

Marek Czupski

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Ocena efektywności kwasowania matrycowego formacji węglanowych

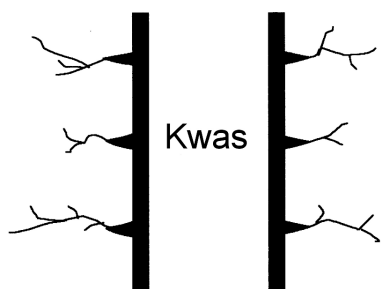
Wstęp

Kwasowanie matrycowe jako metoda stymulacji wydobywania ma zastosowanie zarówno w formacjach piaszczystych, jak i węglanowych. W tych pierwszych zabieg ma na celu głównie rozpuszczenie lub usunięcie uszkodzenia perforacji oraz przestrzeni porowej formacji w pobliżu odwiertu. Kwas przepływając przez system porów rozpuszcza zalegające w nim ciała stałe oraz minerały i ziarna uwięzione w zwężeniach porów. Natomiast w formacjach węglanowych kwas rozpuszcza skałę w sposób niejedno-

rodny, tworząc kanały o dużej przepuszczalności – zwane otworami robaczkowymi (rysunek 1) [4].

Otwory robaczkowe tworzą się z powodu naturalnej niejednorodności przepuszczalności matrycy skalnej, w związku z którą przepływ cieczy kwasującej jest zróżnicowany. W obszarach gdzie szybkość przepływu jest wyższa następuje większe rozpuszczanie matrycy. Kanały mogą tworzyć się bardzo szybko, ponieważ opór przepływu jest w nich nieznaczny, w porównaniu do otaczającej je (oryginalnej) przestrzeni porowej.

W naturalnie szczelinowatych złożach węglanowych otwory robaczkowe łączą ze sobą istniejące szczeliny, tworząc długie i głęboko penetrujące w formację kanały przepływowe. W formacjach pozbawionych naturalnych szczelin długość otworów robaczkowych może wynosić od około 1 do 2 m. Przepuszczalność strefy przyodwiertowej zawierającej otwory robaczkowe jest zwykle kilka rzędów wielkości większa od oryginalnej przepuszczalności skały. Po zabiegu możliwe są więc do osiągnięcia wartości współczynnika „skin” równe od -2 do -4 .



Rys. 1. Tworzenie otworów robaczkowych podczas kwasowania formacji węglanowej [4]

Wpływ struktury otworów robaczkowych na powodzenie zabiegu matrycowego kwasowania węglanów

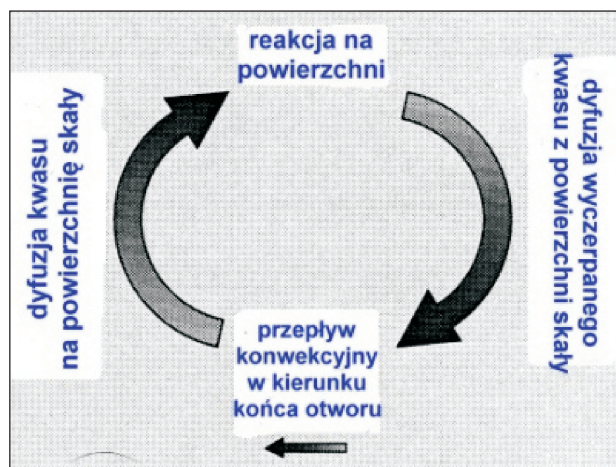
Jak już wspomniano we wstępie, efektywność zabiegów kwasowania matrycowego skał węglanowych zależy przede wszystkim od: struktury, geometrii i głębokości penetracji otworów robaczkowych w formację. Istnieje wiele możliwych struktur kanalików, które mogą być tworzone podczas reakcji kwasu ze skałą węglanową, a zależą one od [1, 3]:

- szybkości tłoczenia płynu,
- szybkości reakcji powierzchniowej,

- szybkości dyfuzji kwasu,
- szybkości konwekcji kwasu wzdłuż otworu robaczkowego,
- filtracji płynu z otworów robaczkowych.

