

Marek Czupski, Piotr Kasza, Klaudia Wilk  
Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

## Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

### Wstęp

Począwszy od roku 1949, tj. od wprowadzenia przez firmę Halliburton hydraulicznego szczelinowania jako metody stymulacji wydobywania, na całym świecie wykonano setki tysięcy tego typu zabiegów [5]. Wynika to z faktu, że w wielu przypadkach wydobywanie węglowodorów może być ekonomicznie nieopłacalne bez wykonania w odwiercie zabiegu hydraulicznego szczelinowania. Na pewno dotyczy to również produkcji węglowodorów ze złóż

niekonwencjonalnych, takich jak: złoża typu zamkniętego (*tight gas*), formacje łupkowe (*shale gas*) czy w przypadku odmetanowania węgla (*coalbed methane*). Z kolei szczególnie ważnym czynnikiem mającym wpływ na powodzenie zabiegów hydraulicznego szczelinowania w różnych formacjach jest odpowiedni dobór płynu szczelinującego. Dlatego na ich rozwój wydawane są ogromne środki przez firmy związane z przemysłem naftowym.

### Rodzaje płynów stosowanych do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

Większość zabiegów w złożach konwencjonalnych wykonywanych jest przy zastosowaniu płynów na bazie sieciowanych roztworów liniowych polimerów. Dzięki wytworzeniu takiej przestrzennej struktury znacznie poprawione zostają możliwości transportu podsadzki w szczelinie, jak również możliwe jest zwiększenie jej koncentracji wewnątrz szczeliny. Z tym, że niesie to ze sobą również znaczne uszkodzenie przepuszczalności podsadzonej szczeliny, związane z zastosowaniem przede wszystkim dużych stężeń polimerów.

Aktualnie na znaczeniu zyskują złoża niekonwencjonalne, których eksploatacja może być opłacalna ekonomicznie jedynie po wykonaniu wielu zabiegów stymulacji wydobywania. Zabiegi w złożach typu zamkniętego (*tight gas*) często są bardzo podobne do zabiegów w złożach konwencjonalnych, a różnią się jedynie ilością zatłaczanego płynu szczelinującego czy podsadzki (dochodząca do 1000 ton) oraz wymiarami szczeliny (znacznie przekraczającymi wymiary szczelin w złożach konwencjonalnych). Ze względu na niskie i bardzo niskie współczynniki przepuszczalności matrycy złóż zamkniętych [12] 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, często nie różniły się one jednak niczym innym od zabiegów w złożach konwencjonalnych; przede wszystkim stosowana technologia, sposób modelowania i projektowania zabiegów oraz ich wykonawstwo były niemal identyczne [9]. Sieciowane płyny posiadają jednak zasadniczą wadę, jaką jest powodowanie znacznego uszkodzenia przewodności wytwarzanej w trakcie zabiegu szczeliny. Pomiary laboratoryjne wykazywały, że często osiągnięto mniej niż 10% właściwej dla danej podsadzki przewodności [8]. Jest to przyczyną generowania mniejszych niż zakładane przez osoby projektujące zabiegi efektywnych długości szczeliny.

Natomiast odkrycie złóż łupkowych w ogromnym stopniu zmieniło techniki i technologie szczelinowania hydraulicznego. Część tego typu zabiegów w łupkach przeprowadza się z użyciem cieczy opartej na roztworze polimeru liniowego bez użycia sieciownika, jednak większość z nich wykonywana jest z zastosowaniem tzw. *slickwater fracturing*. Jest to zabieg, podczas którego wykorzystuje się duże ilości wody w celu utworzenia odpowiedniej geometrii szczeliny i przewodności, aby uzyskać opłacalną ekonomicznie produkcję ze złóż o małej przepuszczalności

ści i dużej miąższości [13]. Nazwa technologii pochodzi stąd, że płynem szczelinującym jest tutaj woda, z bardzo małym dodatkiem środków chemicznych, w tym przede wszystkim poliakryloamidu lub naturalnego polimeru liniowego ( $0,6\div 1,2 \text{ kg/m}^3$ ). Dodaje się je w celu obniżenia oporów przepływu w rurach, perforacji i szczelinach. Tak więc w porównaniu do konwencjonalnych sieciowanych cieczy szczelinujących „*slickwater*” charakteryzuje się nadzwyczaj małą lepkością. Stąd też wykazuje ona bardzo słabe właściwości nośnikowe w porównaniu do cieczy sieciowanych, dlatego zatłaczana jest z dużą wydajnością, przekraczającą nawet  $16 \text{ m}^3/\text{min}$ . Jak każda technologia i ta ma swoje zalety i wady. Do tych pierwszych na pewno można zaliczyć:

- potencjalnie małe uszkodzenie powodowane przez żel polimerowy. W typowych sieciowanych płynach szczelinujących koncentracja polimeru wynosi od  $2,4 \text{ kg/m}^3$  do  $4,8 \text{ kg/m}^3$ , podczas gdy w „*slickwater*” jest ona około czterokrotnie niższa. Jednak w trakcie zabiegów z wykorzystaniem tej technologii włączane są większe niż podczas konwencjonalnych zabiegów ilości płynu, z którego mogą być osadzone w szczelinach znaczące ilości polimeru. W przypadku złóż, których przepuszczalność jest determinowana w głównej mierze przez system naturalnych szczelin, zastosowanie tego typu płynów jest rozważane w pierwszej kolejności [2]. Użycie bowiem płynów o wyższej lepkości prowadzi do generowania wyższych ciśnień netto (różnica pomiędzy ciśnieniem propagacji, a ciśnieniem zamknięcia szczeliny) w trakcie zabiegu, co powoduje „otwieranie” naturalnych szczelin przez tworzoną główną szczelinę. Jest to przyczyną przyspieszenia filtracji do nich znacznej części płynu, a także do formacji z pozostawieniem placka (osadu) filtracyjnego na powierzchni naturalnych szczelin. Po zakończeniu tłoczenia naturalne szczeliny ulegają zamknięciu, a powstały placek jest powodem ich zerowej przepuszczalności.
- stosunkowo niskie koszty cieczy – związane jest to z mniejszymi niż w przypadku konwencjonalnych płynów ilościami środków chemicznych niezbędnymi do ich przygotowania. Płyn ten może być również po oczyszczeniu powtórnie użyty. Na terenach, gdzie nie ma problemów z dostępem do wody całkowite koszty zabiegu z udziałem „*slickwater*” są zawsze mniejsze w porównaniu do zabiegu wykonanego konwencjonalną cieczą. Z kolei na obszarach oddalonych lub z ograniczonym dostępem do wody korzyści te zmniejszają się i zabiegi wykorzystujące technologię „*slickwater*” często stają się nieopłacalne. Dodatkowo, ponieważ

