

Piotr Kasza

Institut Nafty i Gazu

Efektywne szczelinowanie łupków w Polsce

W miarę szczypania zasobów węglowodorów w złożach konwencjonalnych coraz większe znaczenie zaczynają odgrywać zasoby niekonwencjonalne. Najbardziej intensywne prace prowadzone są w strukturach łupkowych syluru i ordowiku akumulujących gaz ziemny. Udostępnianie i eksploatacja nowych rodzajów złóż niesie za sobą konieczność stosowania nowatorskich rozwiązań technologicznych. W przypadku złóż gazu w łupkach postęp i rozwój dedykowanych technologii pozwoli znacząco zwiększyć współczynnik szczypania zasobów gazu z tych złóż. Największe zmiany technologiczne, w porównaniu do złóż konwencjonalnych, nastąpiły w obszarze udostępniania złoża. Rozpoczęto stosowanie na dużą skalę techniki udostępniania złóż odwiertami poziomymi. W każdym z nich wykonuje się kilkanaście zabiegów hydraulicznego szczelinowania przy zastosowaniu nowatorskiej technologii i użyciu znacznych ilości cieczy zabiegowej oraz materiału podsadzkowego. W artykule omówiono kluczowe aspekty związane z efektywnym udostępnianiem formacji łupkowej. Zaliczono do nich zaprojektowanie trajektorii, konstrukcji i uzbrojenia odwiertu oraz sposób udostępnienia złoża, a przede wszystkim – właściwe wykonanie efektywnych zabiegów szczelinowania. Bardzo istotne jest też określenie podatności skały łupkowej na proces szczelinowania. Od niej zależy możliwość stosowanych technologii i geometria generowanych szczelin. W artykule podano także wstępne wnioski z wykonanych zabiegów szczelinowania łupków w Polsce. Wyniki tych prac potwierdzają, że „amerykańska” technologia szczelinowania polskich łupków musi zostać zmodyfikowana, by stała się efektywna. Bardziej szczegółowe wnioski z wykonanych zabiegów powinny być przygotowane przez interdyscyplinarne zespoły specjalistów.

Słowa kluczowe: zabiegi stymulacji wydobywania, hydrauliczne szczelinowanie, gazonośne formacje łupkowe, podatność skały łupkowej na szczelinowanie.

Effective fracturing of shales in Poland

As the hydrocarbon resources in conventional reservoirs depletes the increasing role of unconventional resources become more significant. The most intensive work is being carried out in the shale structures with gas accumulation. Completion and production of a new type of reservoir requires new technological solutions. In the case of shale gas deposits, the progress and development of dedicated technologies will significantly increase the efficiency and rate of production from shale gas resources. The biggest technological changes in comparison to conventional deposits occurred in the area of reservoir completion. Drilling of horizontal wells has become standard practice in shale formation. Several hydraulic fracturing treatments of horizontal wells have been performed using innovative technology and a large amount of fluid and proppant during the treatment. This paper discusses the key aspects of an effective completion of shale formation including the well trajectory design, design and the completion of the well, in order to make the most effective execution of hydraulic fracturing. It is important also to determine fracability of reservoir rock. It depends on the possibility of the technologies used and the geometry generated fractures. The paper presents preliminary conclusions based on performed shale fracturing treatments in Poland. The results of this work confirm that the „american” polish shale fracturing technology must be modified in order to be more effective. More detailed conclusions from the treatments analysis should be prepared by a multi-disciplinary teams of professionals.

Key words: reservoir stimulation, hydraulic fracturing, shale gas, slick water.

Wstęp

W ostatnich latach łupki gazonośne stały się na świecie obiektem intensywnych prac poszukiwawczych i eksploatacyjnych. Nowoczesne rozwiązania techniczne i technologiczne umożliwiły efektywne, a przede wszystkim ekonomicznie opłacalne wydobycie gazu ziemnego zakumulowanego w tych strukturach. Jak wiadomo, eksploatacja łupków jest możliwa jedynie po wykonaniu serii zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Prowadzenie przez lata doświadczeń w stymulacji łupków pozwoliło przetestować wiele rozwiązań technicznych i technologicznych. Wniosek z tych poczyniń jest jeden: nie ma jedynej skutecznej technologii szczelinowania łupków. Tysiące wykonanych zabiegów szczelinowania w łupkach umożliwiły doskonalenie tej technologii. Pozwoliło to uzyskać znaczący postęp w efektywności wykonywanych stymulacji. Początkowe prace umożliwiły wydobycie jedynie 2% zgromadzonego w złożu gazu (*Gas In Place*). Obecnie stosowane technologie pozwalają na uzyskanie szcerpania ok. 50% GIP.

