

Mateusz Masłowski

Institut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Testy laboratoryjne symulacji procesu selektywnego kwasowania złóż z udziałem azotu

Wstęp

Matrycowe kwasowanie jest jedną z metod stymulacji wydobywania węglowodorów. Stosuje się ją głównie w celu usunięcia uszkodzenia przepuszczalności strefy przyodwiertowej. Niejednokrotnie uzyskuje się także polepszenie przepuszczalności skały poza strefą uszkodzenia. Niejednorodność złoża powoduje, że w trakcie zatłaczania cieczy kwasującej ma ona tendencję do penetrowania najbardziej przepuszczalnych stref. Nie jest to korzystne z punktu widzenia efektywności kwasowania matrycowego. W takich przypadkach należy więc stosować różne techniki i technologie czasowo blokujące strefy bardziej przepuszczalne, dzięki czemu przepływ

kwasu kieruje się w strefy mniej przepuszczalne lub bardziej uszkodzone, które są głównym celem kwasowania matrycowego.

Jedną z możliwych technologii selektywnego kwasowania matrycowego jest zastosowanie techniki zatłaczania azotu w trakcie zabiegu kwasowania. Azot wypełnia najbardziej chłonne przestrzenie złoża, przez co utrudnia penetrację cieczy kwasującej w te strefy. Technologia ta jest stosunkowo tania i nie wymaga stosowania dodatkowych materiałów chemicznych, a krajowy przemysł naftowy dysponuje odpowiednim sprzętem zabiegowym do jej stosowania.

Stosowanie azotu do selektywnego kwasowania matrycowego złóż

Kwasowanie matrycowe jest bardzo powszechnie stosowaną technologią stymulacji wydajności wydobywania z odwiertów gazowych i ropnych. Istotą tego zabiegu jest wtłoczenie do odwiertu cieczy kwasującej, w celu rozpuszczenia części matrycy skalnej i/lub różnego rodzaju fazy stałej zalegającej w strefie przyodwiertowej jako pozostałości po licznych pracach prowadzonych w odwiercie. Dzięki temu uzyskuje się przywrócenie oraz niejednokrotnie wzrost pierwotnej przepuszczalności strefy przyodwiertowej. Znaczny wzrost produktywności odwiertu można uzyskać w wyniku [3]:

- dalszej penetracji cieczy kwasującej w głąb złoża,
- równomiernego przeprowadzenia zabiegu kwasowania wzdłuż interwału produktywnego, polegającego na kierowaniu partii cieczy kwasującej w strefy charakteryzujące się małą przepuszczalnością lub dużym uszkodzeniem,

- dokładnego oczyszczenia strefy przyodwiertowej z produktów poreakcyjnych.

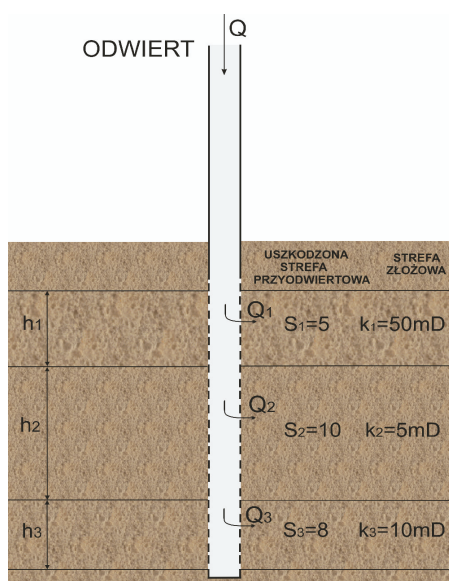
Proces kwasowania zachodzi nieco odmiennie w skałach piaskowcowych i w skałach węglanowych.

W skałach węglanowych, będących kompozytem kalcytu CaCO_3 i/lub dolomitu $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, po wtłoczeniu cieczy kwasującej następuje selektywne rozpuszczanie materiału skalnego. Efektem takiego rozpuszczania skały przez kwas jest tworzenie się wysoko przepuszczalnych kanałów, zwanych w literaturze „otworami robaczkowymi” (*wormholes*) [3, 6]. Podstawowymi kwasami stosowanymi do stymulacji odwiertów zlokalizowanych w formacjach węglanowych są: kwas solny (HCl), kwas octowy (CH_3COOH), kwas mrówkowy (HCOOH) oraz mieszanina tych kwasów. Do stymulacji stosuje się również różnego rodzaju emulsje kwasowe na bazie ropy lub oleju opałowego oraz różne dodatki do kwasu, w celu opóźnienia reakcji pomiędzy skałą a kwasem.

Parametrami technicznymi wpływającymi na efektywność i skuteczność zabiegu kwasowania są [3, 6]:

- szybkość zatłaczania cieczy kwasującej do odwiertu,
- ciśnienie zatłaczania cieczy kwasującej do odwiertu,
- sposób zatłaczania cieczy kwasującej do odwiertu.

