wzrostem ilości wykonanych szczelin wzrasta stopień skomplikowania ich sieci. Obserwacje te przyczyniły się do zwiększenia ilości zabiegów, przy jednoczesnym zmniejszeniu zasięgu szczeliny głównej. Jak podaje literatura [8], zasięg szczelinowania zmniejszono z 900 m do ok. 100 m, przy jednoczesnej odpowiedniej organizacji perforacji w klastry z zastosowaniem techniki *limited entry*. Perforacja w wyznaczonym do zabiegu interwale jest dzielona na klastry, czyli miejsca, w których nastąpi inicjacja szczeliny. W tym miejscu zwiększa się ilość otworów perforacyjnych w stosunku do reszty perforacji, co ułatwia inicjację szczeliny. W miejscach o mniejszej ilości otworów nie nastąpi propagacja szczeliny (straty

ciśnienia są zbyt duże do jej inicjacji), natomiast będzie wystarczający kontakt odwiertu ze złożem do odebrania napływających węglowodorów. Jak zwykle w przypadku odwiertów poziomych, w horyzontach o małej miąższości należy wykonać więcej zabiegów o ograniczonym zasięgu, natomiast w złożach o dużej miąższości można wykonać tych zabiegów mniej, zwiększając ich zasięg.

W przypadku wielu złóż gazu w łupkach stwierdzono występowanie efektu *tortuosity*. Jak potwierdziły badania mikrosejsmiczne, na ścianie odwiertu szczelina propaguje

w kierunku równoległym do osi otworu, po czym skręca i propaguje prostopadłe do jego osi – zawsze w sposób charakterystyczny do układu naprężeń w złożu. Takie kręcenie szczeliny jest korzystne, ponieważ zwiększa się przez to powierzchnia jej kontaktu z odwiertem. Zachowanie to jest częściowo wymuszane przez długość klastra, odpowiadającą nie więcej niż 4-krotnej średnicy otworu. W odległości ok. 2÷4 średnic od ścian otworu szczelina przechodzi do strefy oryginalnych naprężeń złożowych i propaguje zgodnie z nimi.

Punkty inicjacji szczeliny

Efekt ekonomiczny i produkcyjny złoża typu *shale* zależy w znacznej mierze od utworzenia możliwie największej powierzchni kontaktu matrycy skalnej z systemem szczelin. Idealne udostępnienie złoża łupkowego polega na utworzeniu w nim wielkiej ilości bloków, otoczonych systemem mikroszczelin, kontaktujących się z odwiertem poprzez szczeliny główne.

Jednym z najważniejszych elementów wpływających na tworzenie i propagację szczelin jest wydajność cieczy zabiegowej. Niskie wydajności tłoczenia, rzędu 2,4÷3,2 m³/min, prowadzą do otwarcia naturalnych szczelin i nie powodują utworzenia ich skomplikowanej struktury przestrzennej. Dane doświadczalne z wykonanych badań potwierdziły silną zależność ilości tworzonych szczelin i odległości między klastrami (punktami inicjacji szczelin); gdy odległości te były większe niż 30 cm, wówczas w danym klastrze powstawała jedna szczelina. Każda dodatkowa szczelina powoduje podzielenie strumienia płynu (*leak off*), przez co szczeliny te charakteryzują się bardzo małą rozwartością – często niewystarczająca do przyjęcia materiału podsadzkowego. W takich przypadkach niejednokrotnie dochodzi do niekontrolowanego wytrącenia podsadzki (*screen out*). Przytkanie szczeliny przez podsadzkę prowadzi do utrudnień w przepływie cieczy, wzrostu oporów i ciśnienia zabiegowego, a w efekcie – do przedwczesnego ukończenia zabiegu. W związku z tym

projektując miejsce inicjacji szczeliny perforacje należy organizować w klastrach odległych od siebie o 10÷30 metrów, przy jednoczesnym ograniczeniu długości klastra do 4-krotnej średnicy otworu. W typowym zabiegu szczelinowania hydraulicznego w łupkach, szczeliny wykonuje się w interwale 80÷100 metrów, zalecając gęstość perforacji w klastrze na poziomie 12÷18 strzałów/metr. Odległość pomiędzy klastrami ustala się na 10÷30 metrów, w związku z czym w interwale perforacji do jednego zabiegu należy wykonać 4÷7 klastrów. Rozmieszczenie klastrów perforacji może wynikać z prostego przeliczenia odległości lub może się opierać na rozpoznaniu naturalnej szczelinowości i/lub naprężeń.

