

Piotr Kasza*

ROZWÓJ METOD STYMULACJI ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

1. WSTĘP

Zabiegi stymulacyjne wykonywane są w odwiertach produkujących ropę naftową i gaz ziemny. Ich celem jest zwiększenie wydajności oraz poprawa współczynnika szcerpania złóż. Zabiegi te można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- 1) Kwasowanie złóż – jest to proces umożliwiający oczyszczenie strefy przyodwiertowej (minimalizację skin efektu S spowodowanego procesem eksploatacji lub wykonywanymi wcześniej pracami w odwiercie). Podczas kwasowania płyn zabiegowy wtłaczany jest do złoża pod ciśnieniem mniejszym od ciśnienia szczelinowania.
- 2) Szczelinowanie kwasem – płyn kwasujący wtłaczany jest do złoża pod ciśnieniem większym od ciśnienia szczelinowania. Wykonywane jest w nisko przepuszczalnych złożach węglanowych i ma za zadanie utworzyć kanały komunikacyjne (o wysokiej przepuszczalności) w wyniku reakcji chemicznej cieczy kwasującej ze ścianami szczeliny.
- 3) Hydrauliczne szczelinowanie – wykonywane jest w złożach o małej i bardzo małej przepuszczalności. Zabieg ten polega na utworzeniu w złożu szczeliny o bardzo dużej przepuszczalności i przewodności zapewniającej jednocześnie większą powierzchnię kontaktu odwiertu ze złożem. Płyn szczelinujący wtłaczany jest do złoża pod ciśnieniem przekraczającym ciśnienie szczelinowania, zawiera on również materiał podsadzkowy umożliwiający podparcie wytworzonej szczeliny.

Zabiegi stymulacyjne są bezpośrednio związane z wydajnością odwiertu, dlatego sukces zabiegu intensyfikacyjnego wymaga najpierw dokładnej identyfikacji parametrów wpływających na produkcję odwiertu a następnie określenie czy stymulacja może zwiększyć wydajność.

Prawo Darcy'ego dla stanu ustalonego [1] i przepływu radialnego w najprostszej formie opisuje równanie (1):

* Instytut Nafty Gazu, Oddział Krosno

$$q = \frac{kh(p_e - p_{wf})}{\alpha_r B \mu \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} \quad (1)$$

gdzie:

- q – szybkość przepływu [m^3/dobe],
- k – przepuszczalność [mD],
- h – miąższość złoża [m],
- p_e – ciśnienie złożowe [bar],
- p_{wf} – ciśnienie dynamiczne na dnie odwiertu [bar],
- α_r – radialna stała proporcjonalności [–],
- B – współczynnik objętościowy medium nasycającego [m^3/m^3],
- μ – lepkość [$\text{mPa}\cdot\text{s}$],
- r_e – promień złoża [m],
- r_w – promień odwiertu [m],
- s – skin efekt [–].

Każda ze zmiennych po prawej stronie równania ma wpływ na wydajność odwiertu jednak szczególną uwagę inżynierów zajmujących się stymulacją przyciągają: przepuszczalność (k) i skin efekt (s). Obie wartości można ocenić z interpretacji testów ciśnienia w warunkach niestabilnych przeprowadzonych w danym odwiercie. Znajomość tych wielkości jest fundamentalna w procesie zaprojektowania zabiegu, oraz analizy i oceny pozabiegowej.

Jak łatwo zauważyć, niska wartość przepuszczalności (k), oraz/lub wysoka wartość skin (s) mają wpływ na zmniejszanie wydajności odwiertu (q), w związku z tym:

- Kwasowanie matrycy skalnej jest wykonywane w celu zmniejszenia wartości współczynnika s wynikłego z uszkodzenia przepuszczalności podczas prac udostępniających lub produkcji. Jeżeli zasięg kwasowania jest większy niż zasięg strefy uszkodzonej, można uzyskać wzrost k .
- Szczelinowanie kwasem stosuje się w złożach węglanowych o małej przepuszczalności k powodując jej zwiększenie poprzez wytrawienie szczeliny lub systemu szczelin o dużym zasięgu.
- Hydrauliczne szczelinowanie stosuje się w złożach o bardzo małym współczynniku przepuszczalności k . Szczelinowanie nie powoduje wzrostu przepuszczalności złoża, lecz poprawia wydajność poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu odwiertu ze złożem. Wzrost produkcji zachodzi więc w wyniku efektywnego wzrostu promienia odwiertu r_w .