Należy tutaj zaznaczyć, że w dużej mierze na efektywność i skuteczność wykonania zabiegu kwasowania wpływa niejednorodność złoża. Związana jest ona głównie z występowaniem w skale różnych spękań, szczelin oraz zmiennych wartości przepuszczalności stref złożowych wzdłuż uszkodzonego interwału produktywnego, przedstawionych na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Wpływ niejednorodności strefy złożowej na efektywność wykonania zabiegu kwasowania [3]

Zatłaczana do odwiertu ciecz kwasująca (w ilości Q) ma tendencję do penetrowania w pierwszej kolejności spękań, szczelin oraz najbardziej przepuszczalnych stref. W wyniku tego ilość zatłaczanej cieczy kwasującej w poszczególne strefy wynosi odpowiednio $Q_1 > Q_3 > Q_2$. Wpływa to niekorzystnie na skuteczność wykonania zabiegu kwasowania, którego głównym celem jest równomierne kwasowanie stref o mniejszej przepuszczalności oraz stref najbardziej uszkodzonych, wzdłuż obrabianego interwału produktywnego. Wymaga to stosowania dużych ilości cieczy kwasującej zatłaczanej do odwiertu, a tym samym znacznie powiększa koszty uzyskania optymalnego zabiegu kwasowania. W celu poprawienia skuteczności zabiegu kwasowania stosuje się różne techniki i technologie czasowo ograniczające przepływ cieczy kwasującej w strefy bardziej przepuszczalne, dzięki czemu kieruje się ją w strefy o mniejszej przepuszczalności lub w strefy o największym uszkodzeniu. Dotyczy to wszystkich odwiertów pionowych, a w szczególności odwiertów

horyzontalnych i wielodennych. Techniki dywersyfikacji (*diverting*) przepływu płynu zabiegowego można sklasyfikować jako mechaniczne i chemiczne [2]. Najczęściej stosowane są różnorodne techniki chemiczne. Polegają one na redukcji szybkości ucieczki cieczy zabiegowej w głąb serii złożowej o dużej przepuszczalności. Efekt ten można otrzymać poprzez: znaczny wzrost lepkości płynu zabiegowego, zmniejszenie szybkości reakcji pomiędzy kwasem a skałą lub ograniczenie filtracji kwasu. Właściwości te uzyskuje się w wyniku zastosowania: cząstek stałych, żelowanych kwasów, pian kwasujących, zdyspergowanych w gazach cieczy kwasujących oraz zastosowanie naprzemiennego zatłaczania cieczy kwasującej i gazu. Substancje te mogą być zatłaczane do odwiertu przez rury wydobywcze, jak również przy użyciu *Coiled Tubingu*. W przemyśle naftowym do tych celów stosuje się zazwyczaj tylko dwa rodzaje gazów technicznych: azot (N_2) oraz dwutlenek węgla (CO_2) [5].

Azot jest gazem bezbarwnym i bezzapachowym, w warunkach przemysłowych sprzedawanym w formie ciekłej. Należy zaznaczyć, że azot jest gazem inertnym i nie wchodzi w reakcję z cieczą kwasującą ani z minerałami budującymi formację złożową. Jest on w bardzo małym stopniu rozpuszczalny w wodzie, ropie i większości innych cieczy, a zmieszany z nimi pozostaje w nich w formie gazowej. Obecność azotu powoduje zwiększenie ilości płynu kwasującego, a tym samym zwiększenie zasięgu penetracji matrycy skalnej. Związane jest to z faktem, iż azot chwilowo zajmuje miejsce w części porów i kanałów porowych – nie pozwalając na wpłynięcie w te miejsca cieczy kwasującej. Ta część kwasu, która nie może być wtłoczona penetruje inne kanały, czyniąc kwasowanie bardziej równomiernym. Blokowanie kanałów porowych przez azot w czasie kwasowania ogranicza też w dużym stopniu filtrację, przez co zabieg staje się bardziej efektywny [5]. Obecność azotu w cieczy kwasującej powoduje zmniejszenie szybkości reakcji pomiędzy cieczą a skałą. Związane jest to z „rywalizacją” bąbelków azotu i kropelek kwasu o kontakt z powierzchnią skały. Wyższy energetyczny poziom z bąbelków azotu zapewnia im przewagę w tej rywalizacji z kropelkami kwasu. Przyczynia się to do zmniejszenia szybkości reakcji kwasu z powierzchnią skały, a tym samym uzyskuje się głębszą penetrację kwasu w głąb złoża [4]. Obecność sprężonego lub rozpuszczonego azotu wraz z cieczą kwasującą powoduje dodatkowy dopływ energii, która sprzyja wzrostowi szybkości przepływu cieczy poreakcyjnej w matrycy skalnej. Umożliwia to usunięcie nie rozpuszczonych drobin, zalegających w porach lub kanałach porowych. Ułatwia także wnoszenie cieczy poreakcyjnej z odwiertu na powierzchnię (forma gazodźwi-

gu). Ma to duże znaczenie w przypadku kwasowania złóż charakteryzujących się małym ciśnieniem złożowym [5].

