

Piotr Kasza

*Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno*

## Nowe technologie udostępniania złóż węglowodorów w otworach kierunkowych i poziomych

W ostatnich latach odwierty poziome i multilateralne odgrywają coraz ważniejszą rolę w udostępnianiu i wydobywaniu węglowodorów. Przy konstrukcji i wierceniu takich otworów zaangażowane są najnowsze zdobycze techniczne i technologiczne. Pociąga to za sobą także konieczność stosowania nowoczesnych technologii przy ich zbrojeniu, stymulacji i eksploatacji. W artykule przedstawiono kilka najnowszych rozwiązań technologicznych w tym zakresie, opracowanych specjalnie dla odwiertów poziomych i multilateralnych.

### New completion technologies for horizontal and multilateral wells

Horizontal and multilateral wells play very important role in production from oil and gas reservoir. It is necessary to use top techniques and technologies for designing and drilling this kind of wells. On the other hand novel techniques are necessary to realize completion, stimulation and production process. Few new completion and stimulation technologies for horizontal and multilateral wells are presented in this paper.

W pogoni za optymalizacją wykorzystania zasobów ropy naftowej i gazu ziemnego coraz większe znaczenie zaczynają odgrywać odwierty kierunkowe i poziome. Najnowsze trendy w tej dziedzinie to wiercenie otworów multilateralnych, czyli kilku odwiertów poziomych z jednego odwiertu pionowego. Statystyki podają, że ponad 10% z ok. 68 000 wierconych otworów rocznie stanowią właśnie odwierty multilateralne. Efektywne wiercenie i wykorzystanie odwiertów poziomych stało się możliwe dopiero przy odpowiednim rozwoju techniki i technologii wiertniczych, mimo że doświadczenia w tym zakresie sięgają lat 50. ubiegłego stulecia. Obecna technika pozwala na wiercenie kilku otworów poziomych lub kierunkowych z jednej lokalizacji i udostępnienie dowolnie wybranych formacji złożowych. Odwierty poziome i multilateralne potrafią zastąpić kilka odwiertów pionowych. Mimo, że koszty ich wiercenia i uzbrojenia są wyższe, to jednak takie aspekty jak: ograniczenie ilości rur okładzinowych i głowic, mniejsze problemy z lokalizacją urządzeń wiertniczych (istotne w wierceniach na morzu) oraz lepsze udostępnienie złoża, przemawiają na korzyść odwiertów poziomych i poziomych multilateralnych. Oczywiście przedsięwzięcia takie wymagają zastosowania zaawansowanej techniki i technologii, dlatego począwszy od etapu projektowania wiercenia wszystkie aspekty wiertnicze,

pomiarowe, eksploatacyjne, stymulacyjne i inne powinny być przemyślane i odpowiednio zaplanowane. Jest to konieczne dla pełnej kontroli odwiertów, efektywnego udostępnienia złoża i jego eksploatacji oraz wykonania różnych prac, z zabiegami intensyfikacji wydobywania łącznie. W przypadku odwiertów poziomych i multilateralnych zabiegi stymulacyjne stanowią etap udostępniania złoża.

Projektując otwór poziomy należy przewidzieć wszystkie możliwe sytuacje w odwiercie. Dotyczy to w szczególności udostępniania i stymulacji. Przede wszystkim uzbrojenie odwiertu i jego konstrukcja musi umożliwić wykonanie zabiegów stymulacyjnych. Najważniejsze jest uzbrojenie w rury; o odpowiedniej średnicy, wytrzymałości i odporności mechanicznej na ścieranie oraz odporności chemicznej na działanie środowiska wysoce korozyjnego. Wszystkie te wymagania niezbędne są do wykonywania zabiegów hydraulicznego szczelinowania, w czasie którego, przy wysokim ciśnieniu zatłaczane są duże objętości cieczy zabiegowych i materiału podsadzkowego. Odpowiednia wytrzymałość rur i ich średnica umożliwia zastosowanie wysokich ciśnień tłoczenia i może ograniczyć opory przepływu. Wykonywanie zabiegów kwasowania matrycowego i szczelinowania kwasem powoduje też chemiczne (korozyjne) i mechaniczne oddziaływania

na rury. Uzbrojenie odwiertu poziomego musi umożliwić interwencje z zastosowaniem Coiled Tubingu (CT) i różnych narzędzi montowanych na jego przewodzie, ponieważ wiele prac stymulacyjnych odbywa się przy jego wykorzystaniu.