tego typu zabiegi trwają znacznie dłużej i zazwyczaj wymagają sprzętu o większej mocy (ze względu na większe szybkości tłoczenia) koszty mogą okazać się znacznie większe niż początkowo przewidywano.

- bardziej złożona geometria szczelin niż w przypadku stosowania konwencjonalnych sieciowanych płynów szczelinujących, ze względu na niższe lepkości i większe szybkości tłoczenia. Dla niektórych łupków wykazano, że dzięki zastosowaniu technologii „*slickwater*” osiągnięto większe wartości objętości złoża objętego szczelinowaniem (SRV – *Stimulation Reservoir Volume*) i związaną również z tym większą produkcję po zabiegach. Inną zaobserwowaną zaletą tej technologii jest potencjalna możliwość ograniczenia wymiarów szczelin (zredukowanie wysokości szczelin związane z mniejszą lepkością płynu). Jest to szczególnie ważna zaleta w przypadku zagrożenia przebicia się systemu szczelin do wody podścielającej.
- możliwość powtórnego użycia cieczy po jej oczyszczeniu, związana z tym, że „*slickwater*” jest dużo mniej złożonym chemicznie systemem niż płyny sieciowane, co jest szczególnie ważne na terenach z ograniczonym dostępem do wody.

Jednak są również pewne niedogodności związane ze stosowaniem tej technologii, takie jak:

- mała zdolność do zawieszenia i/lub transportowania materiału podsadzkowego, spowodowana niską lepkością płynu. Prowadzi to nie tylko do trudności w poprzecznym ułożeniu podsadzki w szczelinie (podsadzeniu szczeliny), ale również problemów z pionowym pokryciem podsadzką w poprzek strefy produkcyjnej (*pay zone*). Jest to szczególnie trudne gdy stymulowane są interwały o dużej miąższości. W takich przypadkach bardzo prawdopodobne jest, że zsedymetowana warstwa podsadzki (tzw. „*bank*”) nie pokryje całej strefy produkcyjnej. Problem ten jest czasami rozwiązywany poprzez zastosowanie większej liczby partii płynu, z których każda jest skierowana do ograniczonego pionowego interwału.
- ogromne objętości wody (tysiące  $\text{m}^3$ ) używane do zabiegów przy zastosowaniu tej technologii – związane jest to z potrzebą zatłoczenia dużych mas podsadzki przy jej małej koncentracji w płynie (średnia koncentracja podsadzki wynosi poniżej  $120 \text{ kg/m}^3$ , a maksymalna nie przekracza zazwyczaj  $359 \text{ kg/m}^3$ ). Stwarza to możliwość wystąpienia dwóch potencjalnych problemów. Przy minimalnej zdolności płynu do tworzenia placka filtracyjnego i jego dużej zatłaczanej objętości (i szybkościach tłoczenia) w trakcie zabiegów wystę-

puje większa filtracja, co może powodować większe uszkodzenie przepuszczalności formacji, szczególnie w przypadku złóż wrażliwych na kontakt z wodą. Drugim problemem występującym czasami na obszarach o ograniczonym dostępie do wody są ewentualne konflikty pomiędzy operatorem złoża, a mieszkańcami tych terenów, co może przyczynić się do znaczącego podniesienia kosztów zabiegów.

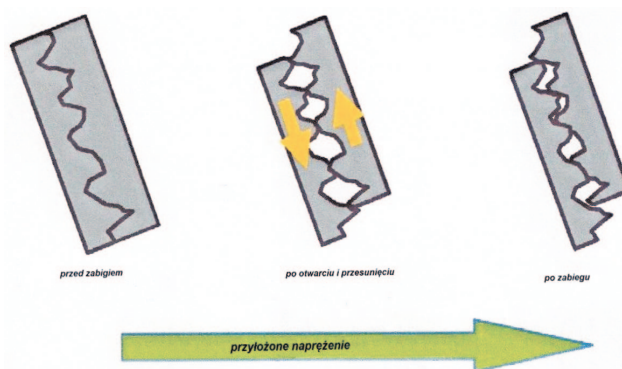
- mniejsze rozwarłościami szczelin niż dla sieciowanych cieczy szczelinujących – ze względu na niższe lepkości cieczy występują problemy z zastosowaniem w nich wyższych koncentracji i większych granulacji podsadzek.

Podsumowując, technologia „*slickwater*” może nie być odpowiednia dla wszystkich rodzajów formacji łupkowych. Wybór zależy od: powierzchni kontaktu ze skałą łupkową, potrzeb podsadzenia systemu szczelin oraz osiąganych wyników produkcji. Podczas zabiegów szczelinowania przy użyciu „*slickwater*” może dochodzić do utworzenia szczelin, mikropęknięć, otwarcia naturalnych szczelin w łupkach, co prowadzi do utworzenia bardzo dużej powierzchni kontaktu, ale małe koncentracje podsadzki i szybka jej sedymentacja powoduje powstawanie szczelin o ograniczonej przewodności [10]. Brak możliwości utworzenia szczelin o określonej przewodności hydraulicznej wzdłuż całej ich wysokości może być przyczyną znacznego ograniczenia produkcji z pewnych formacji. Na przykład dla skał zbiornikowych charakteryzujących się dużymi wartościami modułów sprężystości Young’a, przy małych wartościach naprężeń otaczających szczelinę, mogą występować warunki dla przepływu gazu jedynie przez jej dolną podsadzoną część, natomiast górna, niepodsadzona może nie mieć wystarczającej przewodności.