2. TRANSFORMACJA TECHNICZNA

Druga połowa lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia to czas transformacji technologicznej w całej branży zajmującej się poszukiwaniem i eksploatacją ciekłych węglowodorów.

Poważne zmiany nastąpiły również w dziedzinie stymulacji złóż. Początek tych zmian związany jest z zakupem nowej floty do wykonywania zabiegów stymulacyjnych oraz nowoczesnego laboratorium do przygotowywania nowych technologii i obsługi prac intensyfikacyjnych. Z perspektywy czasu można mówić o dwóch epokach przed i po transformacji technicznej.

Pierwsza z nich to okres poprzedzający poczynione inwestycje sprzętowe. Prace intensyfikacyjne wykonywane były przy użyciu prostego sprzętu zabiegowego. Nie pozwalał on stosowania nowoczesnych rozwiązań technologicznych ze względu na brak możliwości precyzyjnego podawania ciekłych i suchych materiałów chemicznych. Stosowane cieczki zabiegowe do hydraulicznego szczelinowania ograniczały się jedynie do wykorzystania wodnych roztworów syntetycznych polimerów na bazie poliakrylamidu. Stosowanie tego polimeru powodowało duże trudności z łamaniem lepkości i prawidłowym oczyszczaniem szczeliny po wykonaniu zabiegu. Powodowało to obniżeniem efektywności zabiegów.

Kolejnym słabym punktem ówczesnych technologii był brak informacji dotyczących efektywności stosowania różnych materiałów podsadzkowych. Z konieczności stosowany był jedynie sortowany piasek kwarcowy. Niestety nie jest to materiał, który może być stosowany do zabiegów w złożach zalegających na większych głębokościach. W zakresie zabiegów kwasowania dominowały również proste techniki sprowadzające się do używania tradycyjnych roztworów kwasów z dodatkami krajowych środków powierzchniowo czynnych. Kolejne minusy technik stymulacyjnych polegały na braku możliwości rejestracji parametrów zabiegów tj. ciśnienie tłoczenia, wydajność, gęstość cieczy zabiegowej itp. Bez tych danych nie była możliwa interpretacja wykonanych stymulacji jak również przygotowanie się do nich. W związku z powyższym nie było możliwe też stosowanie specjalistycznego oprogramowania służącego do projektowania i analizy zabiegów stymulacyjnych. Odczuwalny był brak odpowiedniego zaplecza laboratoryjnego. Stan techniki stymulacyjnej do połowy lat dziewięćdziesiątych pozwalał jedynie na wykonywanie dosyć prostych a czasami wręcz archaicznych zabiegów intensyfikacyjnych.

Jak już zaznaczono wcześniej druga połowa lat dziewięćdziesiątych to czas poważnych inwestycji w infrastrukturę zabiegową. Zakupiono kompletną flotę do wykonywania zabiegów stymulacyjnych. W jej skład weszły 4 nowoczesne agregaty pompowe, urządzenie do sporządzania cieczy zabiegowych – blender, transporter materiałów podsadzkowych, urządzenia sterujące – rejestrujące zamontowane w samochodzie technologicznym VAN. Urządzenia te pokazano na rysunku 1.

Dopełnieniem inwestycji sprzętowych był zakup kompletnego laboratorium do przygotowania technologii i obsługi zabiegów stymulacyjnych. W skład laboratorium weszły stanowiska badawcze do badania własności reologicznych cieczy zabiegowych w warunkach dynamicznych (rys. 2), stanowisko do kompleksowych badań materiałów podsadzkowych (rys. 3), urządzenia do badań szybkości reakcji cieczy zabiegowych ze skałami złożowymi oraz stanowisko do symulacji zabiegów kwasowania na próbkach skał złożowych. Ponadto laboratorium wyposażono w pomocniczy sprzęt laboratoryjny.