Uruchomienie komercyjnego wydobycia gazu z łupków wymagało znalezienia nowych rozwiązań technologicznych lub adaptacji już istniejących. Przede wszystkim wykorzystano w tym celu odwierty poziome. Okazały się one być o wiele bardziej efektywne niż pionowe. Nowością w stymulacji łupków było wykorzystanie cieczy o niskiej lepkości ($< 10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$), tzw. *slick water*. Właściwym rozwiązaniem okazało się też być wykonywanie wielu zabiegów szczelinowania z użyciem dużej ilości cieczy szczelinującej.

Obecnie długość poziomych odcinków dochodzi do 2500 m. Oś odwiertu poziomego jest projektowana w ten sposób, by była prostopadła do kierunku propagacji szczelin. W każdym z odwiertów poziomych, w celu lepszego udostępnienia złoża gazu, wykonuje się 10÷20 zabiegów

hydraulicznego szczelinowania. Wytworzony w zabiegach system szczelin pozwala na osiągnięcie większej wydajności z odwiertów, jak również na zwiększenie współczynnika szcerpania złoża. Dla uzyskania komercyjnego wydobycia gazu z łupków niezwykle ważne jest precyzyjne wykonanie wszystkich etapów związanych z udostępnieniem formacji, tj. optymalne określenie trajektorii odwiertu, jego wgłębne uzbrojenie i wykonanie skutecznej stymulacji. Można to osiągnąć poprzez prowadzenie prac sejsmicznych 3D, analiz geologicznych, petrofizycznych badań rdzeni, analizy profilowań geofizycznych i badań mikrosejsmicznych oraz poprzez analizę danych z poprzednich stymulacji. W szczelinowaniu łupków duży nacisk kładzie się na zwiększenie zasięgu zabiegu z jednoczesnym utworzeniem przestrzennej struktury drobniejszych szczelin i mikroszczelin połączonych z odwiertem przez szczeliny główne. Im bardziej rozległy i skomplikowany jest system wytworzonych szczelin, tym sprawniej przebiega proces oczyszczania złoża po zabiegu oraz szybciej następuje stabilizacja wydobycia na wyższym poziomie. Zdarza się, że przy szczelinowaniu łupków zachodzi konieczność lepszego podsadzenia szczelin głównych. Z uwagi na fakt, że stosowana powszechnie technologia szczelinowania cieczą *slick water* ma ograniczenia w transporcie materiału podsadzkowego, często stosuje się tzw. zabiegi hybrydowe, w których naprzemiennie wykorzystuje się ciecz zabiegową typu *slick* i żel. Takie połączenie gwarantuje znacznie lepsze podsadzenie szczelin głównych. Jednak część łupków charakteryzujących się większą plastycznością wymaga użycia znacznie lepszego podsadzenia, co determinuje uzyskanie pozytywnych efektów zabiegu. W związku z tym w tego rodzaju łupkach należy stosować ciecz szczelinującą na bazie żelu polimerowego lub nawet polimeru sieciowanego.

Aspekty technologiczne

Najczęściej stosowaną cieczą technologiczną do szczelinowania formacji łupkowych jest tzw. *slick water*. Jest to woda z niewielką ilością dodatku polimeru syntetycznego lub naturalnego (np. guar). Ciecz ta charakteryzuje się bardzo niską lepkością, rzędu kilku $\text{mPa} \cdot \text{s}$, zatem jej możliwości transportowania materiału podsadzkowego do szczeliny są bardzo ograniczone. *Slick water* nie jest odpowiednią cieczą do wszystkich zabiegów szczelinowania w łupkach. Dla pewnej ich części stosuje się także cieczy na bazie żeli i piany. Dobór odpowiedniej cieczy do zabiegu szczelinowania sprowadza się do zapewnienia transportu materiału podsadzkowego na odpowiednim poziomie oraz wytworzenia przestrzennej struktury szczelin i mikroszczelin połączonych z odwiertem.

Użycie *slick water* przyczynia się do powstania szczeliny, otwarcia mikropęknięć i szczelin naturalnych oraz utworzenia znacznej powierzchni kontaktu odwiertu ze złożem. Jej użycie nie pozwala stosować wysokich koncentracji podsadzki, a dodatkowo – materiał ten, z uwagi na niską lepkość, szybko opada w tej cieczy. W formacjach łupkowych charakteryzujących się wysokim modułem Younga i niewielkim naprężeniem zamykającym szczelinę, nawet szczelina niewypełniona materiałem podsadzkowym może być efektywna w transporcie gazu. Na przestrzeni lat do hydraulicznego szczelinowania łupków wykorzystywano z różnym powodzeniem inne cieczy zabiegowe, takie jak: azot, żelowany ciekły gaz, azot kriogeniczny, ciekły dwutlenek węgla oraz ciekły gaz ziemny [6].