W celu zmniejszenia problemów związanych z transportem materiałów podsadzkowych stosuje się też tzw. zabiegi hybrydowe [8]. Podczas tego typu zabiegów główną cieczą szczelinującą stanowi „*slickwater*”, ale tłoczone są również partie roztworu polimeru liniowego czy sieciowanego płynu. Pozwala to np. na dwukrotne zwiększenie średniej koncentracji podsadzki w zatłoczonym płynie. Oprócz tego mogą być zastosowane partie materiału podsadzkowego o większej granulacji, charakteryzujące się większą przepuszczalnością, co z kolei wpływa na zwiększenie późniejszej produkcji. Skuteczność takiej technologii potwierdzono np. na podstawie zabiegów hydraulicznego szczelinowania wykonanych na złożu gazu ziemnego typu zamkniętego Cotton Valley – Taylor Sand w południowym Teksasie [8], czy też na złożu Barnett Shale [4].

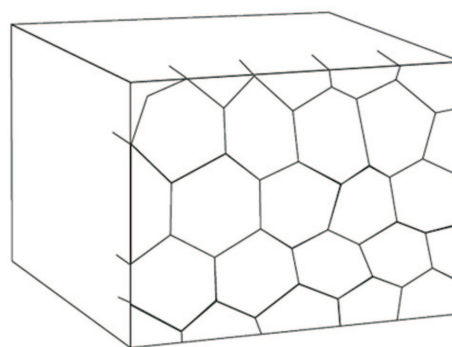
W złożach niekonwencjonalnych stosowane są również, choć na dużo mniejszą skalę niż „*slickwater*”, inne rodzaje płynów szczelinujących, takie jak:

- sprężony azot – podczas szczelinowania przy jego zastosowaniu nie używano materiału podsadzkowego, co powodowało też problemy z utrzymaniem rozwarłościami utworzonych szczelin po zakończeniu zabiegów [1], chociaż część z nich pozostawała otwarta prawdopodobnie w wyniku poślizgu ich powierzchni (rysunek 1) i/lub porowatości.



Rys. 1. Dodatkowa przewodność hydrauliczna przy szczelinowaniu łupków [9]

- ciekły azot – płyn o ekstremalnie niskiej temperaturze ( $-184^{\circ}\text{C}$ ÷ $-196^{\circ}\text{C}$ ) wywołuje termiczne naprężenia rozciągające, które są przyczyną pęknięcia czola formacji (*Devonian Shale*) w sposób jaki pokazano poniżej na rysunku 2 [7].



Rys. 2. Schemat pęknięcia czola formacji pod wpływem termicznych naprężeń przewyższających wytrzymałość skały na rozciąganie (*Devonian Shale*) według Grundmann’a, Rodvelt’a, Dials’a oraz Allen’a [7]

Głębokość tych początkowych pęknięć jest funkcją czasu ekspozycji na działanie płynu o niskiej temperaturze i przewodności cieplnej skały. Dodatkowa głębokość szczelin może wynikać z efektów hydraulicznych w termicznie wygenerowanych szczelinach.

Mogą one znacząco poprawiać powierzchnię dyfuzji gazu z łupków. W trakcie tego typu zabiegów, po ciekłym azocie tłoczono partię azotu o wyższej temperaturze, a następnie mgłą wodną. Ta ostatnia zamarzała i blokowała tę część perforacji, przez którą wcześniej przepływał ciekły azot (działała jako tzw. *diverter*), dzięki czemu następna partia ciekłego azotu włączana była w inne strefy. Zastosowanie jednak takiego typu płynu wymaga odpowiedniego wyposażenia odwiertu (kolektor powierzchniowy i głowica muszą być wykonane ze stali nierdzewnej). W niektórych przypadkach firmy serwisowe musiały użyć wolnowiszących rur z włókna szklanego w celu ochrony rur okładzinowych przed ekstremalnymi temperaturami.

- gaz płynny (LPG) – w temperaturze otoczenia i przy umiarkowanym ciśnieniu (6,9 bar) jest cieczą, dlatego podczas tłoczenia na dno odwiertu ma właściwości podobne do konwencjonalnych płynów szczelinujących na bazie węglowodorów, dzięki czemu posiada dobrą zdolność do przenoszenia materiałów podsadzkowych. W celu zapewnienia odpowiedniej lepkości i czasu, po którym będzie następowało jej zmniejszenie, w zależności od wymagań projektowych, do gazu płynnego dodawano odpowiednie środki chemiczne, które powodowały powstawanie żelu na bazie LPG, a także jego degradację [14]. Po zabiegu osiąga on lepkości o rząd wartości mniejsze niż ciecz na bazie wody. Dodatkowo gaz ziemny rozpuszcza się w nim, co powoduje zmniejszenie napięcia powierzchniowego i ciśnień kapilarnych potrzebnych do odbioru płynu po zabiegu. Bardzo ważne jest również to, że może on być odbierany bezpośrednio do rurociągu lub też spalany na flarze. Technologia ta wymaga jednak zastosowania specjalnie zaprojektowanego w tym celu sprzętu, obejmującego wiele zbiorników do magazynowania i podawania LPG, a także specyficznego ciśnieniowego blendera, na którym do żelowanego gazu płynnego dodawany jest materiał podsadzkowy.
- ciekły dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>) – tego typu płyn jest stosowany przede wszystkim w złożach, o których wiadomo, że są bardzo wrażliwe na kontakt z wodą oraz charakteryzują się niskimi ciśnieniami złożowymi, a wydobywany z nich gaz jest suchy. Ciekły CO<sub>2</sub> używany jest zarówno do wytworzenia szczeliny jak i do transportu materiału podsadzkowego do jej wypełnienia. Po zakończeniu zabiegu, w warunkach niskiego ciśnienia złożowego następuje zmiana stanu skupienia CO<sub>2</sub> z ciekłego na gazowy i w ten sposób jest on wydobywany na powierzchnię nie zanieczyszczając podsa-