Jedną z technik stosowania azotu do selektywnego matrycowego kwasowania jest tworzenie tzw. pian kwasujących [2]. Piana jest dyspersją gazu w płynie. Może być ona tworzona na powierzchni odwiertu poprzez intensywne przemieszanie zatłaczanego azotu i rozpuszczonego odpowiedniego środka powierzchniowo-czynnego (SPCz). Piana może być również tworzona wskutek wtłaczania do cieczy zabiegowej odpowiednich środków powierzchniowo-czynnych, a następnie rozpuszczanie i wymieszanie cieczy zabiegowej z zatłaczanym azotem. Tworzeniu się pian sprzyja również burzliwy przepływ cieczy kwasującej z zatłaczanym azotem – przez rury wydobywcze, *Coiled Tubing* oraz pory i kanały porowe w złożu.

Inną techniką stosowania azotu do selektywnego matrycowego kwasowania złóż może być zdyspergowanie w azocie cieczy kwasującej. Technika ta polega na zmieszaniu ze sobą cieczy kwasującej i azotu w mieszalniku wyposażonym w odpowiednią dyszę dyspersyjną, a następnie – w formie dwufazowej – zatłoczenie jej do odwiertu [5]. Równoczesne zatłaczanie azotu i cieczy kwasującej do odwiertu, a następnie równoczesny przepływ tych substancji przez ośrodek porowaty powoduje obniżenie względnej przepuszczalności dla wody [6]. Mała wartość względnej przepuszczalności dla wody powoduje tworzenie się w interwale produktywnym kanału o małej średnicy oraz małej ilości rozgałęzień od tego głównego kanału (otworu robaczkowego). Sprzyja to uzyskaniu głębszej penetracji głównego kanału w złożu, przy zastosowaniu mniejszej ilości kwasu potrzebnego do uzyskania optymalnego zabiegu kwasowania [6].

Do selektywnego kwasowania matrycowego złóż stosuje się również naprzemienne zatłaczanie azotu i cieczy kwasującej. Naprzemienne zatłaczanie kwasu i azotu do skały złożowej nasyconej solanką powoduje tworzenie się głównego kanału; o dużej średnicy i dużej ilości rozgałęzień od niego, oraz rozpuszczenie powierzchni czołowej skały. Wnioskuje się, że zatłaczanie pewnej partii azotu przed zatłaczaniem kolejnych partii kwasu ma tendencję do blokowania kwasu od głównej ścieżki kanału (otworu robaczkowego). Prowadzi to do powstawania większej ilości rozgałęzień oraz mniejszej propagacji tworzącego się głównego otworu robaczkowego. Dzięki temu można uzyskać odwrócenie przepływu cieczy

kwasującej od stref o większej przepuszczalności i kierowanie jej w kierunku stref o mniejszej przepuszczalności i/lub o większym uszkodzeniu [6].

Zaletą stosowania pian kwasowych, zdyspergowanych w gazach cieczy kwasujących oraz zastosowanie naprzemiennego zatłaczania cieczy kwasującej i gazu – jest brak cząstek stałych, które mogłyby uszkadzać przepuszczalność formacji złożowej po kwasowaniu. Pomagają one dobrze oczyszczać odwiert o niskim ciśnieniu złożowym. Pozostaje tylko kwestia określenia ilości, szybkości, ciśnienia oraz kolejności/sposobu zatłaczania do fazy ciekłej oraz odwiertu azotu, w celu dywersyfikacji przepływu kwasu w interwale produktywnym.

Serwis stymulacyjny dysponuje odpowiednim sprzętem zabiegowym do zatłaczania fazy ciekłej, jak również jednostką azotową do zatłaczania azotu. Faza ciekła oraz azot może być zatłaczany do odwiertu przez rury wydobywcze lub za pomocą *Coiled Tubingu*. Połączenie zalet *Coiled Tubingu* z zastosowaniem azotu daje bardzo szeroki wachlarz możliwości wykonywania różnych prac w odwiercie. Z doświadczeń z zatłaczaniem azotu za pomocą jednostki azotowej wynika, że maksymalnie możliwe jest uzyskanie wydajności 80 Nm³. Zazwyczaj jednak w pracach otworowych stosuje się wydajności w zakresie od 10–30 Nm³ (zakładając, że dla średnio i nisko przepuszczalnych skał zabiegi kwasowania matrycowego wykonuje się z wydajnością kwasu w granicach od 0,2–0,5 m³/min). Są to wartości wyższe niż stosowane podczas badań laboratoryjnych, ale – jak podaje literatura – może to wpływać jedynie na zwiększenie efektu procesu kwasowania matrycowego [5].

Na koniec należy zaznaczyć, iż wszystkie techniki i technologie mające na celu dywersyfikację przepływu cieczy kwasującej, stosowane podczas matrycowego kwasowania złóż, muszą spełniać następujące kryteria [2]:

- nie przyczyniać się do trwałego uszkodzenia obrabianej formacji złożowej,
- czynnik dywersyfikacji musi być kompatybilny z płynami zabiegowymi, płynami poreakcyjnymi, płynami złożowymi oraz solankami złożowymi,
- powodować szybkie, łatwe i całkowite oczyszczenie odwiertu po wykonaniu zabiegu kwasowania,
- czynnik dywersyfikacji musi posiadać odpowiednie właściwości fizyczne i chemiczne (odporność na działanie wysokich temperatur złożowych).