Inicjacja szczelinowania polega na przekroczeniu granicy wytrzymałości skały (w początkowym momencie szczelinowania jest to najwyższe ciśnienie panujące w otworze). W przypadku szczelinowania łupków, często jako pierwszą, inicjującą szczelinę ciecz stosuje się 10÷15-procentowy roztwór kwasu solnego z dodatkami. Użycie kwasu pozwala na rozpuszczenie resztek cementu przy otworach perforacyjnych, co zmniejsza wartość ciśnienia niezbędnego do inicjacji szczeliny. W przypadku łupków o znacznej zawartości cementów kalcytowych, kwas solny należy stosować bardzo ostrożnie. Zbyt duża ilość kalcytu w łupkach może prowadzić do wtórnego ich wytrącania się z kwasu oraz problemów z kolmatacją mikroszczelin.

Ciecze do hydraulicznego szczelinowania

Najczęściej stosowaną cieczą technologiczną do szczelinowania formacji łupkowych jest tzw. *slick water*. Jest to woda z niewielką ilością dodatku polimeru naturalnego (np. guar). Ciecz ta charakteryzuje się bardzo niską lepkością, zatem jej możliwości transportowania materiału podsadzkowego do szczeliny są bardzo ograniczone. *Slick water* nie jest idealną cieczą do wszystkich zabiegów szczelino-

wania w łupkach. Czasami do zabiegów tych wykorzystuje się również żełe polimerowe, żełe polimerowe sieciowane i płyny wielofazowe. Możliwe jest także stosowanie różnych cieczy w trakcie jednego zabiegu – mówi się wówczas o tzw. zabiegu hybrydowym. Dobór odpowiedniej cieczy do zabiegu szczelinowania sprowadza się do zapewnienia transportu materiału podsadzkowego na odpowiednim po-

ziomie oraz wytworzenia przestrzennej struktury szczelin i mikroszczelin, połączonych z odwiertem.

Użycie *slick water* powoduje inicjację szczeliny, otwarcie mikropęknięć i naturalnych szczelin oraz utworzenie znacznej powierzchni kontaktu odwiertu ze złożem; jednak nie pozwala na stosowanie wysokich koncentracji podsadzki, a dodatkowo materiał ten szybko w tej cieczy opada. W formacjach łupkowych charakteryzujących się wysokim modułem Younga i niewielkim naprężeniem, nawet szczelina niewypełniona materiałem podsadzkowym może być efektywna w transporcie gazu. Na przestrzeni lat do hydraulicznego szczelinowania łupków wykorzystano – z różnym powodzeniem – także inne ciecze zabiegowe, m.in.: azot, żelowany ciekły gaz, azot kriogeniczny, ciekły dwutlenek węgla oraz ciekły gaz ziemny.

Ciecz do hydraulicznego szczelinowania zawiera w swoim składzie 99,5% wody, do której dodaje się polimer zmniejszający opory przepływu, w ilości $0,01 \pm 0,1\%$. Niezbędny jest też dodatek biocydu (w ilości ok. $0,01 \pm 0,05\%$), w celu ochrony bakteriologicznej. Do cieczy tej czasami dodaje się również: reduktor tlenu, środki zabezpieczające przed tworzeniem osadów nieorganicznych oraz środki ułatwiające odbiór cieczy pozabiegowej z systemu szczelin (są to zazwyczaj odpowiednio przygotowane mieszaniny środków powierzchniowo-czynnych, rozpuszczalników i alkoholi – ich dodatek do cieczy szczelinującej to ok. $0,01\%$). Przykładową cieczą zabiegową do szczelinowania łupków pokazano na fotografii 1.

Ciecz szczelinująca *slick water* była stosowana w wielu typach złóż, jednak szczególnie użyteczna okazała się w przypadku złóż łupkowych. Jest to spowodowane wieloma czynnikami: przede wszystkim łupki składają się z bardzo wielu laminy i mikroszczelin; mała lepkość cieczy umożliwia jej penetrację pomiędzy laminy i w mikroszczeliny, a wysokie ciśnienie powoduje ich rozwarstwienie i poszerzenie – co ma niebagatelne znaczenie w przepływie gazu. Ponadto użycie dużych ilości cieczy zabiegowej powoduje zwiększenie powierzchni kontaktu. Jak już

wspomniano wcześniej, w łupkach charakteryzujących się wysoką kruchością słabe własności transportowe materiału podsadzkowego nie wpływają w znacznym stopniu na obniżenie efektywności zabiegu.