Standardowa ciecz do hydraulicznego szczelinowania łupków to w 99,5% woda. Do niej dodaje się polimer naturalny lub syntetyczny albo środek zmniejszający opory przepływu, w ilości od 0,01 do 0,1%. W przypadku stosowania polimeru naturalnego niezbędny jest też, w celu ochrony bakteriologicznej, dodatek biocydu (ok. 0,05÷0,1%). Czasami do cieczy dodaje się reduktor tlenu oraz środki zabezpieczające przed tworzeniem osadów nieorganicznych. Wykorzystuje się też substancje 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 ciecz zabiegową do szczelinowania łupków pokazano na rysunku 1.

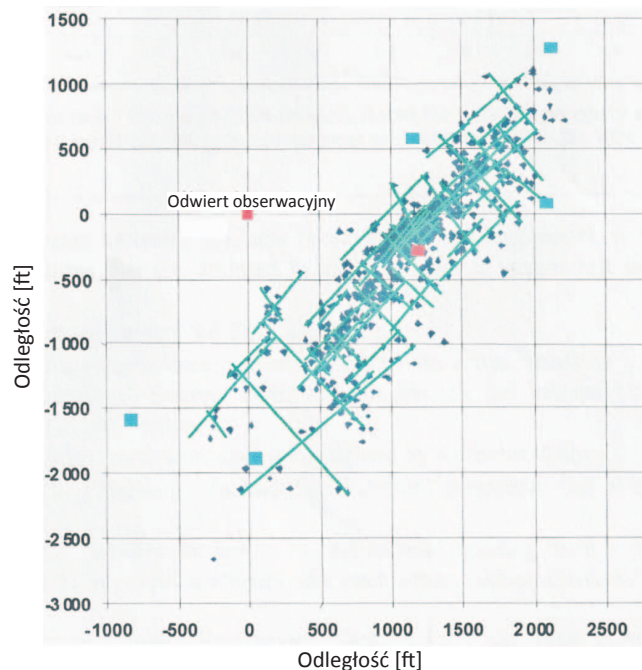


Rys. 1. Ciecz zabiegowa do szczelinowania łupków

W chwili obecnej ogromną uwagę skupia się na analizie danych z wykonanych zabiegów 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 zabiegu szczelinowania. Pozwala ona na opracowanie mapy zdarzeń sejsmicznych w czasie i przestrzeni, która może stanowić podstawę interpretacji geometrii wytworzonego systemu szczelin, charakteryzującego się – jak pokazują doświadczenia – pełną trójwymiarowością. W trakcie zabiegu szczelinowania powstaje wiele szczelin o niewielkiej rozwartości i dużym zasięgu, które tworzą sieć umożliwiającą kontakt z naturalnymi mikroszczelinami – rysunek 2 [3, 4, 6].

Takie pojęcie szczeliny w złożach typu *shale* spowodowało konieczność wprowadzenia nowego parametru, niestosowanego przy opisie szczelin wykonanych klasyczną metodą w konwencjonalnych złożach. Parametr ten określa objętość złoża poddaną procesowi stymulacji, a oznacza się go jako SRV (*Stimulated 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 powoduje utwo-



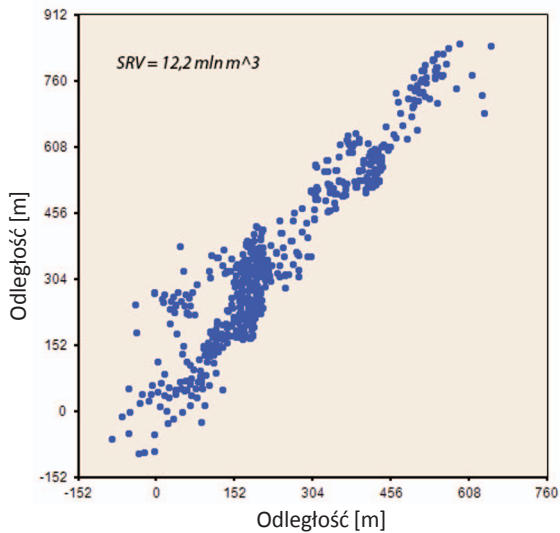
Rys. 2. Mikrosejsmiczna interpretacja geometrii szczeliny