Opracowanie metodyki laboratoryjnej symulacji procesu selektywnego kwasowania z udziałem azotu

W bardzo ogólny sposób można stwierdzić, że w Polsce złoża węglowodorów zlokalizowane są przede

wszystkim w skałach piaskowcowych oraz węglanowych. Złoża węglowodorów charakteryzują się często

niejednorodnością, związaną z występowaniem w nich spękań, szczelin oraz różnych wartości przepuszczalności. W przypadku stymulacji skał węglanowych, zabieg kwasowania wykonuje się najczęściej za pomocą odpowiedniego roztworu kwasu solnego. Oczywiście w skład cieczy kwasującej wchodzi też różne dodatki, jak choćby inhibitory korozji, środki sekwestrujące, rozpuszczalniki, środki powierzchniowo-czynne, czy środki opóźniające szybkość reakcji.

Celem tej pracy jest przygotowanie metodyki laboratoryjnej symulacji procesu selektywnego kwasowania z udziałem azotu. Ma to za zadanie sprawdzenie możliwości poprawienia skuteczności i efektywności obecnie stosowanych stymulacji do selektywnego kwasowania matrycowego niejednorodnych formacji złożowych, poprzez włączenie w nie technologii zatłaczania azotu. Zadaniem tej technologii jest odwrócenie przepływu cieczy kwasującej od stref o większej przepuszczalności i kierowanie jej w kierunku stref o mniejszej przepuszczalności i/lub o większym uszkodzeniu.

W celu odwzorowania niejednorodności złoża można zastosować zestaw rdzeni składający się z co najmniej dwóch rdzeni, o różnych (znacznie) przepuszczalnościach (k). Zestawy rdzeni użyte do badań powinny posiadać zbliżone wartości stosunków ich przepuszczalności, tj. k_1/k_2 . Laboratoryjna symulacja procesu selektywnego kwasowania z udziałem azotu polega na przetłoczeniu, z określoną wydajnością, przez badany zestaw rdzeni zadanej ilości cieczy kwasującej oraz azotu. Na skuteczność i efektywność takiego procesu kwasowania ma wpływ:

- temperatura pomiaru,
- rodzaj cieczy nasycającej skałę (związany z względną przepuszczalnością dla wody),
- szybkość reakcji pomiędzy kwasem a skałą,
- szybkość oraz ilość zatłaczanej cieczy kwasującej i azotu,
- sposób zatłaczania azotu w trakcie kwasowania,
- stosunek wartości przepuszczalności poszczególnych rdzeni w badanym zestawie rdzeni, tj. k_1/k_2 .

Podczas badania oba rdzenie muszą znajdować się w takiej samej zadanej:

- temperaturze pomiaru,
- wartości ciśnienia uszczelnienia rdzenia,
- wartości przeciwcisnienia.

W trakcie badania powinna być rejestrowana:

- temperatura w każdej komorze rdzeniowej,
- wartość ciśnienia uszczelnienia rdzeni,
- wartość przeciwcisnienia dla każdego z rdzeni,
- wartość ciśnienia przed i za zestawem rdzeni,

- wydajność i ilość zatłaczanej cieczy oraz gazu do zestawu rdzeni,
- ilość odebranej cieczy oraz gazu z każdego rdzenia osobno.

Rejestracja powyższych parametrów pozwoli na zachowanie takich samych warunków badania dla obu rdzeni. Rejestracja ciśnienia przed i za zestawem rdzeni pozwoli na określenie momentu oraz wartości ciśnienia, przy którym nastąpiło przejście kwasu przez każdy rdzeń.

W większości laboratoriów badania tego typu odbywają się na wzorcowym materiale skalnym, charakteryzującym się stałym składem mineralogicznym, stałością przepuszczalności i porowatości (dostępne różne zakresy) oraz przede wszystkim łatwością pozyskania. Powinny one odwzorować procesy i reakcje towarzyszące przepływowi fazy ciekłej oraz gazowej, mających miejsce w przypadku skał złożowych. Na tego typu wzorcowym materiale rdzeniowym prowadzone są badania ogólne, a dopiero po nich, już na rdzeniach z konkretnych złóż i otworów, prowadzi się badania aplikacyjne.

Cykl pomiarowy symulacji selektywnego kwasowania zestawu rdzeni z dodatkiem azotu polega na:

- określeniu współczynnika przepuszczalności i porowatości dla poszczególnych rdzeni wchodzących w skład badanego zestawu rdzeni,
- uszczelnieniu każdego z rdzeni z taką samą wartością ciśnienia,
- uzyskaniu takich samych temperatur pomiaru w obu komorach rdzeni,
- całkowitym nasyceniu rdzeni cieczą (solanką, ropą naftową),
- ustawieniu przeciwcisnienia,
- nasyceniu całkowitym rdzeni cieczą (solanką, ropą naftową) lub gazem (azotem), przy zadanej wartości przeciwcisnienia,
- zatłoczeniu z zadaną wydajnością określonej ilości:
 - cieczy kwasującej,
 - gazu, a następnie cieczy kwasującej,
 - cieczy kwasującej naprzemiennie z gazem,
- zatłoczeniu z zadaną wydajnością określonej ilości przybitki, tj. solanki,
- ponownym określeniu współczynnika przepuszczalności i porowatości dla każdego z rdzeni.