dzonej szczeliny żadnymi cząstkami stałymi. Do tego typu płynów nie dodaje się jakichkolwiek dodatków chemicznych mających na celu np. żelowanie płynu, dlatego jego zdolności nośnikowe są jednak mocno ograniczone [15]. Dodatkowo jego niska lepkość, około dziesięciokrotnie mniejsza niż wody, powoduje jego szybką filtrację ze szczeliny do otaczającego ją złoża, co również przyczynia się do problemów z transportem podsadzki wzdłuż jej długości. Tego typu technologia wymaga także zastosowania specjalnego zamkniętego blendera do mieszania ciekłego CO<sub>2</sub> z materiałem podsadzkowym. Koszt wykonania zabiegu jest również wyższy niż dla cieczy na bazie wody, jednak można rozważyć jego wykonanie jeżeli przełoży się to na późniejszą wyższą produkcję.

- piany – z powodzeniem stosowano je między innymi na tym samym co sprężony azot złożu Big Sandy – Huron Shale w Stanach Zjednoczonych [1]. Formacja ta charakteryzuje się niskim ciśnieniem złożowym oraz tym, że jest wrażliwa na kontakt z wodą, stąd też przy włączaniu do niej dużych objętości wody występowały problemy z jej oczyszczeniem czy mniejszymi niż zakładano efektywnościami zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Dlatego jako płyny szczelinujące stosowano tam piany o zawartości azotu w granicach 65÷75%, pozostałą część stanowił roztwór polimeru liniowego (guaru) o stężeniu 1,2÷2,4 kg/m<sup>3</sup>, do których jako podsadzkę dodawano piasek kwarcowy w koncentracji do 599 kg/m<sup>3</sup> płynu. Najlepsze wyniki jeżeli chodzi o późniejszą produkcję gazu uzyskano dla odwiertów szczelinowanych pianą zawierającą w swoim składzie 95% azotu, pozostałą część stanowiła natomiast ciecz oparta na środkach powierzchniowo czynnych. Jako podsadzkę stosowano nanokompozyt o bardzo małej gęstości względnej w odniesieniu do wody, równej 1,05. Dzięki takiemu systemowi zredukowano potrzebną do zabiegów ilość wody o więcej niż 90% w stosunku do konwencjonalnych zabiegów szczelinowania pianami (mniejsza ilość cieczy + wyższa lepkość wytwarzanej piany pozwalająca wraz z małą gęstością podsadzki na przenoszenie jej wyższych koncentracji). Dzięki temu znacznie zmniejszono koszty zakupu, transportu i odpowiedniego przygotowania wody, obejmującego oczyszczenie czy filtrację oraz koszty dodatków chemicznych, a także jej składowania i późniejszego oczyszczenia cieczy pozabiegowej.
- płyny szczelinujące na bazie środków powierzchniowo czynnych (VES Fluids – *Viscoelastic Surfactant Fluids*) – większość z nich osiąga odpowiednią dla

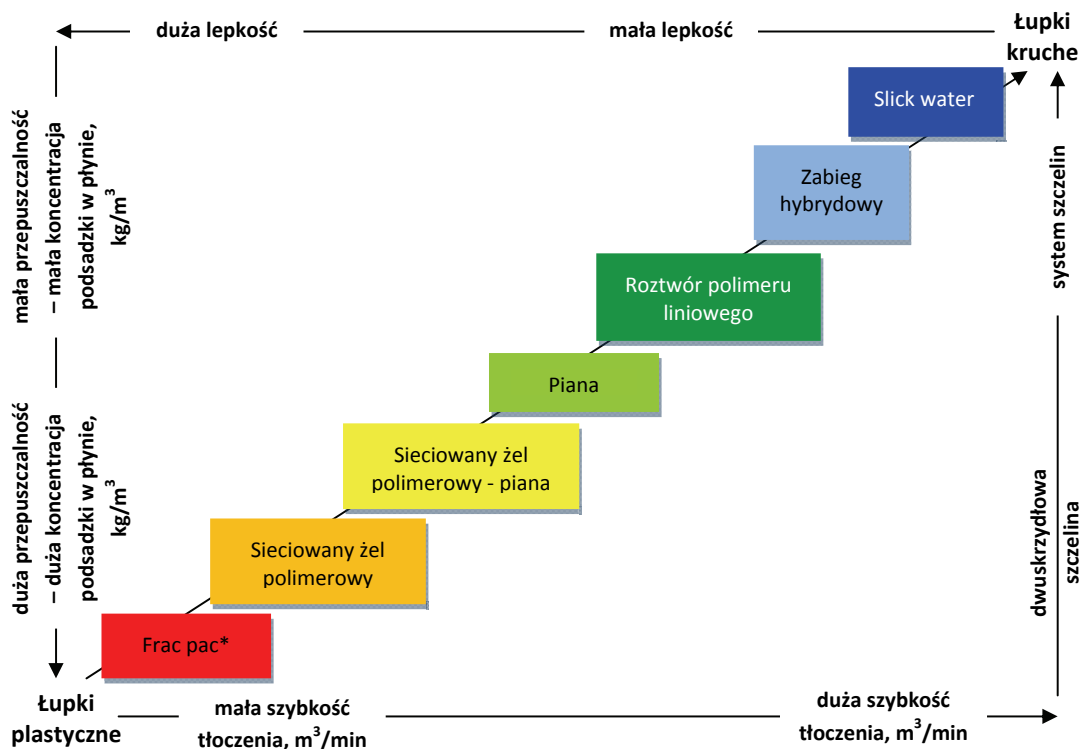
płynów szczelinujących lepkość poprzez gromadzenie się cząsteczek SPCz w większe zespoły w roztworze wodnym. Łańcuchy węglowodorowe asocjują się wtedy i odpowiednio orientują tworząc struktury o kształcie prętu, nazywane micelami. Z kolei kontakt płynu z wydobywanymi węglowodorami lub rozcieńczenie przez solankę złożową rozbija duże micelle, powodując spadek lepkości płynu i jego usunięcie ze szczeliny po wykonanym zabiegu. Uszkodzenie powodowane przez te ciecz jest dużo mniejsze niż dla płynów na bazie polimerów, a przewodność hydrauliczna szczeliny po zabiegu przewyższa 85% właściwej przewodności podsadzki. Wadą tego typu płynów jest to, że nie zapewniają one dobrej kontroli filtracji, co znacząco może ograniczać długość wytworzonej szczeliny.