Fot. 1. Ciecz zabiegowa do szczelinowania łupków

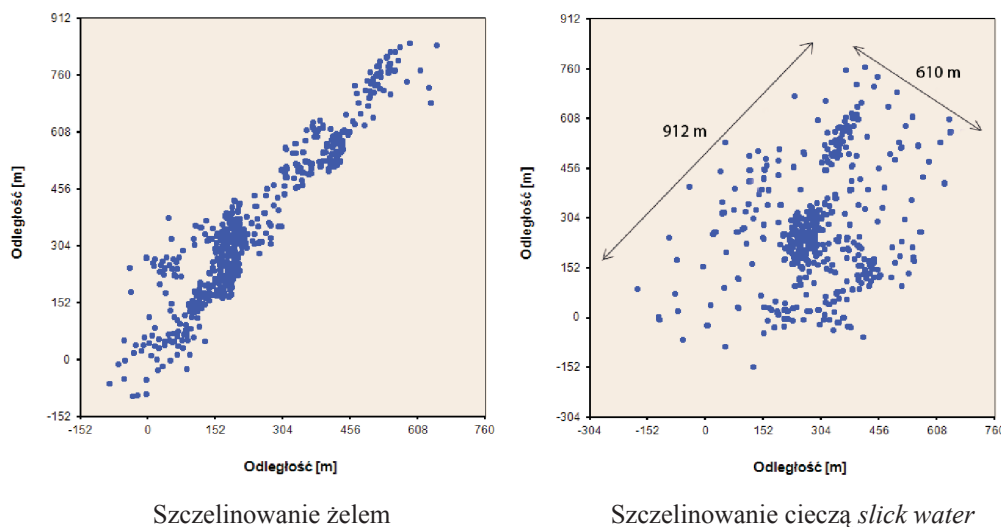
Dobierając cieczą zabiegową do hydraulicznego szczelinowania łupków należy się kierować przede wszystkim właściwościami skały złożowej. Wybór pomiędzy cieczą *slick water* a żelem jest podyktowany kontrolą filtracji i niezbędną przewodnością powstałej szczeliny/szczelin. Obecność minerałów ilastych może wymusić konieczność zastosowania odpowiednich inhibitorów. W przypadku łupków kruchych, o niewielkiej zawartości minerałów ilastych, stosowanie cieczy *slick water* jest naturalnym wyborem. Ciecze na bazie żeli są stosowane w przypadku skał bardziej plastycznych i o większej przepuszczalności, bowiem w tych formacjach niezbędne jest utworzenie szczelin o większej przewodności, czyli lepiej wypełnionych materiałem podsadzkowym.

Ostatnią partię tłoczonej cieczy zabiegowej stanowi przybitka; jest to również cieczą *slick water*, lecz bez materiału podsadzkowego. Jej zadaniem jest wtłoczenie całości podsadzki z rur do szczelin. Zazwyczaj objętość przybitki jest niewiele większa ($2 \div 3 \text{ m}^3$) od pojemności rur. W trakcie zatłaczania przybitki należy zachować tę samą wydajność pompowania.

Geometria szczelin

Obecnie ogromną uwagę skupia się na analizie danych z zabiegu, w celu określenia 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 interpretacji geometrii wy-

tworzonego systemu szczelin. Jak pokazują doświadczenia z takich analiz, wytworzony system szczelin jest w pełni trójwymiarowy. Takie pojęcie „szczeliny” w złożach typu *shale* spowodowało konieczność wprowadzenia nowego parametru, niestosowanego przy opisie szczelin wykonywanych metodą klasyczną w złożach konwencjonalnych. Parametr ten określa objętość złoża objętą procesem stymulacji i oznacza się go jako SRV (*Stimulation Reservoir Volume*).



Rys. 2. Porównanie zasięgu zabiegu szczelinowania w łupkach przy wykorzystaniu różnych technologii

Badania mikrosejsmiczne prowadzone podczas szczelinowania złóż gazu z łupków potwierdziły, że przy zastosowaniu technologii *slick water* SRV wynosił ok. 40 mln m³, podczas gdy stosując technologię żelowanego polimeru (w tych samych złóżach) osiągał wartość ok. 12 mln m³. Obserwacje te potwierdziły również wyniki uzyskanego wydobywania po wykonanych zabiegach: w odwiertach szczelinowanych cieczą *slick water* wydobywanie to było ponad dwukrotnie większe niż w przypadku szczelinowania żelem. Pokazane na rysunku 2 przykładowe mapy mikrosejsmiczne obrazują różnice pomiędzy zabiegami wykonanymi w technologii *gel* oraz *slick water*, w formacjach łupkowych.

Jak już wspomniano wcześniej, celem hydraulicznego szczelinowania jest utworzenie w złożu skomplikowanej struktury przestrzennej szczelin. Na rysunku 3 przedstawiono przykłady ich stopnia skomplikowania.