W przypadku zatłaczania w badaniach określonej ilości cieczy kwasującej oraz solanki do zestawu rdzeni, przyjmuje się wielokrotność całkowitej objętości porowej PV (*Pore Volume*) badanego zestawu rdzeni. W przypadku gazu, przyjmuje się zatłoczenie do zestawu rdzeni określonej ilości gazu (V_n), odpowiadającej warunkom normalnym

i równej założonej wielokrotności całkowitej objętości porowej rdzeni PV (*Pore Volume*) danego zestawu. W celu zatłoczenia określonej ilości gazu (V_n), podczas badania należy tę ilość gazu przeliczyć zgodnie z równaniem (1) na ilość gazu (V_1), odpowiadającą warunkom (ciśnienia i temperatury) panującym w zestawie rdzeni. Następnie tę ilość gazu (V_1) zatłacza się przed zestaw rdzeni.

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{Z_1 \cdot T_1} = \frac{P_n \cdot V_n}{Z_n \cdot T_n} \Rightarrow V_1 = \frac{Z_1 \cdot P_n \cdot V_n \cdot T_1}{P_1 \cdot T_n} \quad (1)$$

gdzie:

V_1 – ilość gazu zatłaczana przed zestaw rdzeni w warunkach pomiaru (tj. ciśnienia i temperatury w zestawie rdzeni) [cm^3],

Z_1 – współczynnik ściśliwości azotu w panujących warunkach pomiaru (tj. ciśnienia i temperatury w zestawie rdzeni), wartość wyznaczona w programie symulacyjnym PVT Sim [-],

P_1 – ciśnienie w zestawie rdzeni [bar],

T_1 – temperatura w zestawie rdzeni [$^{\circ}\text{K}$],

V_n – ilość gazu w warunkach normalnych [cm^3],

Z_n – współczynnik ściśliwości azotu w warunkach normalnych [$Z_n = 1$],

P_n – ciśnienie w warunkach normalnych, tj. 1013,25 [hPa] = 1,01325 [bar],

T_n – temperatura w warunkach normalnych, tj. 273,15 [$^{\circ}\text{K}$].

Wielkością charakterystyczną dla danego rdzenia zestawu, uzyskaną po wykonaniu symulowanego procesu kwasowania z dodatkiem azotu, może być efektywność procesu kwasowania. Wskaźnikiem użytym do opisu efektywności procesu kwasowania jest powszechnie stosowany współczynnik stymulacji SI (*Stimulation Index*). Jest to stosunek współczynnika przepuszczalności po kwasowaniu do współczynnika przepuszczalności przed kwasowaniem, opisany równaniem (2):

$$SI = \frac{k_k}{k_p} \quad (2)$$

gdzie:

SI – współczynnik stymulacji [-],

k_k – współczynnik przepuszczalności rdzenia po kwasowaniu [mD],

k_p – współczynnik przepuszczalności rdzenia przed kwasowaniem [mD].

Analiza wartości SI dla poszczególnych rdzeni umożliwia formułowanie wniosków dotyczących efektywności wykonywanych symulacji procesów selektywnego kwasowania skał przy użyciu kwasu i azotu. Wzrost efektywności wykonania zabiegów kwasowania można uzyskać poprzez widoczny wzrost przepuszczalności (k) dla rdzenia o mniejszej przepuszczalności przed kwasowaniem oraz jak najmniejszą wartość stosunku współczynników stymulacji SI_1/SI_2 rdzeni badanego zestawu. Współczynnik stymulacji SI_1 jest wyznaczany dla rdzenia o większej przepuszczalności przed kwasowaniem, natomiast współczynnik stymulacji SI_2 jest wyznaczany dla rdzenia o mniejszej przepuszczalności przed kwasowaniem. Wszystkie badania przeprowadzane na zestawach rdzeni powinny być powtórzone w celu sprawdzenia powtarzalności uzyskiwanych wyników i być stosowane do uśrednienia wyników tych badań.

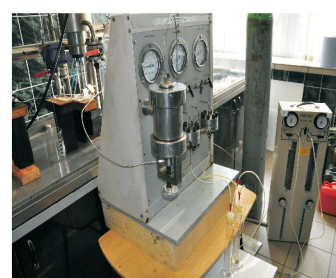
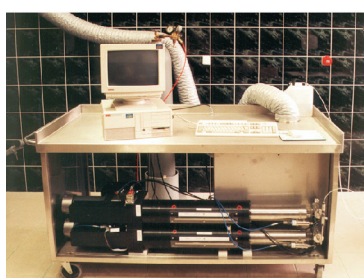
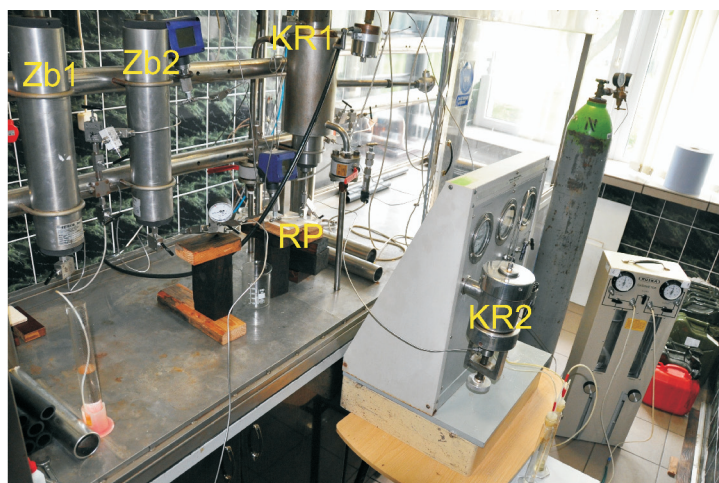
Dodatkowymi parametrami, jakie powinny być określane podczas badania, są ilości cieczy i gazu odebranego po kwasowaniu. Określenie ilości odebranego gazu z rdzeni pozwoli na sprawdzenie prawidłowego zatłoczenia przed zestaw rdzeni założonej ilości azotu, w przeliczeniu na warunki normalne. Należy w tym miejscu również uwzględnić w odebranym gazie ilość dwutlenku węgla, który powstaje wskutek reakcji cieczy kwasującej ze skałą węglanową. W celu określenia ilości powstałego dwutlenku węgla można skorzystać z równania stechiometrii reakcji kwasu solnego z kalcytem CaCO_3 . Wykorzystuje się tutaj ubytek masy skały po kwasowaniu.