Rys. 1. Nowoczesny sprzęt do zabiegów stymulacyjnych



Rys. 2. Stanowisko do badań cieczy szczelinujących



Rys. 3. Stanowisko do badań materiałów podsadzkowych

3. TRANSFORMACJA TECHNOLOGICZNA

Poczynione inwestycje sprzętowe zostały uzupełnione inwestycjami typu „know how”. W ramach kontraktów na zakup sprzętu zabiegowego i laboratoryjnego prowadzone były szkolenia z zakresu transferu wiedzy i technologii. Dopiero połączenie zakupu nowoczesnego sprzętu oraz zdobyta w trakcie kursów i szkoleń wiedza i doświadczenie, dawały podstawy do wdrażania nowoczesnych technologii stymulacyjnych w krajowym przemyśle naftowym. W początkowym okresie transformacji technologicznej główne potrzeby i zainteresowanie skierowane zostały w obszar hydraulicznego szczelinowania z podsadzką.

Rozpoczęto prace badawcze nad przygotowaniem nowych technologii zabiegowych opartych na stosowaniu sieciowanych polimerów typu HPG oraz CMHPG jako bazowe ciecze do hydraulicznego szczelinowania. W tym czasie opracowano dwa rodzaje cieczy zabiegowych. Jedna z nich przeznaczona była do wykonywania hydraulicznego szczelinowania z podsadzką w złożach o temperaturze do 90°C. Ciecz ta bazowała na HPG sieciowanym związkami boru. Druga ciecz zabiegowa dedykowana była do zabiegów w temperaturze powyżej 90°C. Opierała się ona na CMHPG sieciowanym związkami cyrkonu. W skład obu cieczy wchodziło szereg dodatków poprawiających ich efektywność. Należały do nich dodatki zapobiegające pęcznieniu minerałów ilastych, powstawaniu emulsji z płynami złożowymi jak również dodatki powodujące łamanie lepkości i umożliwiające odbiór cieczy po wykonaniu zabiegu. Zaznaczyć tu należy, że technologie te przygotowane były na bazie nowoczesnej chemii zabiegowej stosowanej przez wszystkie największe firmy serwisowe (rys. 4).



Rys. 4. Ciecz szczelinująca

Równoległe z wdrażaniem technologii płynowych trwały badania nad materiałami podsadzkowymi. W pierwszej kolejności badano komercyjne materiały podsadzkowe w celu poznania ich pełnych charakterystyk [2, 3]. Badano również zależność przewodności hydraulicznej w funkcji ciśnienie zamknięcia szczeliny w różnych temperaturach [4]. Te wstępne badania umożliwiły prawidłowy indywidualny dobór odpowiedniej klasy materiału podsadzkowego do planowanego zabiegu szczelinowania. W ramach prac badawczych nad materiałami podsadzkowymi w INiG przygotowano technologię wykonania nowego materiału podsadzkowego. Polegało to na wykonaniu oryginalnej powłoki żywicznej na ziarnach piasku kwarcowego, co w znacznym stopniu zwiększyło możliwość jego stosowania.

Następne prace badawcze w zakresie hydraulicznego szczelinowania dotyczyły przygotowania cieczy zabiegowej do złóż o dużej zawartości minerałów ilastych, wrażliwych na działanie wody. Wynikiem tych prac było przygotowanie cieczy szczelinującej na bazie żelowanych i sieciowanych węglowodorów (ropy, oleju napędowego itp.) (rys. 5).

Przygotowanie tej technologii umożliwiło rozszerzenie zakresu stosowania metody hydraulicznego szczelinowania.

Rozwój technologii stymulacyjnych w obszarze kwasowania i szczelinowania kwasem w ostatnich latach był równie znaczący. Podstawą tego rozwoju stały się prace badawcze nad efektywnością zabiegów kwasowania w piaskowcach i skałach węglanowych. Pierwszy etap prac dotyczył zwiększenia efektywności kwasowania złóż zlokalizowanych w piaskowcach ze szczególnym uwzględnieniem czerwonego spągowca. W wyniku szeregu prac oraz prób przemysłowych opracowano skuteczną i efektywną metodę dwuetapowego kwasowania. Metoda ta z powodzeniem jest stosowana do dziś.