Rys. 3. Przykłady stopnia skomplikowania szczelin

Materiały podsadzkowe

Materiał podsadzkowy służy do wypełniania szczelin generowanych w trakcie procesu szczelinowania hydraulicznego. Szczeliny wytwarzane podczas szczelinowania łupków charakteryzują się niewielką rozwartością, w związku z czym materiał podsadzkowy używany do ich wypełniania musi mieć mniejszą średnicę ziaren niż w przypadku szczelinowania w złożach konwencjonalnych. Najczęściej stosowaną podsadzką w szczelinowaniu łupków jest piasek kwarcowy, o różnej granulacji – zazwyczaj jest to: 100 mesh, 40/70 mesh, 30/50 mesh oraz (bardzo rzadko) 20/40 mesh.

Podczas zabiegu szczelinowania materiał podsadzkowy dodaje się do cieczy szczelinującej etapami – w każdym z nich zwiększając koncentrację podsadzki. Rozwartość i ilość naturalnych szczelin w strefie przyodwiertowej jest kluczowa w zapobieganiu wytrącania podsadzki. Rozwartość szczelin zależy od: wydajności tłoczenia, lepkości

cieczy szczelinującej, kruchości materiału skalnego, panujących w złożu naprężeń oraz występowania nieciągłości tektonicznych.

Typowa koncentracja podsadzki w pierwszym etapie tłoczenia (po zatłoczeniu padu) wynosi ok. 20÷40 kg/m³. W kolejnych etapach pompowania, po ustabilizowaniu się ciśnienia, jej koncentrację zwiększa się w krokach o 40 kg/m³. Maksymalna koncentracja podsadzki w cieczy szczelinującej typu *slick water* jest zależna od jej granulacji. Na podstawie doświadczeń można stwierdzić, że dla najmniejszej stosowanej granulacji (100 mesh) limitem jest koncentracja 300 kg/m³, a dla podsadzki 40/70 mesh limit ten wynosi 240 kg/m³.

W trakcie tłoczenia materiału podsadzkowego w celu wypełnienia szczelin czasami zachodzi konieczność wykonania zabiegu kontroli filtracji. Wówczas w trakcie wykonywania tłoczenia dodatkowo zwiększa się kon-

centrację podsadzki (ponad wartość określoną w projekcie) o $60 \div 180 \text{ kg/m}^3$. Zazwyczaj wystarczy zatłoczenie $16 \div 24 \text{ m}^3$ cieczy ze zwiększoną koncentracją (tzw. *slag*). Po zatłoczeniu tej zwiększonej porcji podsadzki powraca się do realizacji schematu pompowania. Efekt zadziałania dodatkowej ilości podsadzki w powstrzymaniu filtracji

jest widoczny po przejściu tego dodatkowego materiału podsadzkowego przez perforację.

Przeciętny zabieg szczelinowania w odwiercie poziomym udostępniającym złożę gazu zlokalizowane w łupkach wymaga użycia ok. $1300 \div 2400 \text{ m}^3$ cieczy szczelinującej oraz $36 \div 140$ ton materiału podsadzkowego.

Projektowanie szczelinowania

Celem projektowania procesu szczelinowania hydraulicznego jest uzyskanie w wyniku szczelinowania najlepszego kontaktu hydraulicznego odwiertu ze złożem. Jedną z kluczowych decyzji w tym procesie jest umiejscowienie klastrów perforacji, z uwzględnieniem warunków złożowych. Odległość między klastrami perforacji powinna uwzględniać minimalne oddziaływanie na pole naprężeń sąsiadujących szczelin, a jednocześnie umożliwiać powstawanie rozbudowanej struktury szczelin. Projektując szczelinowanie należy określić: sposób wytworzenia szczelin o optymalnej długości, uruchomienie propagacji zapewniającej powstanie sieci przestrzennej szczelin oraz otwarcie naturalnych mikroszczelin. Bezpośredni wpływ na geometrię szczelin ma: optymalny dobór wydajności i ilości podsadzki w poszczególnych etapach szczelinowania, miąższość złoża i jego kruchość, a także określenie granic propagacji szczelin oraz obecność, położenie i gęstość szczelin oraz naturalnych mikroszczelin.

Na podstawie informacji zebranych podczas zabiegów szczelinowania można wnioskować, że zazwyczaj szczeliny propagują w kierunku zgodnym z kierunkiem szczelin i mikroszczelin naturalnych. Kierunek ten może ulegać zmianie w przypadku wystąpienia lokalnych zaburzeń w naprężeniach, spowodowanych oporami przepływu i wewnętrzną dywersyfikacją propagacji szczeliny. Kierunek propagacji szczeliny może się zmieniać i powracać do pierwotnej postaci wielokrotnie. Doświadczenia z prowadzenia pomiarów mikrosejsmicznych w trakcie zabiegów szczelinowania wskazują, że wydajność mniejsza od $2,4 \text{ m}^3/\text{min}$ nie generuje wielu sygnałów akustycznych.