W celu lepszej oceny wykonania symulacji selektywnego kwasowania z udziałem azotu, dodatkowo można wykonać zdjęcia powierzchni czołowych rdzeni, obraz na rentgenowskim mikrotomografie komputerowym lub odlew wytrawionych otworów robaczkowych przy użyciu stopu Wooda. Pozwoli to na wizualną ocenę tworzącej się struktury otworów robaczkowych na powierzchni czołowej oraz w rdzeniu. W przypadku uzyskania głębszej penetracji otworu robaczkowego w głąb rdzenia (formacji złożowej) o mniejszej przepuszczalności, pozwoli to na uzyskiwanie lepszej efektywności i skuteczności wykonania zabiegu kwasowania.

Wykonanie laboratoryjnych symulacji kwasowania selektywnego z udziałem azotu i ocena efektywności technologii

Wykonanie symulacji procesu selektywnego kwasowania z udziałem azotu w warunkach laboratoryjnych

jest procesem trudnym. Badania zostały wykonane przy użyciu urządzenia Acid Delivery System (rysunek 2),

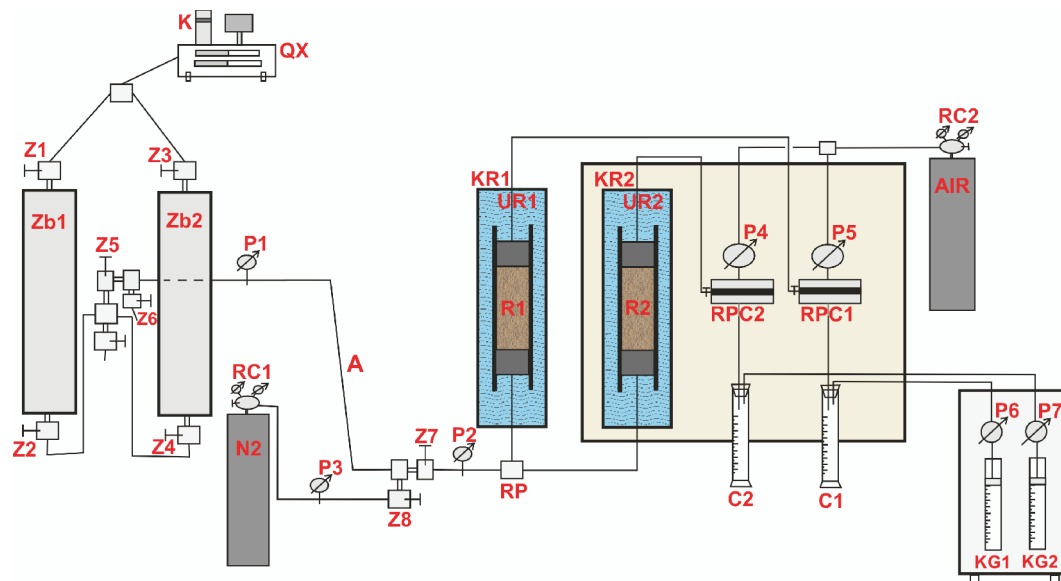


Rys. 2. Stanowisko do symulacji procesów selektywnego kwasowania matrycowego złóż z udziałem azotu, składające się z: zestawu pomp QUIZIX stanowiska ADS, zbiorników z cieczami, komór rdzeniowych oraz gazomierza „RUSKA”

służącego do laboratoryjnych symulacji procesów kwasowania związanych z wykonywaniem na rdzeniu testów typu *core flow*.