Rys. 5. Ciecz szczelinująca na bazie ropy

Drugi etap prac nad technologiami kwasowania dotyczył opracowania efektywnej technologii kwasowania matrycowego złóż węglanowych o wysokiej temperaturze złożowej. Prace te ukierunkowane zostały pod kątem stymulacji odwiertów udostępniających złoża BMB. Ze względu na wysoką temperaturę tego złoża, głównym celem prac było przygotowanie cieczy technologicznej o niskiej szybkości reakcji ze skałą złożową. Badania te były wykonane w dwu etapach. Pierwszy z nich polegał na przygotowaniu różnych cieczy kwasujących i badaniu ich szybkości reakcji ze skałą złożową. W przypadku uzyskania znaczącego obniżenia szybkości reakcji w porównaniu do tradycyjnych cieczy kwasujących, przystępowano do badań typu „core flow” mających na celu potwierdzenie skuteczności danej cieczy. Efektem tych prac było przygotowanie do wdrożenia cieczy kwasującej na bazie emulsji ropno-kwasowej (rys. 6 i 7).

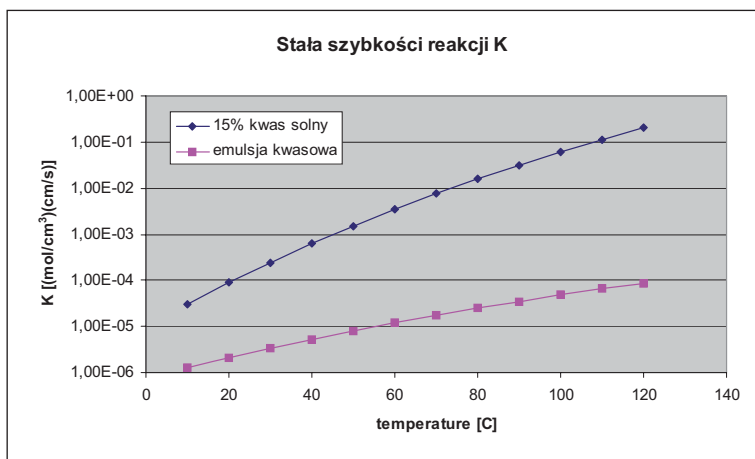
Kolejnym etapem wdrażania nowych cieczy zabiegowych było przygotowanie technologii i cieczy technologicznej do zabiegów szczelinowania kwasem. Dla potrzeb tego typu zabiegów przygotowano ciecz roboczą na bazie żelowanych kwasów.

Dzięki tej technice otrzymuje się ciecz na bazie kwasu o dużej lepkości. Duża lepkość umożliwia otwarcie i propagację szczeliny, natomiast zawarty w niej kwas powoduje wytrawianie ścian szczeliny, przez co uzyskuje się wytrawione powierzchnie szczelin spełniające rolę kanałów komunikacyjnych (rys. 8).

Należy jednocześnie nadmienić, że stosowanie przedstawionych nowoczesnych technologii zabiegowych powinno być dokładnie zaplanowane i precyzyjnie wykonane. Możliwe jest to dzięki wykorzystaniu profesjonalnych programów komputerowych. W chwili obecnej w stymulacji wykorzystywane są dwa programy.

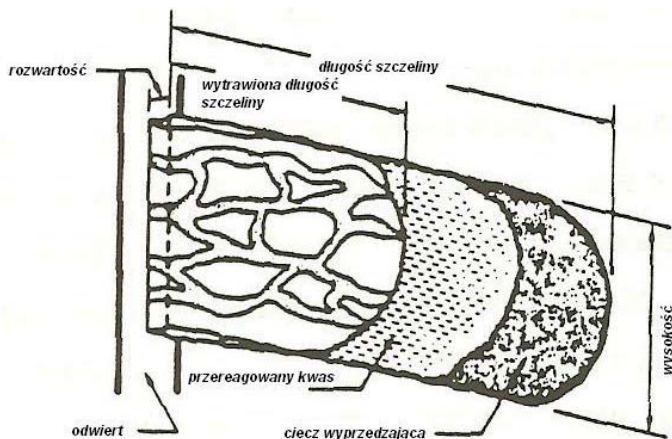


Rys. 6. Emulsja ropno-kwasowa



Rys. 7. Stała szybkości reakcji roztworu kwasu i emulsji ropno-kwasowej

Do projektowania i analizy zabiegów hydraulicznego szczelinowania użyto programu FracPro, a do projektowania i analizy zabiegów kwasowania matrycowego programu StimPT. Są to niezwykle przydatne narzędzia, które w znacznej mierze ułatwiają i przyspieszają proces przygotowania zabiegów. Umożliwiają optymalizację zabiegów, ich szczegółową analizę i opracowanie wytycznych dla planowanych zabiegów.