rzenie systemu szczelin w dużej objętości szczelinowanego interwału,

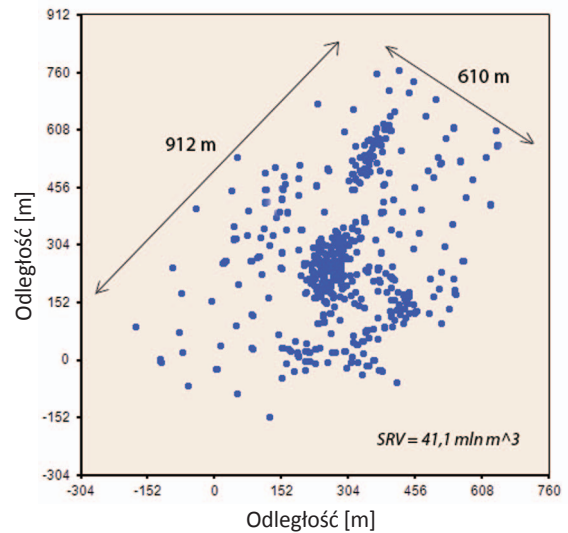
- badania mikrosejsmiczne podczas szczelinowania są niezbędne do próby opisu geometrii systemu szczelin,
- wytworzony system szczelin posiada powierzchnię 10÷100-krotnie większą niż tradycyjne szczeliny dwuskrzydłowe,
- obecne modele do projektowania hydraulicznego szczelinowania metodą *Slickwater Fracturing* w złożach typu *shale* są nieprzydatne.

Badania mikrosejsmiczne prowadzone podczas szczelinowania złoża Barnett Shale potwierdziły, że przy użyciu technologii *slick water* SRV wynosi ok. 40 000 000 m³, podczas gdy stosując technologię żelowanego polimeru w tych samych złożach osiągnęto wartość SRV 12 000 000 m³. Obserwacje te potwierdzały też wyniki uzyskane z wydobywania gazu po wykonanych zabiegach. W odwiertach szczelinowanych cieczą *slick water* osiągnęto wydobywanie ponad dwukrotnie większe niż w przypadku szczelinowania żelem. Przykładowe mapy mikrosejsmiczne pokazane na rysunku 3 obrazują różnice pomiędzy zabiegami wykonanymi przy użyciu technologii *gel* i *slick water* w formacjach łupkowych [3, 5].

Materiał podsadzkowy służy do wypełniania szczelin generowanych w trakcie procesu hydraulicznego szczelinowania. Szczeliny wytwarzane przy szczelinowaniu łupków charakteryzują się niewielką rozwartością. W związku z tym materiał podsadzkowy używany do wypełniania tych szczelin charakteryzuje się mniejszą średnicą ziaren niż w przypadku szczelinowania w złożach konwencjonalnych. Piasek kwarcowy o różnej granulacji jest najczęściej stosowaną podsadzką



Szczelinowanie żelem



Szczelinowanie *slick water*

Rys. 3. Porównanie zasięgu zabiegu szczelinowania w łupkach przy wykorzystaniu różnych technologii

w szczelinowaniu łupków. Do najczęściej używanych granulacji należy zaliczyć także 100 mesh, 40/70 mesh, 30/50 mesh oraz rzadziej 20/40 mesh. Piasek o granulacji 100 mesh jest stosowany przede wszystkim w celu ograniczenia propagacji szczeliny w kierunku pionowym w dół, szczególnie w przypadku zredukowanej ilości cieczy wyprzedzającej (padu) i zmniejszonej wydajności.

Podczas zabiegu szczelinowania materiał podsadzkowy jest dodawany do cieczy szczelinującej w kilku etapach. W każdej z kolejnych faz zwiększa się koncentrację podsadzki. Rozwartość i ilość szczelin naturalnych w strefie przyodwiertowej są kluczowe w zapobieganiu wytrącania się podsadzki. Rozwartość szczelin zależy od wydajności tłoczenia, lepkości cieczy szczelinującej, kruchości materiału skalnego, panujących naprężeń poziomych w złożu oraz obecności nieciągłości tektonicznych. Typowa koncentracja podsadzki w pierwszym etapie tłoczenia wynosi ok. 20÷40 kg/m³. W kolejnych okresach pompowania, po ustabilizowaniu się ciśnienia, zwiększa się koncentrację podsadzki w krokach o 40 kg/m³. Maksymalna koncentracja podsadzki cieczy szczelinującej typu *slick water* jest zależna od rozmiaru podsadzki. Na podstawie doświadczeń można stwierdzić, że dla najmniejszej stosowanej granulacji – 100 mesh limitem jest koncentracja 300 kg/m³. Dla podsadzki 40/70 mesh limit ten wynosi 240 kg/m³. Zdarza się, że w trakcie tłoczenia materiału podsadzkowego w celu wypełnienia szczelin zachodzi konieczność wykonania operacji kontroli filtracji.

Wtedy w trakcie tłoczenia dodatkowo zwiększa się koncentrację podsadzki (ponad wartość określoną w projekcie) o 60÷180 kg/m³. Zazwyczaj wystarczy zatłoczenie 16÷24 m³ cieczy ze zwiększoną koncentracją (tzw. *slag*). Po zatłoczeniu zwiększonej porcji podsadzki powraca się do realizacji schematu pompowania. Efekt zadziałania dodatkowej ilości podsadzki w ograniczeniu filtracji jest widoczny po przejściu dodatkowego materiału podsadzkowego przez perforację.