Im więcej otwieranych mikroszczelin tym wyższa powinna być wydajność w celu utrzymania tempa rozwoju szczeliny. W trakcie zabiegu strumień cieczy szczelinującej jest rozdzielany na poszczególne klastry perforacji oraz system szczelin. Powoduje to zmniejszenie szybkości przepływu cieczy zabiegowej z podsadzką, co może prowadzić do wystąpienia zjawisk *screen out* w wielu punktach, a to z kolei – do powolnego i stałego lub intensywnego wzrostu ciśnienia zabiegowego (*net*). Sposób wzrostu ciśnienia świadczy o ilości lokalnych zjawisk *screen out*; im ilość tych zjawisk jest większa, tym wzrost ciśnienia jest bardziej zauważalny. Jeżeli w lokalnym obszarze *screen out* znajdują się dobrze zorientowane (zgodne z kierunkiem propagacji), zamknięte szczeliny i mikroszczeliny, mogą one stanowić rodzaj zaworu bezpieczeństwa dla zwiększającego się ciśnienia.

Badając dynamikę procesu propagacji szczeliny w łupkach stwierdzono, że zbyt szybkie zwiększanie początkowej wydajności tłoczenia może prowadzić do wyjścia szczeliny poza strefę łupków (zwłaszcza w łupkach o niewielkiej miąższości), natomiast powolne zmiany wydajności mogą ułatwić utrzymanie szczeliny w horyzoncie produktywnym. Doświadczenie ze złoża Barnett wskazuje, że zwiększanie wydajności tłoczenia w kolejnych etapach szczelinowania o $0,8 \div 1,6 \text{ m}^3/\text{min}$ pozwala utrzymać propagację szczeliny w obrębie złoża. Badania te potwierdziły również, że mniejsza wydajność powoduje otwieranie istniejących szczelin i mikroszczelin, natomiast wyższa – otwieranie nowych szczelin. Obserwacja ta wskazuje metodę kreowania geometrii szczeliny.

Ciśnienie podczas szczelinowania

Jednym z ważniejszych parametrów podczas zabiegu szczelinowania jest ciśnienie p_{net} – jest to różnica pomiędzy dennym ciśnieniem dynamicznym w trakcie zabiegu a ciśnieniem zamknięcia szczeliny. Proces szczelinowania jest często opisywany w odniesieniu do ciśnienia p_{net} ; jego wzrost w trakcie szczelinowania łupków zazwyczaj świadczy o powstawaniu szczeliny o skomplikowanej geometrii.

Na podstawie analizy wykonanych zabiegów szczelinowania w łupkach stwierdzono, że wzrost ciśnienia p_{net} w trakcie zabiegu o $48 \div 70$ bar jest wynikiem utworzenia przestrzennej struktury szczeliny. Jak podaje literatura [8], w przypadku złoża Barnett wzrost ciśnienia p_{net} w trakcie szczelinowania w tempie $0,07 \div 0,3$ bar na minutę świadczy o powstawaniu skomplikowanej szczeliny, natomiast jego

wzrost w tempie 1÷2 bar na minutę dowodzi potencjalnego zagrożenia zjawiskiem *screen out* lub zagrożeniem przebiccia szczeliny do innych warstw.

Analizując ciśnienia szczelinowania doświadczony inżynier zabiegowy jest w stanie odczytać bardzo wiele informacji na temat przebiegu procesu szczelinowania. Oczywiście w trakcie zabiegu prowadzony jest pełny monitoring i zapis jego parametrów. Hydrauliczne szczelinowanie jest procesem dynamicznym i niezwykle cenna jest możliwość interpretacji napływających danych w czasie rzeczywistym, co pozwala

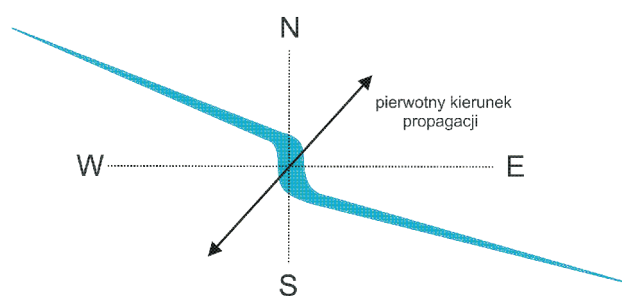
rozwiązywać ewentualne problemy przed ich zaistnieniem. W tak skomplikowanych procesach zaleca się instalowanie ciśnieniomierzy wgłębnych, bowiem napływające z nich dane odzwierciedlają rzeczywiste ciśnienie na wejściu cieczy zabiegowej do szczeliny. W praktyce zabiegowej często stosuje się jednak ciśnieniomierze powierzchniowe, lecz ich odczyty są sumą ciśnienia na spodzie odwiertu, oporów na perforacji oraz oporów przepływu w rurach i urządzeniach napowierzchniowych – co nie jest korzystne w interpretacji ciśnienia szczelinowania na spodzie odwiertu.