Bardzo istotne z punktu widzenia zabiegów stymulacyjnych, a zwłaszcza zabiegów szczelinowania (z podsadzką lub kwasem), jest usytuowanie osi odwiertu. Z mechaniki wynika, że wytwarzana hydraulicznie szczelina będzie zawsze propagować w kierunku prostopadłym do minimalnych, głównych naprężeń poziomych górotworu. W przypadku odwiertów poziomych jest to na tyle istotne, że znając kierunek minimalnych naprężeń poziomych górotworu i odpowiednio kierując oś odwiertu możemy uzyskać wpływ na to, jak będą generowane szczeliny w stosunku do osi otworu. Schematycznie pokazuje to rysunek 1.

Wiedzę na temat ukierunkowania naprężeń górotworu w złożu można uzyskać np. z badań mikrosejsmicznych, wykonywanych przy okazji zabiegów hydraulicznego szczelinowania. W trakcie hydraulicznego szczelinowania można wytworzyć szczeliny o kierunku do osi otworu od prostopadłego do równoległego.

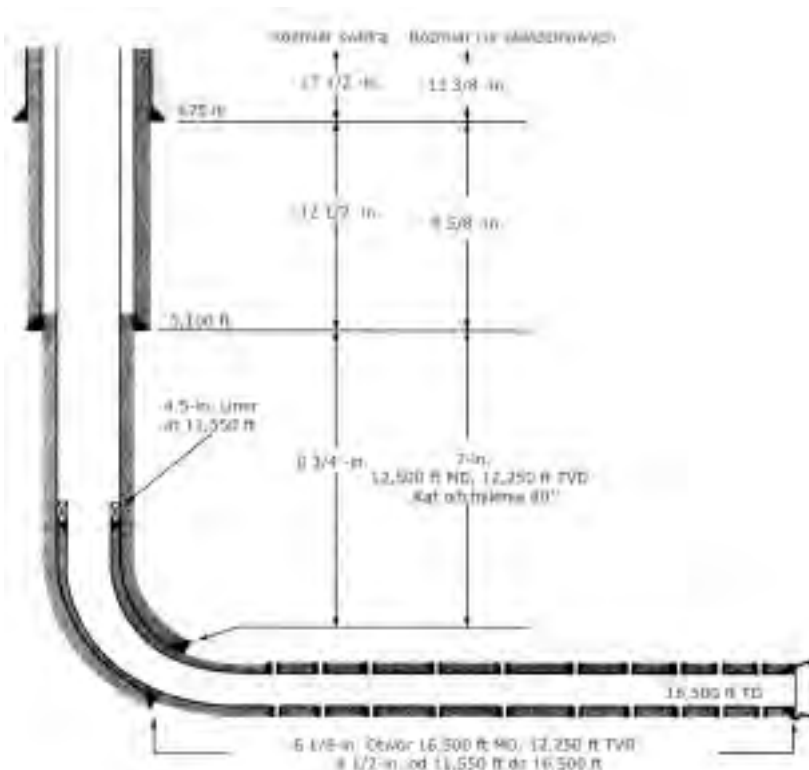
Kolejną cechą charakteryzującą odwierty poziome, wpływającą na technikę i technologię zabiegów stymulacyjnych, jest długi odcinek udostępniający interwał produkcyjny. Poziomą część odwiertu można zostawić bosą, a liner zacementować w ostatniej kolumnie rur okładzinowych i wprowadzić go w początkowy odcinek udostępniający złożu. Cały odwiert można uzbroić w liner, cementując go tylko w ostatniej kolumnie rur okładzinowych, a resztę pozostawić niecementowaną. Jedną z metod zbrojenia poziomego odcinka odwiertu jest cementowanie lineru w rurach okładzinowych i złożu, a następnie jego perforacja. W przypadku lineru niecementowanego stosuje się rury perforowane lub cięte i zapuszczane oraz perforowane już po ich zapuszczeniu do otworu i zacementowaniu w kolumnie rur okładzinowych. Rysunki 2 i 3 przedstawiają typowe uzbrojenie odwiertu poziomego oraz rysunek lineru perforowanego.