- płyny reaktywne (SRF – *Shale Reactive Fluids*) – łupki uważane są za względnie niereaktywne z płynami o niskim pH i kwasami, ze względu na ogólne przekonanie, że ropy, mułowce i związki organiczne będące głównymi składnikami formacji łupkowych charakteryzują się małą rozpuszczalnością w kwasach. Jednak przekonania te zaczęto zmieniać gdy w cieczach na bazie wody o pH około 7 odbieranych po zabiegach szczelinowania stwierdzano stężenia jonów  $Ca^{2+}$  równe 500÷2000 ppm, pomimo że z odwiertów, w których przeprowadzano

zabiegi nie wydobywano wody złożowej, z którą mogłyby się mieszać ciecz zabiegowa [6]. Okazało się, że niektóre skały łupkowe zawierają dosyć dużo siarczanu żelaza, siarczanu wapnia czy węglanu wapnia, a rozpuszczalność np. skał łupkowych ze złoża Barnett wynosi w granicach od 7% do 85%, natomiast łupków ze złoża Woodford 19÷23%. W wyniku kontaktu z płynami reaktywnymi łupki wykazują znaczący wzrost efektywnego pola powierzchni, dzięki czemu łatwiejsze jest uwalnianie zaadsorbowanego gazu. Uważa się, że na całkowitą ilość gazu zawartego w łupkach składa się gaz „wolny” i „zaadsorbowany”. Wolny gaz jest prawdopodobnie zawarty w:

- mikroporowatości obecnej w masie objętości łupka,
- makroporowatości zawartej w cienkich laminach (uwarstwieniach) czerta, dolomitu, kalcytu i mułu/piasku, obecnych w większości łupków,
- niezmineralizowanych lub niezamkniętych szczelinach.

Zaadsorbowany gaz jest połączony z materią organiczną i ropy w masie łupka. Usunięcie poszczególnych kryształów kalcytu czy dolomitu nie zawsze pozwala na otwarcie przepuszczalnych kanalików łączących mikropory, ale zwiększa całkowite pole powierzchni właściwej łupka, w którym odbywa się zabieg. Ten wzrost pola powierzchni



Rys. 3. Schemat przedstawiający związek pomiędzy rodzajem płynu szczelinującego, a właściwościami mechanicznymi skały złożowej [3]

\* metoda hydraulicznego szczelinowania połączona wykonaniem obsypki

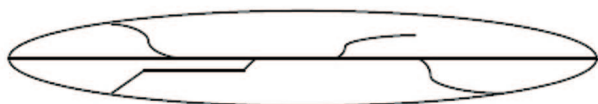
właściwej może być mały w mikroskali, ale w sumie przekłada się na znaczący wzrost tej powierzchni w makroskali. Ten wzrost pola powierzchni właściwej może być przyczyną zintensyfikowania desorpcji i/lub szybkości dyfuzji gazu z łupków. Ilość gazu produkowanego w wyniku desorpcji powinna być bezpośrednio powiązana z wielkością wyeksponowanego pola powierzchni. SRF mogą zwiększać pole powierzchni właściwej nowo utworzonych hydraulicznie szczelin.

Każda skała łupkowa jest niepowtarzalna ze względu na jej położenie geologiczne, litologię i mechanizm produkcji węglowodorów. Wybór rodzaju płynu szczelinującego jest jednym z ważniejszych punktów w procesie udostępniania formacji łupkowych. Na rysunku 3 zaprezentowano schemat doboru rodzaju płynu w zależności od właściwości mechanicznych skały łupkowej.

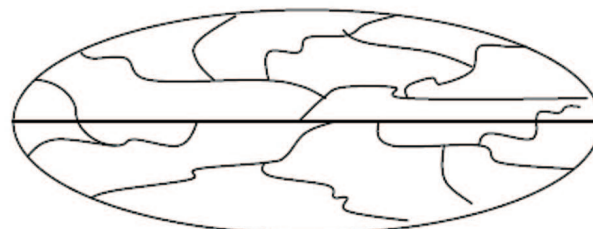
W celu pełnego zrozumienia tego schematu niezbędne jest wprowadzenie pojęcia zdolności złoża do jego szczelinowania lub też efektywnej stymulacji (*fracability*). Znalazienie obszarów w formacji łupkowej, które są zdolne do pęknięcia odgrywa ważną rolę w rozwoju sieci szczelin wystarczająco rozległych, aby objąć jak największą objętość skały i połączyć je z odwiertem w procesie hydraulicz-

go szczelinowania. Na rysunku 4 przedstawiono różnice w tworzącym się podczas hydraulicznego szczelinowania systemie szczelin w łupkach plastycznych i kruchych.

Tak więc w przypadku projektowania zabiegów szczelinowania w formacjach łupkowych o dużej plastyczności, charakteryzujących się małymi wartościami modułu Young'a i dużymi wartościami współczynnika Poisson'a, wybiera się raczej płyny o dużej lepkości, zbliżone do tych, którymi wykonuje się zabiegi w złożach konwencjonalnych (sieciowane żele polimerowe). Płyny zatłacza się wtedy z mniejszą wydajnością, powstaje dwuskrzydłowa szczelina o dużej przepuszczalności. Płyny tego typu są również wybierane w przypadku gdy skała charakteryzuje się wyższą przepuszczalnością, w celu zatłoczenia większych ilości podsadzki i w rzadkich przypadkach dla ograniczenia filtracji. Natomiast w przypadku łupków kruchych charakteryzujących się dużymi wartościami modułu Young'a i małymi wartościami współczynnika Poisson'a stosuje się cieczy o małej lepkości, tzw. „*slickwater*”, które zatłaczane są z dużymi wydajnościami. W wyniku zabiegu generowany jest system szczelin o małej przepuszczalności. Dodatkowo cieczy te są preferowane gdy skała charakteryzuje się małą zawartością ilów oraz nie wchodzi w reakcję z roztworami kwasów.