Schemat rozbudowanego stanowiska do symulacji

technologii zatłaczania azotu w celu selektywnego kwasowania formacji złożowych, charakteryzujących się różnymi wartościami przepuszczalności, został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska do symulacji technologii zatłaczania azotu do selektywnego kwasowania złóż

K – komputer; QX – pompy QUIZIX; Z – zawór; Zb1 – zbiornik nr 1 z solanką; Zb2 – zbiornik nr 2 z cieczą kwasującą; P – ciśnieniomierz; A – odcinek A; N₂ – butla ze sprężonym azotem; RC – reduktor ciśnienia; RP – miejsce rozdzielenia przepływu cieczy na dwie komory rdzeniowe; KR – komora rdzeniowa; R – rdzeń; UR – uszczelnienie rdzenia; RPC – regulator przeciwcisnienia; AIR – butla ze sprężonym powietrzem; C – cylinder pomiarowy; KG – komora pomiarowa gazomierza „RUSKA”

Przedstawione stanowisko do symulacji procesów selektywnego kwasowania z udziałem azotu pozwala na równoczesne zatłaczanie oraz odbiór cieczy kwasującej i azotu (przy takim samym zadanym przeciwności) przez oba rdzenie. Rdzenie te charakteryzują się różną przepuszczalnością. Ma to za zadanie odwzorować wpływ zastosowania azotu na efektywność selektywnego kwasowania złóż, charakteryzujących się różnymi przepuszczalnościami. Rozdzielenie przepływu (RP) zatłaczanej cieczy kwasującej oraz azotu na oba rdzenie uzyskano w wyniku zamontowania przed zestawem rdzeni trójnika – RP, który powoduje swobodny rozdział tych substancji. Badania wykonano w temperaturze otoczenia, tj. 21°C. W badaniach zostały wykorzystane rdzenie wycięte z wapienia pińczowskiego, charakteryzującego się zawartością kalcytu (CaCO_3) na poziomie 95%. Wszystkie rdzenie posiadały średnicę 3,81 cm i długość 6,02 cm. Wartości współczynników przepuszczalności (k_p) tych rdzeni wahały się w przedziale

od 8,37 mD do 48,14 mD, a wartości współczynników porowatości (Φ) – w przedziale od 27,39% do 31,00%. Z pośród tych rdzeni wytypowano do badań 6 zestawów, składających się z dwóch rdzeni, które charakteryzowały się różnymi wartościami współczynnika przepuszczalności (k_p), tj. z rdzenia nr 1 (o większej przepuszczalności – k_{p1}) oraz z rdzenia nr 2 (o mniejszej przepuszczalności – k_{p2}). Wszystkie zestawy posiadały zbliżone wartości stosunku ich współczynników przepuszczalności rdzeni (tj. k_{p1}/k_{p2}), mieszczącego się w przedziale od 1,70 do 3,17. W pierwszej kolejności do zestawu rdzeni zatłaczano solankę, tj. roztwór 2% NH_4Cl , w celu uzyskania całkowitego nasycenia nią rdzeni przy zadanej wartości przeciwności. Następnie do zestawu zatłaczano ciecz kwasującą: 15% HCl + 0,2% IK, w założonej ilości (V_K), równej 1 PV (Pore Volume – objętość porowa) zestawu rdzeni. IK jest inhibitorem korozji często stosowanym podczas zabiegów kwasowania. Następnie sprawdzano, czy zastosowanie azotu

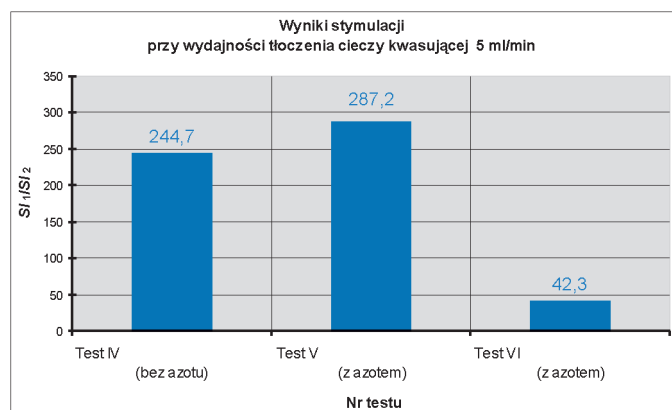
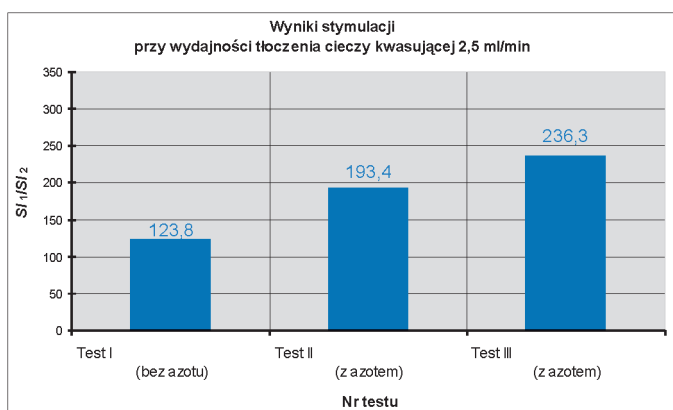
Tablica 1. Zestawienie wykonanych testów symulacji procesu selektywnego kwasowania z udziałem azotu w temperaturze 21°C oraz wyznaczonych końcowych wartości fizycznych rdzeni danego zestawu