Kolejnym pozytywnym aspektem odwiertów poziomych jest możliwość znacznie doskonalszego udostępnienia

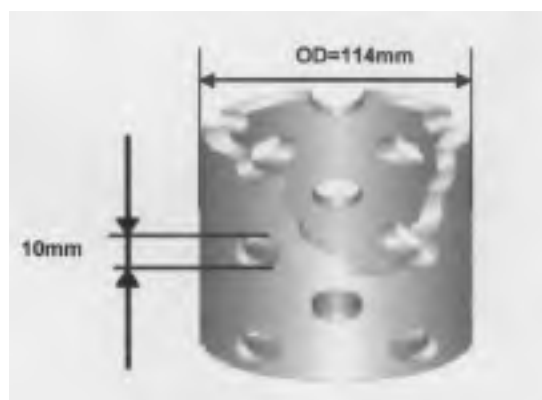
interwałów o niewielkiej miąższości. W przypadku ich udostępnienia w sposób klasyczny (otworem pionowym), kontakt odwiertu ze złożem jest ograniczony do miąższości złoża, natomiast w przypadku odwiertu poziomego powierzchnia kontaktu odwiertu ze złożem jest wielokrotnie większa, co w oczywisty sposób



Rys. 1. Kierunki generowania szczelin w odwiertach



Rys. 2. Typowe uzbrojenie odwiertu poziomego

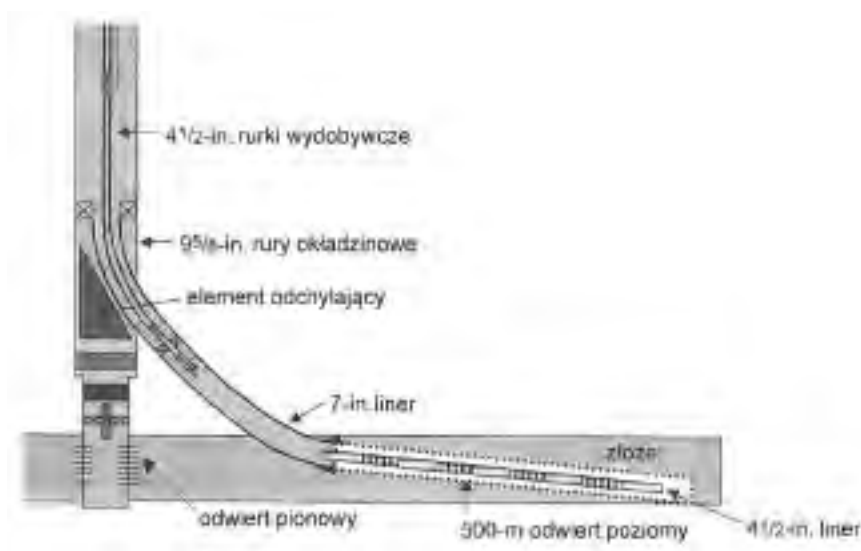


Rys. 3. Fragment perforowanego lineru

przekłada się na potencjał wydobywczy. Potwierdza to praktyka przemysłowa. Jako przykład podać można odwierty na złożu Changbei w Chinach. Jest to złożo gazu zlokalizowane w zbitych piaskowcach. Tradycyjnie udostępniane było odwiertami pionowymi, w których wykonywano zabiegi hydraulicznego szczelinowania. Rezultaty nie były zadowalające i w oparciu o obliczenia symulacyjne zdecydowano się na udostępnienie tego złoża odwiertami poziomymi. Z odwiertu pionowego wykonano odwiert poziomy o długości ok. 500 m. Pokazano to na rysunku 4.