Szczelinowania łączone i powtórne

Jedną ze stosowanych technik szczelinowania odwiertów poziomych udostępniających złoża gazu w łupkach jest jednoczesne szczelinowanie w kilku sąsiadujących odwiertach – w trakcie takiego zabiegu naprężenia spowodowane inicjacją i propagacją szczeliny powodują oddziaływanie na szczelinowany horyzont w sąsiednim odwiercie. To wzajemne oddziaływanie naprężeń prowadzi do tworzenia w złożu skomplikowanej struktury szczelin i mikroszczelin. Doświadczenia przeprowadzone na złożu Barnett wykazały, że podczas jednoczesnego szczelinowania pięciu odwiertów uzyskano około 54-procentowy wzrost wydobywanych zasobów (gazu ziemnego), w porównaniu do tradycyjnego szczelinowania w pojedynczym odwiercie. Na podstawie tych eksperymentów stwierdzono, że odległość pomiędzy odwiertami poziomymi nie powinna być większa niż 300 m. Realizacja takiego przedsięwzięcia wymaga przede wszystkim bardzo dużej ilości zgromadzonego sprzętu, materiałów, wody oraz doskonałej koordynacji działań serwisów stymulacyjnych. Na podstawie danych eksploatacyjnych stwierdzono, że w wyniku wykonania jednoczesnego zabiegu w dwóch odwiertach ich wydajność wzrosła o ok. 30%, natomiast przy jednoczesnym wykonaniu szczelinowania w trzech odwiertach wydajność ich wzrosła o ponad 30%. Podobne efekty uzyskano przy eksperymencie polegającym na szczelinowaniu sąsiadujących odwiertów na tzw. „zakładkę” (tzn. po wykonaniu szczelinowania w jednym odwiercie zamykano go – utrzymując wysokie ciśnienie, a następnie rozpoczynano zabieg w sąsiednim odwiercie itd.).

W przypadku złóż łupkowych wykonanie ponownego szczelinowania (po pewnym okresie eksploatacji otworu) jest działaniem bardzo pożądanym, bowiem daje znacznie lepsze rezultaty niż w przypadku złóż konwencjonalnych. Szczególnie dobry efekt osiągnięto po szczelinowaniu łupków, w których wcześniej wykonano szczelinowanie „tradycyjne” (czyli przy użyciu cieczy zabiegowej na

bazie żelu polimerowego). Znacznie większa efektywność szczelinowania przy użyciu cieczy *slick water* jest z pewnością spowodowana mniejszym uszkodzeniem szczelin i mikroszczelin przez pozostałości polimeru oraz znacznie bardziej rozbudowanym systemem szczelin. Wykonanie powtórnego szczelinowania cieczą *slick water* w łupkach po zabiegu z użyciem żelu powoduje jej przejście przez strefy uszkodzone żelem polimerowym oraz otwarcie tych szczelin i mikroszczelin, które nie zostały uruchomione w trakcie pierwszego szczelinowania, a w efekcie – zapewnia uzyskanie znacznie lepszej penetracji złoża. Badając zjawiska związane z ponownym szczelinowaniem łupków stwierdzono bardzo ciekawą zależność: podczas wykonywania drugiego zabiegu szczelinowania następuje reorientacja kierunku propagacji głównej szczeliny (rysunek 4).



Rys. 4. Zmiana kierunku propagacji szczeliny podczas powtórnego szczelinowania

Kierunek propagacji szczeliny podczas drugiego szczelinowania jest prostopadły do kierunku uzyskanego podczas pierwszego zabiegu. Takie zachowanie szczeliny umożliwia procesem szczelinowania strefy złoża nieobjętej tym procesem pierwotnie. Zachowanie to jest niezgodne z klasyczną teorią szczelinowania złóż konwencjonalnych, jednak w przypadku łupków umożliwia penetrację obszarów o znacznie mniejszym współczynniku szczypania. Po-

twierdzą to również dane z odwiertów eksploatacyjnych, w których pierwszy zabieg wykonywano z użyciem cieczy

na bazie żelu polimerowego, a do ponownego szczelinowania użyto cieczy zabiegowej *slick water*.