Schemat przepływu kwasu w otworze robaczkowym przedstawiono na rysunku 2 [2]:

Szybkość reakcji powierzchniowej wskazuje jak szybko kwas reaguje z węglanem na jego powierzchni, podczas gdy szybkość dyfuzji opisuje jak szybko kwas jest trans-



Rys. 2. Schemat przepływu kwasu w otworze robaczkowym [2]

portowany z masy płynu do powierzchni skały. Najwolniejszy z tych dwóch czynników decyduje o całkowitej szybkości reakcji kwasu ze skałą, a w związku z tym – bezpośrednio wpływa na czas wyczerpywania się tego pierwszego. Otwory robaczkowe tworzą się tylko wtedy, gdy szybkość dyfuzji odpowiada za całkowitą szybkość reakcji – co ma miejsce, gdy szybkość reakcji kwas/skała jest duża. W przypadku zastosowania roztworów HCl, w wapieniach proces tworzenia otworów robaczkowych zachodzi w temperaturach powyżej 0°C, a w dolomitach – powyżej 50°C (mniejsza szybkość reakcji).

Parametry kinetyczne są przede wszystkim funkcją właściwości płynu stymulacyjnego i skały złożowej oraz temperatury. Innym zjawiskiem, które również bardzo mocno wpływa na strukturę tworzonych otworów robaczkowych, jest filtracja płynu kwasującego z głównych kanałów do mniejszych porów. Im jest ona większa tym otwory są bardziej rozgałęzione, ale krótsze, ponieważ mniejsza ilość „żywego” kwasu jest dostarczana do końca głównego kanału w celu jego głębszej propagacji w głąb formacji.

Dla każdej formacji złożowej i warunków w niej panujących oraz płynu kwasującego będzie istniało pewne optimum kombinacji szybkości tłoczenia i kinetyki reakcji. Fredd i Miller następująco sklasyfikowali główne typy rozpuszczonych struktur [3]:

- **Rozpuszczanie czołowe** (brak otworów robaczkowych) – przy niskich szybkościach tłoczenia i dużej reaktywności kwas nie penetruje odpowiednio w formację i rozpuszcza tylko jej czoło. Nie występuje więc tworzenie otworów robaczkowych z dala od odwiertu. Mechanizm rozpuszczania jest bardzo nieefektywny.
- **Kanały stożkowe** – ich powstawanie zachodzi dla dużych szybkości tłoczenia i/lub niższej reaktywności

kwas/skała. Płyn reaguje głównie na ścianach utworzonego początkowo kanału, co prowadzi do powstania pojedynczego, szerokiego otworu o stożkowym kształcie. Ten model rozpuszczania jest typowy dla silnego kwasu (np. HCl), którego reakcja nie jest opóźniana, zatłaczanego nawet przy dużej szybkości. Proces ten następuje, ponieważ kwas zostaje zużyty na ścianach kanału, a nie jest transportowany na jego koniec – co stanowi warunek istotnego wydłużenia kanału lub utworzenia innych kanałów porowych.

- **Dominujące otwory robaczkowe** – występują dla wyższych szybkości tłoczenia i dla opóźnionych lub wolniej reagujących kwasów. Transportowane są wtedy (przed wyczerpaniem) do końca tworzonych kanałów, co powoduje ich wydłużanie. W wyniku tego tworzą się cieńsze, ale głębiej penetrujące otwory robaczkowe. Możliwe jest również powstanie pewnej ilości rozgałęzień, gdy reaktywny płyn będzie wtłaczany w mniejsze pory przy wyższych szybkościach przepływu. Zazwyczaj dominujący otwór robaczkowy reprezentuje optymalną kombinację szybkości tłoczenia i reaktywności, gdyż ma największą szansę dotarcia poza strefę uszkodzenia. Charakteryzuje się on również dostateczną przewodnością, zapewniającą znaczący przepływ mediów do odwiertu.
- **Rozgałęzione otwory robaczkowe** – przy bardzo dużych szybkościach tłoczenia roztwór kwasu może być wciskany w mniejsze pory, co prowadzi do dużego rozgałęzienia powstającej struktury. Zjawisko to jest niekorzystne, gdyż znacznie ogranicza penetrację otworów robaczkowych.
- **Równomierne rozpuszczanie** – występuje przy ekstremalnie dużych szybkościach tłoczenia lub małej szybkości reakcji pomiędzy kwasem a skałą złożową. W takich warunkach ciecz kwasująca transportowana jest do większości porów matrycy, rozpuszczając ją na powierzchni kontaktu.