W wyniku takiego udostępnienia uzyskano siedmiokrotny wzrost wydobywania w porównaniu do odwiertu pionowego oraz prawie dwukrotny wzrost wydobywania w porównaniu do odwiertu pionowego po zabiegu hydraulicznego szczelinowania.

Wykonanie odwiertu poziomego w strukturze o niewielkiej miąższości powoduje znaczne ograniczenia w możliwościach stymulacji metodą hydraulicznego



Rys. 4. Konstrukcja odwiertu na złożu Changbei w Chinach

szczelinowania. Jest to związane przede wszystkim z niekontrolowaną propagacją szczeliny podczas zabiegu, co może prowadzić do przebicia się w strefy wody podścielającej lub do czapy gazowej. Jednak w przypadku odwiertów poziomych i szczelin prostopadłych do osi otworu, rozwiązaniem jest wykonanie kilku mniejszych szczelin, które w zupełności zastępują jedną, większych rozmiarów.

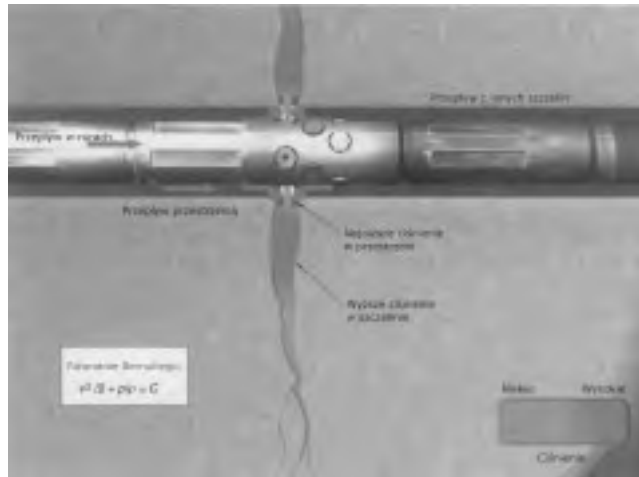
Nowatorskie techniki kierunkowania, wiercenia i wyposażania odwiertów poziomych, wymuszają stosowanie nowych, opracowanych specjalnie dla tych potrzeb technik i technologii stymulacyjnych. Dynamiczny rozwój tych metod rozpoczyna się z momentem prawdziwej ekspansji w wierceniu odwiertów kierunkowych, poziomych i multilateralnych, i przypada na początek lat 90. ubiegłego stulecia. Konieczność wykonywania efektywnych zabiegów stymulacyjnych wymusiła konieczność modyfikacji istniejących technik i technologii oraz opracowania zupełnie nowych rozwiązań, które z czasem stały się standardami w obróbce odwiertów poziomych i całkowicie wyparły stare, tradycyjne technologie. W okresie kilkunastu lat opracowano szereg technik stymulacyjnych. Niektóre z nich są już standardem w udostępnianiu i intensyfikacji odwiertów poziomych, natomiast inne są zupełnie nowatorskie i wciąż doskonalone. Z podstawowych technik stymulacyjnych wymienić należy:

- szczelinowanie z hydroperforacją (HJF – *Hydrajet Assisted Fracturing*),
- wytrącanie podsadzki (*Screen Out*),
- system wieloetapowy (*Multi Stage System*),
- system ograniczonego wejścia (*Limited Entry*).

### Szczelinowanie z hydroperforacją – *Hydrajet Assisted Fracturing*

HJF jest nową techniką stymulacyjną w odwiertach poziomych i nie ma jeszcze polskojęzycznej nazwy. Technikę tę można nazwać opisowo jako szczelinowanie z wykorzystaniem hydroperforacji. Technika została opatentowana, opisana i po raz pierwszy zastosowana w praktyce w 2000 roku. Ogólnie można ją sklasyfikować jako metodę łączącą trzy techniki: hydroperforacji, hydraulicznego szczelinowania i jednocześnie

iniekcji cieczy zabiegowej przestrzenią pierścieniową (pomiędzy przewodem CT a linerem). Technika HJF oparta jest na prawie Bernoulliego i prawie zachowania energii. Schematycznie przedstawiono to na rysunku 5.