Średnia wielkość każdego z zabiegów szczelinowania w poziomym odwiercie udostępniającym złożę gazu zlokalizowane w łupkach to ok. 1300÷2400 m³ cieczy szczelinującej oraz 36÷140 ton materiału podsadzkowego [4].

Stymulacja złóż niekonwencjonalnych spowodowała ogromny postęp również w dziedzinie materiałów podsadzkowych. Zmierzając do jak najbardziej efektywnego podsadzania systemu szczelin i mikroszczelin, wprowadzono do komercyjnego stosowania nowe typy materiałów podsadzkowych. Pierwszą taką grupę stanowią materiały podsadzkowe o gęstości zbliżonej do gęstości wody (1,05 g/cm³). Substancje te niemal pływają w cieczy zabiegowej, umożliwiając wydłużenie zasięgu szczelin. Kolejną nową grupę stanowią materiały podsadzkowe porowate. Zmniejszona gęstość podsadzki i porowata struktura otwiera dodatkowe kanały przepływu dla gazu. Następną grupą nowych podsadzek są materiały termoplastyczne. Zmieniają one swój kształt pod wpływem naprężeń i temperatury, stając się bardziej odporne na naprężenia ściskające [6].

Kluczowe aspekty szczelinowania łupków w Polsce

Krajowe doświadczenia w szczelinowaniu formacji łupkowych są jeszcze niewielkie, zwłaszcza w porównaniu

z praktykami amerykańskimi. Niemniej jednak można próbować formułować wstępne i bardzo ogólne wnioski, które

mogą być przydatne przy projektowaniu kolejnych prac wiertniczych i stymulacyjnych formacji łupkowych w Polsce. Oczywiście w miarę napływania nowych informacji z kolejnych odwiertów i różnych koncesji konieczne będzie aktualizowanie przytoczonych poniżej rozważań.

Na wstępie można stwierdzić, że formacje łupkowe w Polsce różnią się od łupków złóż amerykańskich. Zauważalna różnica w aspekcie zabiegów szczelinowania polega przede wszystkim na głębokości zalegania formacji łupkowej (w Polsce położone są one znacznie głębiej), a także składzie mineralogicznym łupków, co przekłada się bezpośrednio na podatność tych skał na hydrauliczne szczelinowanie. Wynika z tego, że technologie sprawdzone w USA nie do końca będą efektywne w Polsce. Zapewne konieczna okaże się adaptacja i modyfikacja tych technologii do naszych warunków lub opracowanie nowych metod efektywnej stymulacji formacji łupkowych.

W efektywnej stymulacji łupków istotnych jest wiele zagadnień, niemniej jednak niektóre z nich można uznać za strategiczne. Obszarami o szczególnym znaczeniu są z pewnością:

- odpowiednie ukierunkowanie trajektorii odwiertu (azymut),
- konstrukcja i uzbrojenie odwiertu – wgłębne i powierzchniowe,
- sposób i skuteczność udostępnienia złoża,
- technologia zabiegu szczelinowania,
- stosowane metody pomiarowe.

Zaplanowanie i wykonanie otworu o odpowiedniej trajektorii rozpoczyna cały proces ważnych przedsięwzięć w efektywnym udostępnianiu formacji łupkowych. Powszechnie wiadomo, że wytworzone hydraulicznie szczeliny propagują w formacji w ściśle określonych kierunkach. Jest to bezpośrednio związane z aktualnym stanem naprężeń w szczelinowanej formacji. Płaszczyzna propagacji szczelin jest zawsze prostopadła do kierunku minimalnych naprężeń (zazwyczaj poziomych). Aby wytworzone w trakcie zabiegu szczeliny w efektywny sposób komunikowały odwiert ze złożem, powinny one być prostopadłe do osi poziomego odcinka odwiertu. Każde inne położenie szczelin w stosunku do odwiertu jest mniej korzystne. W związku z tym przed zaprojektowaniem i wykonaniem otworu niezbędne jest rozpoznanie występujących naprężeń głównych w złożu.

Niestety w formacjach o bardzo niskiej przepuszczalności (rzędu 10^{-21} m²) kierunek i wielkość naprężeń może ulegać zmianom pod wpływem wielu czynników. Jednym z ważniejszych jest zmienność tektoniczna danego obszaru. Dodatkowo prowadzone prace wiertnicze i stymulacyjne w danym rejonie mogą powodować lokalne zmiany naprężeń w formacji łupkowej. Dlatego też należy pamiętać, że zmierzone i określone naprężenia (wielkości i kierunki) nie są dane raz na zawsze. Należy na bieżąco uwzględniać i analizować zmiany naprę-

żeń przy projektowaniu kolejnych otworów w danym rejonie prowadzenia działalności wiertniczej [2].