Mała zdolność do pęknięcia (plastyczne łupki) – geometria szczelin dla małych wartości modułu Young'a i dużych wartości współczynnika Poisson'a



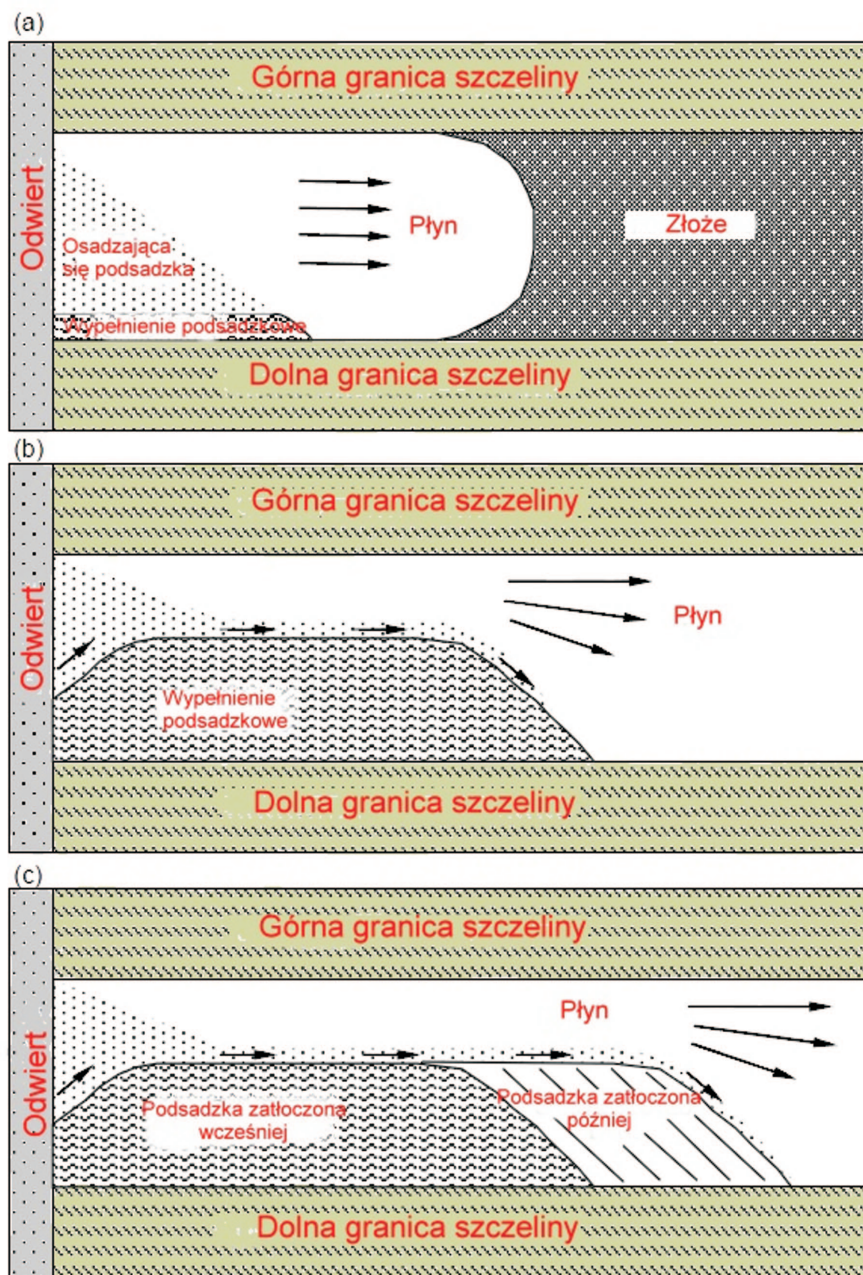
Duża zdolność do pęknięcia (kruche łupki) – geometria szczelin dla dużych wartości modułu Young'a i małych wartości współczynnika Poisson'a

Rys. 4. Geometria szczelin tworzonych w formacjach łupkowych o małej oraz dużej zdolności do szczelinowania [3]

### Transport podsadzki w płynach do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych

Jak już wspomniano wcześniej płyny typu „*slickwater*” są najczęściej stosowane do szczelinowania odwiertów w formacjach łupkowych i w złożach typu *tight gas*, ponieważ ich użycie sprzyja uzyskiwaniu dużych objętości złoża objętych szczelinowaniem SRV (*Stimulation Reservoir Volume*), przy kosztach niższych niż dla konwencjonalnych płynów szczelinujących. Właściwość, która czyni „*slickwater*” efektywną, a więc niską lepkość, jest również przyczyną słabych zdolności nośnikowych. Teoria osadzania się materiału podsadzkowego podczas zabiegów stymulacyjnych przy użyciu „*slickwater*” została

opracowana już w 1958 roku przez Kerns'a. Według niej początkowo podsadzka jest transportowana przez „*slickwater*” dzięki dużym wydajnościom tłoczenia i warunkom przepływu burzliwego, który występuje w odwiercie. Dane eksperymentalne wykazały jednak, że podsadzka będzie wytrącała się z płynu zaraz na wejściu do szczeliny w wyniku zmniejszenia szybkości przepływu i działania siły ciężkości, tworząc tzw. „bank” w pobliżu odwiertu (rysunek 5). Podczas trwania zabiegu będzie on zwiększał swoją wysokość aż do osiągnięcia stanu równowagi, w którym cały pozostały materiał podsadzkowy będzie