Na rysunku 3 przedstawiono podstawowe typy struktur otworów robaczkowych [5].

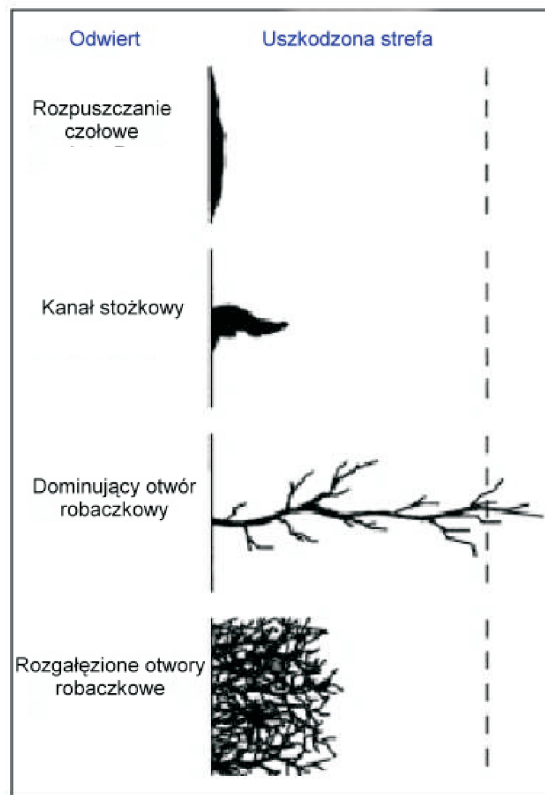
Aby zrozumieć, która ze struktur otworów robaczkowych tworzonych podczas zabiegu kwasowania jest najbardziej korzystna z punktu widzenia przyszłej produkcji, na rysunku 4 przedstawiono wyniki prostych obliczeń wartości współczynnika „skin” – wykonanych przez Buijse i van Domelen przy użyciu wzoru Hawkins’a [1]:

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (1)$$

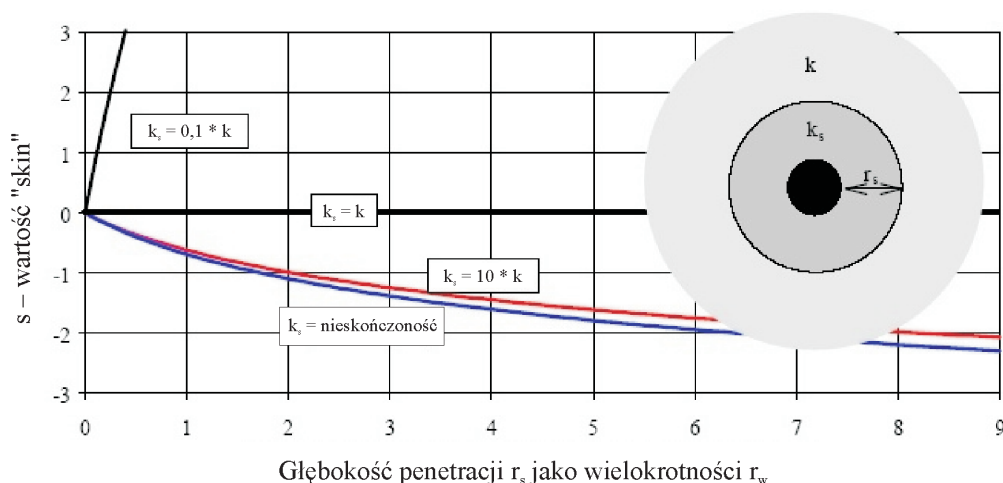
gdzie:

- s – współczynnik „skin” [-],
- k – przepuszczalność [$10^{-15}m^2$],
- k_s – przepuszczalność uszkodzonej/stymulowanej strefy [$10^{-15}m^2$],
- r_w – promień odwiertu [m],
- r_s – promień uszkodzonej/stymulowanej strefy [m].