Następnym bardzo ważnym aspektem determinującym efektywne udostępnienie łupków jest przygotowanie odpowiedniej konstrukcji otworu i jego uzbrojenie. Przy planowaniu konstrukcji i wyposażenia odwiertu należy pamiętać, że udostępniając złoża niekonwencjonalne trzeba uwzględnić potrzebę wykonywania zabiegów stymulacyjnych, a co za tym idzie – konieczność tłoczenia cieczy zabiegowych z dużą wydajnością i przy wysokim ciśnieniu. W związku z tym istotne jest, aby wszystkie elementy konstrukcji odwiertu i jego wyposażenia umożliwiły wykonywanie operacji przy bardzo dużych ciśnieniach. Pożądane jest zabezpieczenie prowadzenia prac przy ciśnieniu do 15 kpsi (ok. 1034 bar). Równie ważne jak wytrzymałość na duże ciśnienie jest zabezpieczenie odpowiednich średnic rur okładzinowych i kolumny eksploatacyjnej w zależności od przyjętej strategii stymulacji. Zabiegi można wykonać według kilku koncepcji. Pierwsza z nich polega na zarurowaniu odwiertu i zacementowaniu rur, zapuszczeniu rur zabiegowych (min 3½ cala) z dwoma pakerami izolującymi strefę zabiegu i kolejne wykonanie zabiegów w wytypowanych horyzontach. Można też zapuścić specjalistyczny liner zabiegowo-eksploatacyjny (np. *Multi Stage Stimulation System, Single Trip Stimulation System*), zapięty w rurach w pionowej części odwiertu, składający się z szeregu pakerów zabiegowych zlokalizowanych w ściśle określonych miejscach. Sposób ten umożliwi sprawne wykonywanie kolejnych zabiegów, poczynając od spodu odwiertu. Systemy takie stosowane są w odwiertach zarurowanych, jak i nieorurowanych. Wydaje się jednak, że najkorzystniejszym i sprawdzonym rozwiązaniem jest wykorzystanie systemu *plug and perf*. Polega on na wykonaniu zabiegu poprzez kolumnę rur eksploatacyjnych. Izolację stref do zabiegu uzyskuje się poprzez zapuszczanie i zapięcie korka mechanicznego wraz z perforatorem, a następnie wykonanie perforacji i zabiegu szczelinowania. Operację tę powtarza się w każdej ze stref wytypowanych do szczelinowania. Rozwiązanie to potwierdziło swoją skuteczność w trakcie wykonywanych zabiegów i jest najmniej skomplikowane technicznie, zatem istnieje niewielka możliwość wystąpienia ewentualnych komplikacji.

Sposób i skuteczność udostępnienia złoża to kolejny niezwykle ważny element w procesie szczelinowania. Wykonanie zabiegu wiąże się z koniecznością tłoczenia dużej ilości cieczy technologicznych z bardzo dużą wydajnością, przekraczającą niekiedy 20 m³/min, przy wysokim ciśnieniu tłoczenia – dochodzącym na powierzchni nawet do 1000 bar. Ciecz ta, aby rozpocząć inicjację i propagację szczelin, musi w całości przedostać się przez perforację. Jakość i skuteczność perforacji w bezpośredni sposób determinuje sprawność wykonania zabiegu szczelinowania. Wiadomo, że specyfika

szczelinowania łupków wymaga utworzenie sieci szczelin i mikroszczelin, co pozwala na znacznie lepsze udostępnienie złoża do eksploatacji. W związku z powyższym jest wiele czynników wpływających na efektywność perforacji. Po pierwsze, perforacja musi być skuteczna, co oznacza dobry kontakt hydrauliczny odwiertu ze skałą złożową. Jej skuteczność ocenia się na podstawie zmierzonych oporów na perforacji i w strefie przyodwiertowej, podczas prowadzenia testów i samego zabiegu szczelinowania. Jeżeli opory te przy wydajności zbliżonej do zabiegowej są wyższe od 50 bar, istnieje poważne zagrożenie dla efektywnego wykonania zabiegu. Tak duże opory na perforacji mogą powodować zjawisko wytrącania podsadzki z cieczy (*screen out*). Jeśli testy przed zabiegiem (*minifrac, break down – step down*) potwierdzą wysokie opory, należy rozważyć reperforację, doperforowanie lub przetłoczenie 100-meshowej podsadzki celem poszerzenia i pogłębienia kanałów perforacyjnych. Kolejnym aspektem związanym z perforacją jest jej organizacja. Wykonane zabiegi potwierdzają, że klastrowa organizacja perforacji jest skutecznym rozwiązaniem. Jeżeli w strefie zabiegu wykonuje się kilka (3÷4) klastrów perforacji o niewielkiej długości (1÷2 m), jest szansa na to, że zabieg będzie przebiegał bez komplikacji (zmniejszenie oporów na perforacji), a szczeliny główne generowane będą w kilku miejscach, co zwiększy objętość złoża poddaną szczelinowaniu (SRV). Potwierdza to także prowadzony monitoring mikroesejsmiczny. Następnym istotnym elementem związanym z udostępnianiem złoża jest długość strefy wykonania jednego szczelinowania. Jeżeli brak jest przesłanek złożowych, zakłada się odległość między strefami w granicach 80÷100 m. W dotychczas wykonanych zabiegach przyjmowano takie właśnie założenia. Ich późniejsza analiza metodą określania wielkości naprężeń w złożu po szczelinowaniu (*stress shadow*) pokazuje, że mniejsze odległości (ok. 50 m) byłyby bardziej skuteczne z punktu widzenia pokrycia złoża wygenerowanymi szczelinami. W dotychczasowych zabiegach wykonanych w odwiertach poziomych udostępniających formacje łupkowe perforację i zabiegi szczelinowania wykonywano metodą *plug and perf*, polegającą na zapuszczeniu mechanicznego korka, wykonaniu perforacji, a następnie zabiegu, po czym operacja ta była powtarzana tyle razy, ile przewidziano sekcji do szczelinowania. Metoda ta okazała się na tyle skuteczna, że powinna być wykorzystywana w szczelinowaniu kolejnych otworów. Oczywiście uzyskane dane i informacje z wykonanych szczelinowań będą analizowane przy projektowaniu kolejnych zabiegów, a ich wyniki posłużą optymalizowaniu technologii szczelinowania formacji łupkowych.