Rys. 5. Zasada szczelinowania typu HJF

Zgodnie z równaniem Bernoulliego, przedstawionym na rysunku 5, przepływająca ciecz zabiegowa o dużym ciśnieniu trafia do dysz urządzenia zabiegowego i energia ciśnienia jest zamieniana na energię kinetyczną (prędkość wypływu cieczy). Wypływający z dyszy strumień cieczy o dużej prędkości powoduje, że wokół niego tworzy się obszar obniżonego ciśnienia. Jednocześnie, utrzymując odpowiednie ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej, następuje hydrauliczne uszczelnienie miejsca zabiegu (inicjacji szczeliny) i cały płyn jest kierowany w stronę wypływającego z dyszy strumienia. Wypływająca ciecz o dużej prędkości posiada zdolność działania abrazyjnego. Pozwala to na perforowanie lineru oraz tworzenie zagłębienia w skale złożowej. Uderzenie masy cieczy w skałę złożową powoduje zmniejszenie jej prędkości do zera i jednocześnie podniesienie ciśnienia do ciśnienia umożliwiającego propagację szczeliny (ciśnienie szczelinowania). Wtedy zwiększa się wydajności tłoczenia przestrzenią i przez CT, dodaje się materiał podsadzkowy i rozpoczyna klasyczne, hydrauliczne szczelinowanie (co ciekawe odbywa się ono pod ciśnieniem niższym od ciśnienia szczelinowania!). Dzięki działaniu uderzenia hydraulicznego w samej szczelinie uzyskuje się ciśnienie wyższe o kilkadziesiąt atmosfer od ciśnienia panującego w odwiercie. Wykonanie szczeliny zazwyczaj kończy się zwiększeniem koncentracji podsadzki, aż do uzyskania zakończenia zabiegu poprzez zapiaszczenie (*Screen Out*). Po wykonaniu jednej szczeliny w odwiercie po-

ziomym metodą HJF, Coiled Tubing z urządzeniem HJF przesuwają się wyżej i wykonują kolejną szczelinę.

### Wytrącenie podsadzki – *Screen Out*

Technika ta jest często stosowana przy hydraulicznym szczelinowaniu z zastosowaniem techniki HJF lub samodzielnie przy szczelinowaniu odwiertów poziomych, udostępniających interwały złożowe o niewielkiej miąższości. Jak już wcześniej zaznaczono, hydrauliczne szczelinowanie w cienkim interwale złożowym może prowadzić do przypadkowego otwarcia dopływu wody lub przebicia do czapy gazowej. Oba przypadki są skrajnie niekorzystne i mogą powodować znaczne utrudnienia w produkcji – z jej zaniechaniem włącznie. Dlatego w takich przypadkach niezmiernie istotne jest posiadanie mechanizmu umożliwiającego ograniczenie propagacji szczeliny w kierunku stropu i spągu interwału. Osiąga się to przez zastosowanie techniki wytrącania podsadzki (*Screen Out*). Technika ta ma dwie odmiany: *Screen Out* klasyczny, który polega na takim zwiększeniu koncentracji podsadzki w odpowiednim momencie, że na ścianie odwiertu następuje jej wytrącenie. Jest jej za dużo, by mogła przemieszczać się wraz z płynem do szczeliny. W tym momencie następuje gwałtowny wzrost ciśnienia i kończy się zabieg. Wykonanie tej operacji w odpowiednim momencie umożliwia zakończenie zabiegu w ściśle zaplanowanym czasie, nie pozwalając szczelinie na dalszą propagację. Inną odmianą jest *Tip Screen Out*. Polega on na dokładnym obliczeniu ilości cieczy wyprzedzającej (padu) tak, by jej filtracja do złoża zakończyła się w ściśle określonym momencie. Wtedy płynąca za cieczą wyprzedzającą podsadzka napotyka na szczelinę niewypełnioną cieczą i w niej się klinuje. Rozpoczyna to reakcję lawinową zatrzymania podsadzki – od czoła szczeliny do samej ściany odwiertu. Podobnie jak w poprzednim przypadku następuje gwałtowny wzrost ciśnienia i zakończenie zabiegu.