Na podstawie przedstawionego poniżej rysunku wyraźnie można stwierdzić, że dziesięciokrotny wzrost przepuszczalności daje prawie taką samą wartość współczynnika „skin” jak wzrost nieskończony. Jeżeli $k_s \gg k$, to stosunek k/k_s w równaniu (1) maleje i wartość „skin” zależy tylko od głębokości penetracji otworów robaczkowych r_s . Dlatego – z punktu widzenia efektywności zabiegu kwasowania i przyszłego wydobywania – bardziej pożądane są wąskie, ale głęboko penetrujące w formację otwory robaczkowe (niż szerokie, ale krótkie). Stąd też, aby zabieg kwasowania matrycowego był efektywny ekonomicznie, ważne jest aby odbywał się w warunkach, które będą prowadzić do tworzenia głęboko penetrujących otworów robaczkowych przy użyciu jak najmniejszej ilości płynu.



Rys. 3. Typy struktur otworów robaczkowych [5]



Rys. 4. Wartość „skin” w funkcji promienia stymulowanej lub uszkodzonej strefy [1]

Metoda wizualizacji otworów robaczkowych utworzonych w wyniku laboratoryjnego kwasowania rdzeni węglanowych

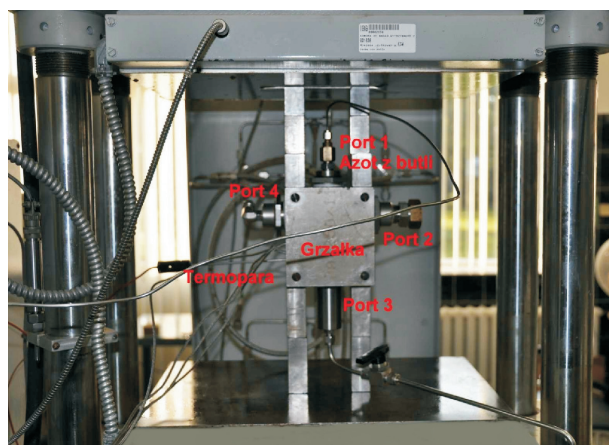
Jedną z metod wizualizacji otworów robaczkowych wytworzonych podczas kwasowania rdzeni (stosowaną w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów INiG) jest wykonywanie ich odlewów. W tym celu nasycy się je stopem Wooda, a po jego zastygnięciu – rozpuszcza próbkę skalną w roztworze kwasu. Metal Wooda jest stopem: bizmutu (50%), ołowiu (26,7%), cyny (13,3%) i kadmu (10%), o temperaturze topnienia około 70°C. Jest on chętniej stosowany do wykonywania odlewów kanałków

wytworzonych w rdzeniach niż np. żywice, ze względu na to, że nie zwilża powierzchni skały (podobnie jak rtęć) i charakteryzuje się wysokim napięciem powierzchniowym. Rozmiar porów, do których jest włączany może być kontrolowany poprzez wielkość ciśnienia tłoczenia. Gwarantuje to, że wypełniane są tylko nowe przestrzenie porowe wytworzone podczas kwasowania.

Wypełnianie otworów robaczkowych stopem Wooda wykonuje się w zaadoptowanej do tego celu komorze do

pomiarów współczynnika filtracji cieczy szczelinujących. Wewnątrz niej, w gumowej tulei mocowany jest rdzeń po kwasowaniu, nad którym umieszczane są bryłki stopu. Komora podgrzewana jest do temperatury 100°C, a płynny metal jest włączany do otworów robaczkowych za pomocą ciśnienia azotu podawanego z butli (rysunek 5).

Następnie układ jest schładzany, odpuszczane jest ciśnienie, a rdzeń zostaje rozpuszczany w roztworze kwasu solnego. Otrzymany w ten sposób odlew jest fotografowany.