Oczyszczanie szczelin i złożeń po zabiegu

Po zakończeniu zabiegu szczelinowania i zamknięciu szczelin przystępuje się do usuwania cieczy pozabiegowej ze szczelin i z matrycy. Gdy podczas zabiegu powstają szczeliny duże, o wysokiej przewodności, wówczas proces odbioru tej cieczy przebiega stosunkowo szybko. Dodatkowa ilość odebranej cieczy pozabiegowej po wykonaniu szczelinowania jest dość duża w porównaniu do ilości cieczy zatłoczonej – taki proces oczyszczania szczelin jest charakterystyczny dla złóż konwencjonalnych.

W złożach gazu ziemnego w łupkach podczas procesu szczelinowania powstaje skomplikowany system szczelin i mikroszczelin, i usunięcie z niego cieczy pozabiegowej jest o wiele wolniejsze (w niektórych przypadkach trwa wiele tygodni). Dodatkowo ilość odebranej cieczy jest niższa niż w przypadku konwencjonalnych złóż i zabiegów. Według przeprowadzonych szacunków, ilość odebranej cieczy stanowi 10÷50% całkowitej ilości cieczy zatłoczonych. Prowadząc proces oczyszczania odwiertu po szczelinowaniu w łupkach niejednokrotnie kontroluje się przeciwnie, by nie usuwać cieczy pozabiegowej zbyt dynamicznie. Takie postępowanie ma niebagatelne znaczenie w zachowaniu pierwotnej energii złożowej, a dodatkowo sprzyja efektywniejszemu oczyszczaniu systemu szczelin.

Główną przyczyną powolnego oczyszczania odwiertu jest obecność dużej ilości mikroszczelin. Podczas usuwania z nich cieczy pozabiegowej ważną rolę odgrywają zjawiska przepuszczalności względnej i zwilżania oraz krętość i skomplikowany przebieg dróg filtracji cieczy. Zjawiska te w znacznym stopniu opóźniają proces usuwania cieczy po wykonanym szczelinowaniu. Jak już wspomniano wcześniej, do określenia efektywności i zasięgu szczelinowania stosuje się współczynnik SRV (*Stimulated Reservoir Volume*), który określa objętość złoża objętego stymulacją. Uwzględniając niepełne oczyszczenie złoża i systemu szczelin z cieczy pozabiegowej wprowadzono inny współczynnik – FRV (*Failed Reservoir Volume*), określający objętość złoża, która została „stracona” dla eksploatacji w wyniku słabego oczyszczenia.

Po zabiegu szczelinowania, w złożu istnieje system szczelin oraz matryca. Przepuszczalność systemu szczelin i mikroszczelin jest zawsze znacznie większa od przepuszczalności matrycy. Oczyszczenie szczelin i mikroszczelin może nastąpić stosunkowo szybko, natomiast usunięcie

wody z matrycy jest bardzo trudne, przyczyną czego jest głównie bardzo wysokie ciśnienie kapilarne. Dla przykładu, w złożu Barnett przy przepuszczalności matrycy rzędu 0,001÷0,002 mD ciśnienie kapilarne wynosi 100÷200 bar! Takie ciśnienie jest potrzebne, aby wyprzeć wodę z matrycy przez szczelinę do odwiertu.

Wysoka wartość ciśnienia kapilarnego była przyczyną podjęcia zaawansowanych prac badawczych nad specjalistycznymi dodatkami powodującymi jego obniżenie. Jednym z opatentowanych wynalazków w tym zakresie jest mikroemulsja; jej dodatek do *slick water* powoduje obniżenie napięcia powierzchniowego dla cieczy pozabiegowej do wartości ok. 20 bar.

Do zabiegów hydraulicznego szczelinowania zużywa się bardzo dużą ilość wody – jej pozyskiwanie oraz odbiór po zabiegach, a także oczyszczanie, recykling i utylizacja należą do ważniejszych przedsięwzięć w procesie stymulacji. Zarządzanie tymi procesami musi odbywać się zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa oraz z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych.

Organizacja odbioru i postępowania z cieczą pozabiegową wymaga przede wszystkim podjęcia decyzji o sposobie jej zagospodarowania. Możliwe są różne rozwiązania, m.in.: magazynowanie wody i jej recykling na miejscu, wywożenie i recykling poza obszarem działalności górniczej itp. Niebagatelny wpływ na ten proces będzie miał skład odbieranej cieczy; będzie się on różnił od składu cieczy zatłaczanej i będzie się zmieniał w czasie. Ponowne użycie wody z recyklingu jest ograniczone ze względu na stosowane dodatki – woda z recyklingu musi gwarantować 100-procentową skuteczność i kompatybilność ich działania.