Rys. 5. Układanie podsadzki podczas zabiegu *Slickwater Fracturing* [8]

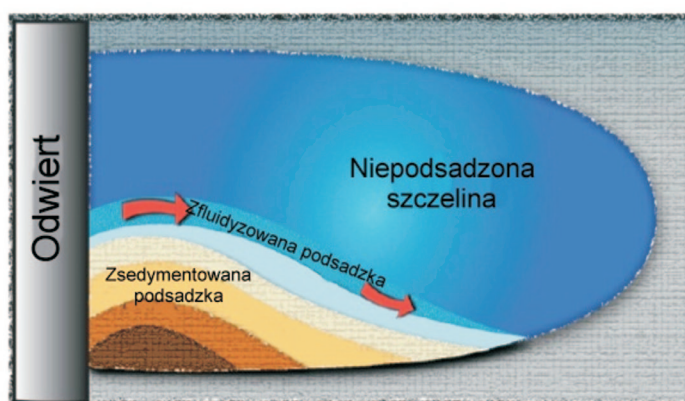
bardziej efektywnie przenoszony i osadzany na tylnym końcu „banku”. Eksperymenty wykazały ponadto, że podsadzka wprowadzona na początku zabiegu układa się najbliżej odwiertu, z kolei podsadzka wtłoczona na końcu zabiegu będzie osadzać się na najdalszym końcu szczeliny z dala od odwiertu. To osadzanie materiału podsadzkowego w „banku” będzie sprzyjało również tworzeniu najwyższej możliwej koncentracji wypełnienia podsadzkowego (*bed*) dla rozwartości tworzonych przez „*slickwater*”.

Taki mechanizm układania się podsadzki ma też swoje wady, ponieważ poza główną szczeliną rozkład materiału podsadzkowego jest bardzo słaby i większość utworzonego systemu szczelin pozostaje niepodszczona. Z kolei znaczna

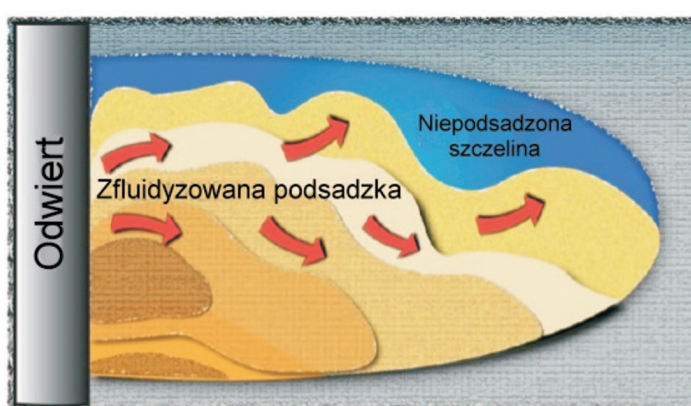
część produkcji złoża pochodzi z podsadzonych szczelin. W celu zmniejszenia szybkości sedymentacji stosuje się zazwyczaj materiały podsadzkowe o mniejszych rozmiarach, np. 400/210  $\mu\text{m}$  (40/70 mesh) czy nawet 297/105  $\mu\text{m}$  (50/140 mesh) [11]. Przy mniejszych średnicach ziaren materiał podsadzkowy ulega wolniejszej sedymentacji, dlatego większa jest również podsadzona objętość wewnątrz utworzonego systemu szczelin, skutecznie zwiększając objętość złoża objętą procesem stymulacji (SRV). Z drugiej jednak strony mniejsze średnice podsadzki redukują również przewodność szczeliny, co ma niekorzystny wpływ na oczyszczenie i wydajność odwiertu po zabiegu. Ta ostatnia może być dalej poprawiona poprzez użycie podsadzek

o większej średnicy, charakteryzujących się większą przewodnością. Takie podsadzki mogą być transportowane równie łatwo jak podsadzki o mniejszej średnicy, dzięki czemu w podobny sposób następuje wzrost objętości złoża objętej procesem stymulacji (SRV). W tym celu stosowane są np. ultralekkie materiały podsadzkowe, których gęstość względna odniesiona do wody wynosi 1,05, co pozwala im praktycznie unosić się na jej powierzchni [1]. Jest to prawie idealnie kulista podsadzka o gładkiej, błyszczącej powierzchni. Jednak tego typu materiał podsadzkowy jest bardzo drogi i w związku z tym koszty zabiegu mogą być znacznie podwyższone. Innym sposobem poprawy przenoszenia podsadzki jest zastosowanie tzw. modyfikatora transportu podsadzki (PTM), który jest dodatkiem do płynu „*slickwater*” [11]. Użycie tego środka powoduje utworzenie warstwy mikropęcherzyków dookoła każdego ziarna podsadzki. Zmienia to wyporność podsadzki, pozwalając na jej transport w sposób podobny jak w płynie o dużej lepkości czy podczas przepływu burzliwego. Modyfikacja wyporności powoduje również zmianę w metodzie transportu z „banku” – tego charakterystycznego dla „*slickwater*” – na bardziej równomierne ułożenie, podobne do konwencjonalnych płynów szczelinujących (rysunek 6).

Pozwala to na podsadzenie znacznie większej części wytworzonych szczelin, jak również na rozprowadzenie wewnątrz systemu szczelin większej ilości podsadzki.