Celem obu tych technik jest zakończenie zabiegu hydraulicznego szczelinowania w ściśle określonym czasie i otrzymanie szczeliny o ściśle określonych wymiarach.

### System wieloetapowy – *Multi Stage System*

W zabiegach stymulacji wydobywania, w odwiertach poziomych kluczowym aspektem jest możliwość izolacji strefy zabiegu od pozostałej części otworu. Każda



z przedstawionych powyżej technik zawiera element izolacji i ukierunkowania zabiegu w ściśle wybraną strefę odwiertu poziomego. Kolejną techniką działającą na podobnej zasadzie jest system wieloetapowy. Polega on na fizycznej izolacji odpowiednich stref i wykonywaniu w nich kolejno zabiegów kwasowania matrycowego, szczelinowania kwasem lub szczelinowania z podsadzką. Do realizacji tego zadania zostało opracowane specjalne narzędzie – MSS (*Multi Stage Stimulation System*), który określić można ogólnie jako zestaw kilkunastu pakerów. Służy on do izolacji poszczególnych stref odwiertu poziomego i wykonywania zabiegów kolejno w poszczególnych strefach. Należy zaznaczyć, że system ten jest stosowany jedynie w odwiertach poziomych nieorurowanych.

### System ograniczonego wejścia – *Limited Entry*

Zabiegi hydraulicznego szczelinowania są zawsze wykorzystywane do znacznej poprawy wydajności wydobycia węglowodorów z odwiertu. Pokazana powyżej technika *Multi Stage* jest bardzo efektywna, natomiast w niektórych przypadkach jest też bardzo kosztowna i niestety ryzykowna. Alternatywą dla tego rodzaju

szczelinowania jest technika *Limited Entry* (technika do odwiertów z cementowanym linerem). Technika ta wykorzystuje opory, powstające na otworach perforacyjnych, do kontroli ilości cieczy przepływającej przez poszczególne segmenty perforacji. Technika ta polega na zróżnicowaniu perforacji w różnych strefach odwiertu poziomego. W miejscach wytypowanych do zabiegu projektuje się odpowiednio więcej otworów perforacyjnych o większej średnicy. W miejscach gdzie nie powinna powstać szczelina wykonuje się mniejszą ilość otworów lub pozostawia się je bez zmian. Wykonując zabieg hydraulicznego szczelinowania otrzymuje się miejsca w odcinku poziomym, gdzie opory na perforacji będą mniejsze i miejsca gdzie opory będą większe. Szczeliny zaczną powstawać w miejscach, gdzie opory będą mniejsze, gdyż większa część ciśnienia cieczy zabiegowej będzie wykorzystywana na tworzenie i propagację szczeliny.

Najnowsze osiągnięcia techniczne i technologiczne w dziedzinie udostępniania i stymulacji odwiertów kierunkowych, poziomych i multilateralnych mogły być dokonane tylko dzięki coraz większej skali, w jakiej wykorzystywane i stosowane są te techniki w przemyśle naftowym.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

### Literatura

- [1] Borovchuk A.V., Diyashev I., Lipyanin A.V., Grant D., Ousoltsev D., Batula K.K.: *Fracturing Treatments of openhole horizontal wells in western Siberia*. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow 2006.
- [2] East L., Rosato J., Farabee M., McDaniel B.W.: *New Multiple interval fracture stimulation technique without packers*. International Petroleum Technology Conference, Doha 2005.
- [3] East L., Willett R., Surjaatmadja J., McDaniel B.W.: *Application new fracturing technique improves stimulation success for openhole horizontal completions*. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette 2004.
- [4] Luan G., Li L., Nettelship G., Son van L., Hoekstra T., Deutman R., Veeman S., Wang H.: *Integrated development of the Changbei Tight Gas Project*. JPT, październik 2008.
- [5] Majdi Al. Murawa, Bader Al. Matar, Yousef Abdul Rahman, Hai Liu, Reda Kelkouli, Mean Razouqi: *Application of highly efficient multistage stimulation technique for horizontal wells*. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette 2008.



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.