Kilka lat temu głównym ograniczeniem w stosowaniu wody z recyklingu była wysoka zawartość jonów soli – nie mogła ona przekroczyć wartości 30 000 ppm. W chwili obecnej, dodatki nowej generacji do cieczy zabiegowej *slick water* tolerują zasolenie na poziomie 75 000 ppm, a w przypadku przekroczenia tego poziomu ciecz tą rozrzedza się wodą słodką. Podczas recyklingu wody do zabiegów szczelinowania bardzo ważną jest również kontrola bakteriologiczna.

Zazwyczaj oczyszczanie wody pozabiegowej obejmuje: usunięcie zawiesin, gazu, ciekłych węglowodorów, H₂S i CO₂ oraz obróbkę przeciwbakteryjną. W procesach tych

wykorzystuje się metody chemiczne, takie jak: krystalizację, odparowanie, filtrację na membranach selektywnych, flokulację, odwróconą osmozę i wiele innych.

Zabiegi hydraulicznego szczelinowania nie niosą ze sobą ryzyka skażenia wód powierzchniowych – dla złóż łupków gazonośnych zalegających na głębokościach więk-

szych niż 150 metrów od warstw wodonośnych ryzyko to jest zerowe. A ponieważ warstwy wodonośne zalegają nie głębiej niż 400 m pod powierzchnią terenu, zatem wykonywanie zabiegów hydraulicznego szczelinowania w łupkach na głębokościach przekraczających 550 metrów jest pod tym względem całkowicie bezpieczne.

Artykuł nadesłano do Redakcji 8.11.2011 r. Przyjęto do druku 15.11.2011 r.

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

Literatura

- [1] Cioppola C.L., Lolon E.P., Dzubin B.: *Evaluating stimulation effectiveness in unconventional gas reservoirs*. SPE 124843, 2009.
- [2] Cioppola C.L., Warpinski N.R., Mayerhofer M.J., Lolon E.P., Vincent M.C.: *The relationship between fracture complexity, reservoir treatment and fracture treatment design*. SPE 115769, 2008.
- [3] Gale J., Holder J.: *Natural fractures in shale and their importance to gas production*. Tectonics studies group annual meeting, 2008.
- [4] Holditch S.A., Tschirhart N.R.: *Optimal stimulation treatment in tight sands*. SPE 96104, 2005.
- [5] Kasza P., Miezyn S.: *Pomiar współczynnika filtracji cieczy szczelinujących w warunkach hydrodynamicznych dla potrzeb projektowania zabiegów hydraulicznego szczelinowania*. Praca dla PGNiG S.A, czerwiec 2002.
- [6] Kasza P.: *Hydroprzewodność i przepuszczalność szczelin wypełnionych materiałem podsadzkowym stosowanym do hydraulicznego szczelinowania w świetle badań laboratoryjnych*. Praca doktorska, 2001.
- [7] Kasza P.: *Wpływ długotrwałych obciążeń na przewodność materiałów podsadzkowych stosowanych do hydraulicznego szczelinowania*. Praca statutowa INiG, 1999.
- [8] King G.E.: *Thirty years of gas shale fracturing: what we have learned*. SPE 133456, 2010.



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.

ZAKŁAD STYMULACJI WYDOBYCIA WĘGLOWODORÓW

- przygotowywanie receptur i badania płynów zabiegowych do stymulacji wydobycia ropy i gazu;
- symulacje przepływów i badania reologiczne w skali półtechnicznej;
- badania materiałów podsadzkowych;
- badania przewodności szczeliny w zależności od użytego materiału podsadzkowego i płynu zabiegowego;
- symulacje usuwania uszkodzenia strefy przyodwiertowej;
- oznaczanie współczynnika przepuszczalności i porowatości skał, kamienia cementowego, betonu itp.;
- dobór środków regulujących właściwości reologiczne płynów (SPCz, polimery itp.);
- badania szybkości reakcji skał złożowych z cieczami kwasującymi;
- laboratoryjne symulacje zabiegów kwasowania w warunkach złożowych;
- wykonywanie projektów technologicznych zabiegów stymulacji;
- analiza testów miniszczelinowania i analiza pozabiegowa;
- laboratoryjne symulacje metod wspomagających wydobycie węglowodorów;
- badania zjawisk korozyjnych występujących w górnictwie naftowym;
- dobór ochrony inhibitorowej zapobiegającej zjawiskom korozyjnym.

Kierownik: dr inż. Piotr Kasza

Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno

Telefon: 13 436-89-41 w. 229

Faks: 13 436-79-71

E- mail: piotr.kasza@inig.pl