Schemat przekroju szczeliny: konwencjonalny „*slickwater*”



Schemat przekroju szczeliny: „*slickwater*” z modyfikatorem transportu podsadzki

Rys. 6. Schematy transportu materiału podsadzkowego przez „*slickwater*” bez i z dodatkiem modyfikatora transportu podsadzki (PTM) [11]

### Podsumowanie i wnioski

1. Płyn szczelinujący, którego głównym zadaniem jest otwarcie szczeliny i transport materiału podsadzkowego wzdłuż jej długości, jest jednym z najważniejszych elementów decydujących o powodzeniu zabiegu hydraulicznego szczelinowania.
  2. Do szczelinowania złóż konwencjonalnych stosuje się zazwyczaj sieciowane ciecze oparte na polimerach naturalnych, takich jak guar i jego pochodne czy pochodne celulozy. Tego typu płyny ze względu na ich wysoką lepkość mają bardzo dobre właściwości nośnikowe.
  3. W złożach niekonwencjonalnych, do których zaliczamy złoża gazu zamkniętego (*tight gas*) czy w łupkach (*shale gas*) stosowanych jest szereg różnego rodzaju płynów, takich jak: sprężony i ciekły azot, gaz płynny (LPG), ciekły dwutlenek węgla, piany sporządzane na bazie roztworów polimerów liniowych, płyny na bazie
  4. środków powierzchniowo czynnych, płyny reaktywne oraz „*slickwater*”.
  5. Dla formacji łupkowych doboru płynu szczelinującego dokonuje się między innymi na podstawie właściwości mechanicznych danej skały złożowej. Najczęściej jednak stosowane są tzw. „*slickwater*”, które pomimo bardzo słabych właściwości nośnikowych pozwalają na osiąganie dużych wartości objętości złoża objętych szczelinowaniem (SRV), co z kolei przekłada się na zwiększoną późniejszą produkcję z odwiertu.
- Słabe właściwości nośnikowe tego typu cieczy niosą ze sobą konieczność użycia bardzo dużych ilości wody do ich sporządzenia, aby móc zatłoczyć do tworzonego systemu szczelin duże ilości materiału podsadzkowego. Jest on osadzany w szczelinach w sposób odmienny niż w złożach konwencjonalnych, tworząc tzw. „bank”



zaraz po wejściu z odwiertu do szczeliny. Dlatego podsadzka wprowadzona na początku zabiegu układa się najbliżej odwiertu, z kolei podsadzka wtłoczona na jego końcu będzie osadzać się w najdalszym końcu szczeliny z dala od odwiertu.

6. Ten mechanizm układania się podsadzki ma swoje wady, ponieważ poza główną szczeliną rozkład materiału pod-

sadzkowego jest bardzo słaby i większość utworzonego systemu szczelin pozostaje niepodszczadzona.

7. Obecnie trwają prace mające na celu ograniczenie tej bardzo szybkiej sedimentacji podsadzki poprzez zmniejszenie jej gęstości do wartości bliskich gęstości wody czy zastosowanie tzw. modyfikatorów transportu podsadzki, które są dodawane do płynów szczelinujących.

## Literatura

- [1] Brannon H. D., Kendrick D. E., Luckey E., Stipetich A.: *Multi-Stage Fracturing of Horizontal Wells Using Ninety-Five Quality Foam Provides Improved Shale Gas Production*. SPE 124 767, 2009.
- [2] Britt L.K., Smith M.B., Haddad Z., Lawrence P. Chipperfield S., Hellman T.: *Water-Fracs: We Do Need Proppant After All*. SPE 102 227, 2006.
- [3] Chong K. K., Grieser W. V., Passman A., Tamayo C. H., Modeland N., Burke B.: *A Completions Guide Book to Shale-Play Development: A Review of Successful Approaches Towards Shale-Play Stimulation in the Last Two Decades*. CSUG/SPE 133 874, 2010.
- [4] Coulter G. R., Gross B. C., Benton E. G., Thompson C. L.: *Barnett Shale Hybrid Fracs – One Operator’s Design, Application, and Results*. SPE 102 063, 2006.
- [5] Economides M. J., Nolte K. G.: *Reservoir Stimulation*. Third edition Houston TX, 2000.
- [6] Grieser B., Wheaton B., Magness B., Blauch M., Loghry R.: *Suface Reactive Fluid’s Effect on Shale*. SPE 106 815, 2007.
- [7] Grundmann S. R., Rodvelt G. D., Dials G. A., Allen R. E.: *Cryogenic Nitrogen as a Hydraulic Fracturing Fluid in the Devonian Shale*. SPE 51 067, 1998.
- [8] Handren P., Palisch T.: *Successful Hybrid Slickwater Fracture Design Evolution – An East Texas Cotton Valley Taylor Case History*. SPE 110 451, 2007.
- [9] Kasza P.: *Zabiegi stymulacji wydobycia w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów*. "Nafta-Gaz" 2011, nr 10.
- [10] King E. G.: *Thirty Years of Gas Shale Fracturing: What Have We Learned?* SPE 133 456, 2010.
- [11] Kostenuk N., Browne D.J.: *Improved Proppant Transport System for Slickwater Shale Fracturing*. CSUG/SPE 137 818, 2010.
- [12] Matyasik I., Słoczyński T.: *Niekonwencjonalne złoża gazu – shale gas*. "Nafta-Gaz", 2010, nr 3, s. 166–177.
- [13] Palisch T. T., Vincent M. C. Handren P. J.: *Slickwater Fracturing – Food for Thought*. SPE 115 766, 2008.
- [14] Tudor E. H., Nevison G. W., Allen S., Pike B.: *Case Study of a Novel Hydraulic Fracturing Method that Maximizes Effective Hydraulic Fracture Length*. SPE 124 480, 2009.
- [15] Yost II, Mazza A. B., Gehr J. B.: *CO<sub>2</sub>/Sand Fracturing in Devonian Shales*. SPE 26 925, 1993.



Dr inż. Piotr KASZA – adiunkt w Instytucie Nafty 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.



Dr inż. Marek CZUPSKI – adiunkt w Zakładzie Stymulacji Wydobycia Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu, Oddział Krosno. Zajmuje się realizacją prac naukowo-badawczych z zakresu intensyfikacji wydobycia węglowodorów z odwiertów przy zastosowaniu kwasowania i hydraulicznego szczelinowania. Autor i współautor opracowań i publikacji z tego zakresu.



Mgr inż. Klaudia WILK – absolwentka Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Rzeszowskiej. Asystentka w Zakładzie Stymulacji Wydobycia Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu Oddział Krosno. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z intensyfikacją wydobycia węglowodorów.