Rys. 5. Komora do wykonywania odlewów otworów robaczkowych ze stopu Wooda w prasie hydraulicznej

Badania wpływu żelowania i sieciowania cieczy kwasujących na strukturę otworów robaczkowych tworzonych podczas laboratoryjnego kwasowania

Laboratoryjne kwasowania miały na celu przede wszystkim zbadanie wpływu żelowania i sieciowania cieczy kwasujących na strukturę tworzonych otworów robaczkowych. Przeprowadzono je na rdzeniach dolomitowych pochodzących ze złoża BMB, które charakteryzowały się podobnymi wartościami współczynników przepuszczalności i zawartością węglanów. Efektywność kwasowania rdzeni oceniano poprzez:

- wyznaczenie tzw. wskaźnika stymulacji – stosunku współczynnika przepuszczalności po i przed kwasowaniem,
- obserwację powierzchni wlotowej i wylotowej rdzenia – na ich podstawie można ocenić ilość i szerokość początkowych i końcowych odcinków kanalików,
- odlewy otworów robaczkowych – ocenę struktury i rozmiarów kanalików.

Laboratoryjne kwasowania przeprowadzono w dwóch temperaturach: 60°C i 90°C, ze względu na różny zakres stosowania użytych środków, a ich warunki i rodzaje użytych cieczy zestawiono w tabelicy 1.

Poniżej przedstawiono fotografie powierzchni rdzeni po kwasowaniu oraz odlewy ze stopu Wooda, ilustrujące wytworzone podczas tego procesu otwory robaczkowe.

Na rysunku 6, przedstawiającym powierzchnię rdzenia nr 1, kwasowanego cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitora korozji w 60°C, wyraźnie można zauważyć rozpuszczanie czołowe – charakterystyczne dla niskich szybkości tłoczenia i dużej szybkości reakcji pomiędzy kwasem a skałą złożową. W wyniku tego procesu powstał pojedynczy otwór robaczkowy o dużej szerokości, z niewielką ilością rozgałęzień. Przedstawiony powyżej

Tabela 1. Zmiana przepuszczalności rdzeni w wyniku laboratoryjnego kwasowania

Nr rdzenia	Ciecz kwasująca	Temp. [°C]	k_{przed} [$10^{-15}m^2$]	k_{po} [$10^{-15}m^2$]	Wskaźnik stymulacji SI [-]
1	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji	60	6,70	8187	1222
2	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący A	60	2,859	3987	1395
3	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji	90	9,11	2350	258
4	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B	90	5,15	7375	1441
5	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący C	90	1,732	8695	5454
6	15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B + 0,5% sieciownik + 0,2% bufor pH + 0,1% stabilizator żelaza	90	2,913	2651	910

mechanizm jest więc czymś pośrednim pomiędzy rozpuszczaniem czołowym a kanałem stożkowym i nie powoduje dużej efektywności zabiegów matrycowego kwasowania.



Rys. 6. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 1 po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji, w 60°C



Rys. 7. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji, w 60°C



Rys. 8. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 2 po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący A, w 60°C



Rys. 9. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący A, w 60°C



Rys. 10. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 3 po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji, w 90°C



Rys. 11. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji, w 90°C

Na powierzchni czołowej rdzenia nr 2 (rysunek 8) widoczna jest dosyć duża liczba pojedynczych otworów, ale – jak okazało się po wykonaniu odlewu – tylko jeden z nich zdołał dotrzeć do końca rdzenia, tworząc rozgałęzienie. W tym przypadku nie występuje rozpuszczanie czołowe, a wytworzony kanał jest bardzo cienki i odzwierciedla najbardziej pożądaną w zabiegach kwasowania strukturę dominującego otworu robaczkowego. Ciecz, za pomocą której wykonano kwasowanie rdzenia nr 2 w 60°C, oparta na środku żelującym A, charakteryzowała się więc odpowiednią lepkością, co wraz z małą przepuszczalnością rdzenia pozwoliło na ograniczenie filtracji z głównego kanałika – stąd brak rozgałęzień. Natomiast spowolnienie całkowitej szybkości reakcji poprzez zmniejszenie dyfuzji jonów wodorowych do powierzchni skały skutkuje optymalną dla tych warunków temperaturowych kombinacją szybkości tłoczenia i reaktywności kwas-skała.