Rys. 8. Szczelinowanie kwasem

4. OSIĄGNIĘCIA I EFEKTY PRAC STYMULACYJNYCH

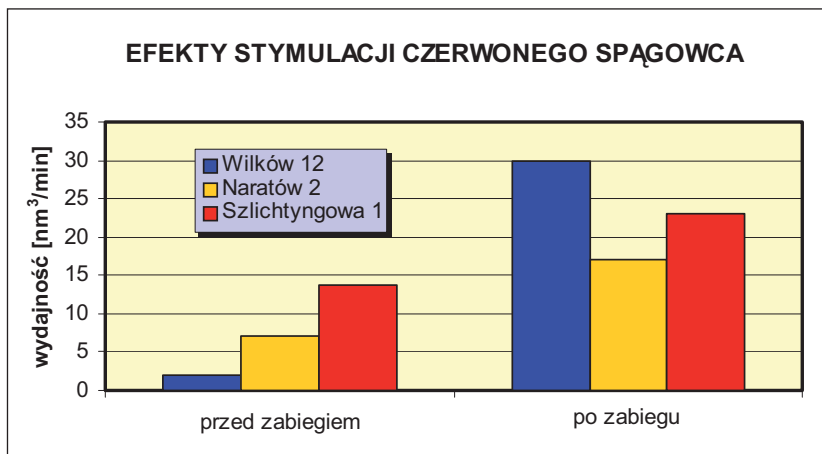
Program transferu technologii, liczne szkolenia oraz wspieranie prac badawczych umożliwiły szybkie wdrożenie nowych technologii do praktyki przemysłowej. Jednym z pierwszych zabiegów stymulacyjnych wykonywanych nowym sprzętem zabiegowym w oparciu o opracowane technologie było zabieg w odwiercie Wostoczno Poltawska 8 (Ukraina). Było to hydrauliczne szczelinowanie z podsadzką, złoża gazu ziemnego, zlokalizowanego w głęboko zalegającym (4480 m), niskoprzepuszczalnym (0,11 mD) piaskowcu. Zabieg wykonano przy użyciu cieczy szczelinującej na bazie sieciowanego HPG. Jako materiał podsadzkowy zastosowany został granulat ceramiczny o nazwie handlowej Interprop, gwarantujący odpowiednią wytrzymałość na naprężenia ściskające powodujące zamykanie szczeliny. Strona ukraińska potwierdziła, że w wyniku przeprowadzonego zabiegu szczelinowania wydajność odwiertu przy założonej depresji ciśnienia wzrosła z 40 [Nm³/min] do 160 [Nm³/min].

Następnie z dużym powodzeniem technologie hydraulicznego szczelinowania były stosowane w kraju, jednak ilość wykonywanych zabiegów nie była zbyt duża.

Dopiero w ostatnich trzech latach nastąpił znaczny wzrost aktywności. W tym czasie wykonano kilkanaście zabiegów szczelinowania na Białorusi uzyskując zwiększenie wydajności w odwiertach eksploatujących ropę naftową. W przeciągu ostatnich miesięcy serwis stymulacyjny wykonywał zabiegi hydraulicznego szczelinowania na złożach ropy naftowej w Kazachstanie. Do chwili obecnej wykonano 14 zabiegów na złożach ropy Nurżanow i Zachodnia Prorwa. W tym rejonie stosowano dwa typy cieczy zabiegowej. Pierwsza z nich na bazie sieciowanego HPG, druga natomiast na bazie sieciowanego CMHPG. Wyniki tych zabiegów są pozytywne i bardzo prawdopodobna wydaje się kontynuacja prac stymulacyjnych w tym rejonie.