Kolejnym ważnym zagadnieniem technologicznym jest odpowiednie zaprojektowanie cieczy zabiegowej. Bazując na doświadczeniach amerykańskich, opracowano pewne sche-

maty technologiczne dotyczące stosowania różnych cieczy szczelinujących dla wielu rodzajów skał łupkowych. Wiadomo bowiem, że łupki szczelinuje się cieczami: od bardzo mało lepkiej (*slick water*), poprzez bardziej lepkie (polimery liniowe), aż po bardzo lepkie (polimery liniowe sieciowane). Niejednokrotnie wykonuje się też zabiegi hybrydowe, w których stosuje się naprzemiennie różne rodzaje cieczy zabiegowych. W szczelinowaniu łupków obowiązuje ogólna zasada, że im bardziej kruche łupki, tym mniejsza lepkość cieczy szczelinującej. Gdy skała łupkowa staje się bardziej plastyczna, wymagane jest stosowanie cieczy o większej lepkości. Ogólny schemat doboru rodzaju cieczy szczelinujących do różnych formacji łupkowych pokazano na rysunku 4.

Kruchość [%]	Rodzaj cieczy	Geometria szczeliny
70	<i>slick water</i>	skomplikowana wieloszczelinowa
60	<i>slick water</i>	
50	hybrydowa	
40	liniowa	
30	sieciowana	
20	sieciowana	
10	sieciowana	prosta, dwuskrzydłowa

Kruchość [%]	Koncentracja podsadzki	Objętość cieczy	Ilość podsadzki
70	niska	duża	mała
60			
50			
40			
30			
20			
10	wysoka	mała	duża

Rys. 4. Dobór rodzaju cieczy szczelinujących do łupków

Łupki z dużym modułem Younga i małym współczynnikiem Poissona (często ze zwiększoną zawartością krzemionki) nazywa się kruchymi. Łatwo się je szczelinuje. W takich łupkach mikroszczeliny nawet niewypełnione podsadzką pozostają otwarte. W łupkach tego typu szybciej uzyskuje się przepływ gazu. Bardziej plastyczne łupki wymagają szczelinowania ze znacznie lepszym wypełnieniem szczelin materiałem podsadzkowym.

Badania mineralogiczne rdzeni wiertniczych i zwiercin pozwalają zidentyfikować takie minerały jak: krzemionka, kalcyt, dolomit i minerały ilaste. Ich procentowa zawartość w łupkach decyduje o kruchości, a zarazem podatności na szczelinowanie. Jako perspektywiczne łupki uznaje się te, w których zawartość minerałów ilastych jest mniejsza niż 40%, statyczny moduł

Younga jest większy niż $3,5 \cdot 10^6$ psi (24 131 MPa) oraz stosunek dynamicznego do statycznego modułu Younga zbliża się do wartości charakterystycznych dla skał klastycznych, czyli tworzy zależność zbliżoną do liniowej.

Badając techniczne aspekty szczelinowania hydraulicznego łupków stwierdzono, że uruchomienie procesu otwierania mikroszczelin jest bardziej efektywne przy zwiększaniu wydajności tłoczenia cieczy szczelinującej małymi krokami. Natomiast zwiększając wydajność cieczy szczelinującej w znaczący sposób, uruchamia się propagację 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, lecz to może potwierdzić jedynie interpretacja pomiarów mikrosejsmicznych.