Na rysunku 10, przedstawiającym powierzchnię rdzenia nr 3 po kwasowaniu ciecżą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitora korozji w 90°C, wyraźnie można zauważyć rozpuszczanie czołowe z pewną ilością kawern, które następnie przechodzi w pojedynczy, szeroki, zwięzający się stożkowo kanał z dużą ilością rozgałęzień. Znaczna część kwasu reagowała tutaj na powierzchni czołowej rdzenia oraz w głównym otworze robaczkowym, z którego również następowała duża filtracja cieczy do przylegających porów. Było to spowodowane wysoką szybkością reakcji pomiędzy kwasem a skałą w tej temperaturze, oraz niską lepkością cieczy – przy stosunkowo niezłej przepuszczalności rdzenia. Tego typu model rozpuszczania powinien być unikany podczas zabiegów kwasowania, gdyż prowadzi do szybkiego wyczerpywania się kwasu na ścianach lub w pobliżu odwiertu, co jest przyczyną słabej efektywności prowadzonych prac.

Na powierzchni czołowej rdzenia nr 4 (rysunek 12), kwasowanego ciecżą o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B, powstało kilka



Rys. 12. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 4 po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B, w 90°C



Rys. 13. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B, w 90°C



Rys. 14. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 5 po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący C, w 90°C



Rys. 15. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący C, w 90°C



Rys. 16. Powierzchnia czołowa rdzenia nr 6 po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B + 0,5% sieciownik + 0,2% bufor pH + 0,1% stabilizator żelaza, w 90°C



Rys. 17. Odlew otworów robaczkowych po kwasowaniu cieczą o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitor korozji + 4% środek żelujący B + 0,5% sieciownik + 0,2% bufor pH + 0,1% stabilizator żelaza, w 90°C

otworów. Żelowanie roztworu w tych warunkach temperatury i wydajności tłoczenia doprowadziło więc do dywersyfikacji przepływu; nie odbywał się on tylko jednym kanałem, lecz ciecz kierowana była do kilku kanalików. Jest to zjawisko pożądane w przypadku kwasowania interwałów o zróżnicowanej przepuszczalności i prowadzi do powstawania otworów robaczkowych nie tylko w strefach o wysokiej, ale i o niższej przepuszczalności. Odlew przedstawiony na rysunku 13 wskazuje z kolei na powstanie bardzo rozgałęzionej struktury, która nie jest optymalna z punktu widzenia efektywności zabiegu. Przyczyną tego może być – oprócz obniżenia szybkości dyfuzji – również spowolnienie reakcji powierzchniowej, wskutek oddziaływania pomiędzy polimerem a skałą złożową (zastosowano maksymalną zalecaną przez producenta dawkę środka B). Pierwsze zjawisko działa korzystnie i przyspiesza wzrost otworów robaczkowych w wysokich temperaturach, natomiast drugie powoduje spowolnienie szybkości ich penetracji, co sprzyja rozgałęzianiu struktury.

Dla cieczy kwasującej o składzie 15% HCl + 0,3% inhibitora korozji + 4% środka żelującego C, na powierzchni rdzenia nr 5 powstało wiele małych otworów (rysunek 14), co świadczy o tym, że ciecz ta może być użyta do selektywnego kwasowania. Otwory robaczkowe, których odlew przedstawiono na rysunku 15 mają nieco mniejszą szerokość niż dla „zwykłego” kwasu i mniejszą ilość rozgałęzień. Większość z nich jest bardzo krótka, natomiast jeden propagował przez całą długość rdzenia. Jest to struktura zbliżona do najbardziej optymalnej, tj. dominującego otworu robaczkowego.