pozytywne rezultaty i duże osiągnięcia można odnotować również w zakresie wdrażania nowych technologii w zakresie kwasowania matrycowego. Pierwszym znaczącym sukcesem

było zastosowanie technologii kwasowania dwuetapowego odwiertów udostępniających złoża gazu ziemnego zlokalizowane w utworach czerwonego spągowca. Pierwszy etap polegał na usunięciu lepszczu węglanowego przy użyciu odpowiednio przygotowanego roztworu kwasu solnego, natomiast drugi etap polegał na usuwaniu minerałów ilastych za pomocą mieszaniny roztworów kwasu solnego i fluorowodorowego. Zabiegi takie wykonano między innymi w trzech odwiertach: Wilków 12, Naratów 2 i Szlichtyngowa 1. W wyniku przeprowadzonych prac uzyskano w każdym z odwiertów wzrost wydajności gazu. Pokazano to na rysunku 9.



Rys. 9. Wyniki zabiegów stymulacji w czerwonym spągowcu

Kolejnym dużym osiągnięciem było opracowanie technologii kwasowania złóż węglanowych o wysokiej temperaturze złożowej (BMB). Wyzwaniem technologicznym było w tym przypadku znaczne ograniczenie szybkości reakcji pomiędzy cieczą kwasującą a skałą złożową. Osiągnięto to poprzez emulgowanie roztworu kwasu solnego i ropy naftowej w odpowiednich proporcjach. Technologia ta została sprawdzona podczas pilotażowego zabiegu w odwiercie Buk 14. Po uzyskaniu pozytywnych wyników tego zabiegu wdrożona została do przemysłowego stosowania w odwiertach złoża BMB (rys. 10).

W oparciu o tą technologię wykonano kilkanaście zabiegów kwasowania matrycowego. Wyniki niektórych z nich zaprezentowano w tabelach 1 i 2

Wyniki wykonanych zabiegów kwasowania potwierdziły skuteczność i efektywność tej technologii dla złoża BMB. Jest one w chwili obecnej stosowana jako standardowa metoda usuwania uszkodzenia strefy przyodwiertowej na tym złożu.

Pozytywne rezultaty wykonywanych zabiegów stymulacyjnych pozwoliły na eksport usług i ugruntowanie pozycji grupy serwisowej. Jak wspomniano wykonywała ona już zabiegi na Ukrainie, Białorusi i w Kazachstanie.



Rys. 10. Zabieg kwasowania matrycowego na złożu BMB

Tabela 1

Wyniki stymulacji odwiertów ropnych na złożu BMB

Odwiert	Przed zabiegiem			Po zabiegu		
	Q [t/24 h]	ΔP [MPa]	PI [t/24 h/MPa]	Q [t/24 h]	ΔP [MPa]	PI [t/24 h/MPa]
Odwi.1	100	10	10,0	140	6,8	20,6
Odwi.2	75	7	10,7	110	0,78	141,0

Tabela 2

Wyniki stymulacji odwiertów gazowych na złożu BMB

Odwiert	ΔP [%]	Przed zabiegiem	Po zabiegu
		V_n [nm ³ /min]	V_n [nm ³ /min]
Odwi.3	5,0	40	180
Odwi.4	3,0	185	240
Odwi.5	4,6	200	360

Dobra i efektywna współpraca pomiędzy serwisem i laboratorium potwierdzona pozytywnym wynikiem zabiegów umożliwiła też pozyskanie nowych klientów na usługi badawcze. Od kilku lat laboratorium współpracuje w zakresie badań dla potrzeb stymulacji z firmami z Ukrainy, Niemiec, Austrii i Wenezueli.

LITERATURA

- [1] Economides M.J., Nolte K.G.: *Reservoir stimulation*. Houston, Texas 1989
- [2] American Petroleum Institute: *Recommended practice for testing high strength proppants used in hydraulic fracturing operations*. API RP 60, Dallas, Texas 1989
- [3] American Petroleum Institute: *Recommended practice for testing sand used in hydraulic fracturing operations*. API RP 56, Dallas, Texas 1983
- [4] American Petroleum Institute: *Recommended practice for evaluating short therm proppant pack conductivity*. API RP 61, Dallas, Texas 1989