Dotychczas wykonane w Polsce zabiegi szczelinowania w odwiertach poziomych prowadzone były z wykorzystaniem technologii hybrydowej. Etapy tłoczenia niskolepkiej cieczy z podsadzką przeplatane były okresami tłoczenia cieczy o większej lepkości. Taki zabieg technologiczny miał na celu poprawę transportu materiału podsadzkowego w szczelinie, jak również oczyszczenie poziomego odcinka odwiertu z zalegającej podsadzki (tzw. *sweep stage*). W dotychczas wykonanych zabiegach technika ta okazała się skuteczna, jednak nie można jej traktować jako ostatecznej i jedynej rozwiązania przy kolejnych zabiegach szczelinowania.

Kolejnym bardzo ważnym elementem wykorzystywanym w interpretacji zabiegów hydraulicznego szczelinowania jest prowadzenie monitoringu mikrosejsmicznego. Analiza i interpretacja zdarzeń mikrosejsmicznych zarejestrowanych podczas szczelinowania pozwala na wyciąganie istotnych wniosków. Dotyczą one geometrii wytworzonej szczeliny oraz wpływu wielu parametrów na jej kształtowanie. Mapy mikrosejsmiczne pozwalają zobrazować dynamikę procesu szczelinowania oraz ilość i kierunki wygenerowanych szczelin. Bardzo użyteczna jest też interpretacja wpływu parametrów zabiegu (np. wydajności, ciśnienia, rodzaju cieczy szczelinującej itd.) na kształt i zasięg szczelin. Interpretacje mikrosejsmiczne pozwalają na dokładne poznanie charakterystyki procesu szczelinowania w danym rejonie. Umożliwia to detaliczne projektowanie zabiegów w taki sposób, by osiągać z góry zaplanowane cele. Dzięki tym interpretacjom oraz zdobytemu doświadczeniu można z dużą dokładnością kształtować geometrię wytwarzanych szczelin i ich systemów.

Wykonane pomiary mikrosejsmiczne w szczelinowanych odwiertach w Polsce okazały się być bardzo przydatne. Dzięki nim udało się zobrazować i zinterpretować geometrię wytworzonych szczelin. Interesującym wynikiem tych pomiarów jest potwierdzenie aktywności mikrosejsmicznej po zakończeniu zabiegu i dalszej propagacji szczelin. Interpretacja tych danych z pewnością będzie wykorzystana przy projektowaniu kolejnych zabiegów hydraulicznego szczelinowania.

Podsumowanie

Wykorzystując dotychczasową wiedzę o szczelinowaniu łupków oraz zdobyte doświadczenie, można stwierdzić, że specjaliści zajmujący się tymi zagadnieniami są dopiero na początku długiej drogi wiodącej do opracowania skutecznej

i efektywnej metody szczelinowania łupków w Polsce. Jednak każdy kolejny wykonany zabieg szczelinowania, każda zdobyta i zinterpretowana informacja przybliża nas do opracowania efektywnej technologii udostępniania formacji łupkowych.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2013, nr 11, s. 807–813

Artykuł powstał na podstawie dokumentacji INiG DK-4100-26/11 (10/2011) pt.: *Metody stymulacji wydobywania ze złóż typu Tight i Shale*, która zrealizowana została w ramach działalności statutowej, na zlecenie MNiSW.

Literatura

- [1] Ciechanowska M., Matyasik I., Such P., Kasza P., Lubas J.: *Uwarunkowania rozwoju wydobywania gazu z polskich formacji łupkowych*. Nafta-Gaz 2013, nr 1, s. 7–17.
- [2] Cipolla C. L., Lolon E. P., Dzubin B.: *Evaluating stimulation effectiveness in unconventional gas reservoirs*. SPE 2009, 124843.
- [3] Cipolla C. L., Warpinski N. R., Mayerhofer M. J., Lolon E. P., Vincent M. C.: *The relationship between fracture complexity, reservoir treatment and fracturing treatment design*. SPE 2008, 115769.
- [4] Kasza P., Wilk K.: *Udostępnianie gazu ziemnego z formacji łupkowych metoda hydraulicznego szczelinowania*. Przemysł Chemiczny 2012, nr 4, s. 608–612.
- [5] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobywania w niekonwencjonalnych złóżach węglowodorów*. Nafta-Gaz 2011, nr 10, s. 697–701.
- [6] King G. E.: *Thirty years of gas shale fracturing: What we have learned*. SPE 2010, 133456.
- [7] Such P.: *Przestrzen porowa skał łupkowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 9, s. 561–565.



Dr inż. Piotr KASZA
 Adiunkt; kierownik Zakładu Stymulacji Wydobywania Węglowodorów.
 Instytut Nafty i Gazu
 ul. Lubicz 25A
 31-503 Kraków
 E-mail: piotr.kasza@inig.pl