Dla cieczy kwasującej o składzie: 15% HCl + 0,3% inhibitora korozji + 4% środka żelującego B + 0,5% sieciownika + 0,2% bufora pH + 0,1% stabilizatora żelaza, na powierzchni czołowej rdzenia nr 6 (rysunek 16) utworzył się placek filtryjny oraz powstało wiele otworów –

z tym, że dwa z nich przebiły się przez całą jego długość. Główne kanały są węższe niż dla „zwykłego” roztworu kwasu i mają ograniczoną liczbę rozgałęzień. Dla tego rodzaju usieciowanego kwasu – oprócz opóźnienia szybkości transportu masy do i z powierzchni skały złożowej – następowało również znaczne obniżenie szybkości reakcji powierzchniowej. Przełożyło się to na bardzo długi

czas kwasowania (prawie 1,5 godziny, podczas gdy dla pozostałych roztworów nie przekraczał on 40 minut), z powodu powolnego wzrostu otworów robaczkowych. Jednak na skutek znacznie obniżonej w tym przypadku filtracji cieczy z głównych kanalików, nie spowodowało to powstania mocno rozgałęzionej struktury – tak jak dla rdzenia nr 4, kwasowanego cieczą żelowaną.

Podsumowanie i wnioski

1. Dobór płynu kwasującego do danych warunków złożowych i dla formacji węglanowych w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów INiG przeprowadza się w oparciu o: wskaźnik stymulacji, ocenę wizualną powierzchni kwasowanych rdzeni oraz strukturę utworzonych otworów robaczkowych.
2. Ocena struktury tworzących się podczas laboratoryjnego kwasowania rdzeni węglanowych otworów robaczkowych ma fundamentalne znaczenie dla prawidłowego doboru płynu kwasującego dla danych warunków złożowych.
3. W celu sprawdzenia wpływu, jaki wywiera żelowanie i sieciowanie cieczy kwasujących na strukturę otworów robaczkowych, wykonano laboratoryjne kwasowania rdzeni dolomitowych w dwóch temperaturach: 60 i 90°C, dla jednej szybkości tłoczenia cieczy kwasującej, równej 0,5 cm³/min.
4. W niższej temperaturze (60°C), dla żelowanej za pomocą środka A cieczy kwasującej otrzymano najbardziej pożądaną przy kwasowaniu matrycowym strukturę – z dominującymi otworami robaczkowymi. Charakteryzuje się ona wąskimi i głęboko penetrującymi kanalikami, z małą ilością rozgałęzień.
5. Dla temperatury wyższej (90°C), najbardziej korzystne struktury otworów uzyskiwano dla cieczy żelowanej za pomocą środka C i sieciowego systemu opartego na środku B. W przypadku środka B na powierzchni czołowej rdzenia tworzył się „placik filtracyjny”.
6. Badania te wykonano tylko dla jednej wartości szybkości tłoczenia. Należy pamiętać, że dla każdego systemu cieczy kwasująco-skała złożowa i dla danych warunków temperaturowych istnieje pewne optimum szybkości tłoczenia, dla którego propagacja otworów robaczkowych jest najbardziej efektywna.

Artykuł nadesłano do Redakcji 26.10.2009. Przyjęto do druku 29.10.2009.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Buijse M.A., van Domelen M.S.: *Novel application of emulsified acids to matrix stimulation of heterogeneous formations*. SPE 39 583, 1998.
- [2] Economides M.: *Reservoir Stimulation*. Warsaw, Poland, 20-24 September 1993.
- [3] Fredd C.N., Miller M.J.: *Validation of Carbonate Matrix Stimulation Models*. SPE 58 713, 2000.
- [4] Kalfayan L.: *Production Enhancement with Acid Stimulation*. Second edition, Tulsa Oklahoma 2008.
- [5] Shukla S., Zhu D., Hill D.: *Gas Assisted Acidizing of Carbonate Formations*. SPE 82 273, 2003.



Dr inż. Marek CZUPSKI – adiunkt w Zakładzie Stymulacji Wydobywania Węglowodorów INiG Oddział Krosno. Zajmuje się realizacją prac naukowo-badawczych z zakresu intensyfikacji wydobywania węglowodorów z odwiertów przy zastosowaniu kwasowania i hydraulicznego szczelinowania. Autor i współautor szeregu opracowań i publikacji z tego zakresu.