| Nr testu | Kolejność oraz ilość zatłaczania cieczy i azotu w trakcie testu | Nr rdzenia w zestawie | Współcz. przepuszcz. rdzenia przed kwasowaniem k_p [mD] | Współcz. przepuszcz. rdzenia po kwasowaniu k_k [mD] | Współcz. stymulacji rdzenia $SI = k_k/k_p$ [-] | Stosunek współcz. stymulacji rdzeni SI_1/SI_2 [-] | Wydajność tłoczenia solanki q_s oraz kwasu q_K [ml/min] |
|----------|---|-----------------------|---|---|--|---|---|
| I. | solanka (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 48,14 | 6535,00 | 135,8 | 123,8 | 2,5 |
| | | 2 | 15,18 | 16,65 | 1,1 | | |
| II. | solanka (nasycanie rdzeni) azot (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 35,25 | 7561,86 | 214,5 | 193,4 | 2,5 |
| | | 2 | 11,81 | 13,10 | 1,1 | | |
| III. | solanka (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (50% 1 PV) azot (4 PV) ciecz kwasująca (50% 1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 16,77 | 6284 | 374,7 | 236,3 | 2,5 |
| | | 2 | 9,85 | 15,62 | 1,5 | | |
| IV. | solanka (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 19,90 | 5495,00 | 276,1 | 244,7 | 5 |
| | | 2 | 9,12 | 10,29 | 1,1 | | |
| V. | solanka (nasycanie rdzeni) azot (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 17,14 | 6063,00 | 353,7 | 287,2 | 5 |
| | | 2 | 8,37 | 10,31 | 1,2 | | |
| VI. | solanka (nasycanie rdzeni) ciecz kwasująca (50% 1 PV) azot (4 PV) ciecz kwasująca (50% 1 PV) solanka (2 PV) | 1 | 36,41 | 6054,69 | 166,2 | 42,3 | 5 |
| | | 2 | 12,62 | 49,63 | 3,9 | | |

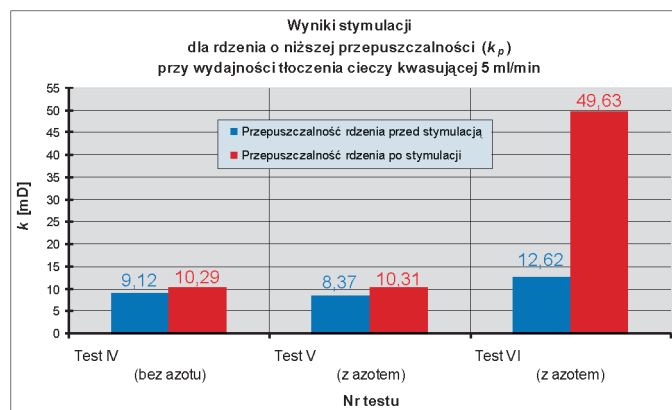
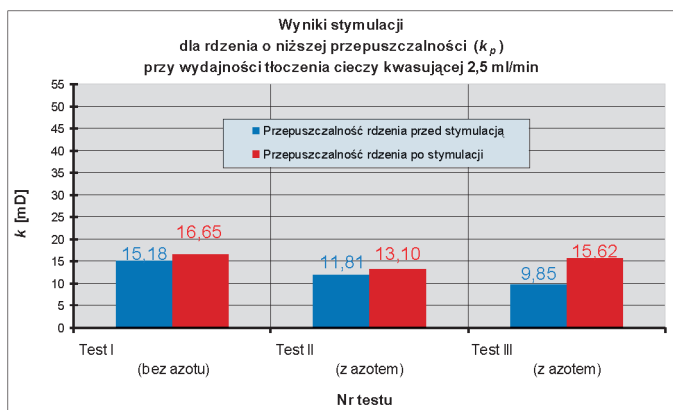
wpływa na wzrost efektywności wykonywanych procesów selektywnego kwasowania zestawów rdzeni. Zastosowanie azotu przed zatłaczaniem kwasu polegało na wtłaczaniu azotu do zestawu rdzeni aż do momentu uzyskania jego wypływu z rdzeni. W przypadku zatłaczania azotu w trakcie procesu kwasowania, założona jego ilość (V_n) w warunkach normalnych wynosiła 4 PV zestawu rdzeni. Pod koniec każdego testu zatłaczano przybitkę roztworu 2% NH_4Cl w ilości V_{ss} , równej 2 PV zestawu rdzeni, w celu uzyskania całkowitego przetłoczenia przez badany zestaw założonych ilości cieczy kwasującej i gazu. Na koniec każdego testu sprawdzano ilość zatłoczonego azotu w badany zestaw rdzeni, w przeliczeniu na warunki normalne. Sprawdzenie to polegało na rejestracji ilości gazu odebranego z rdzeni w komorach gazomierza. W ilości odebranego gazu uwzględniano również ilość powstałego CO_2 w trakcie reakcji kwasu solnego z wapniem. Uzyskane wartości odebranego azotu w komorach gazomierza nieznacznie odbiegały od założonych ilości azotu zatłaczanych do zestawu rdzeni. Badania wykonano przy dwóch różnych wydajnościach tłoczenia cieczy kwasującej oraz solanki do zestawu. Następnie dla wysuszonych i schłodzonych

rdzeni ponownie określano wartość współczynnika przepuszczalności (k_p). Przebieg testów oraz uzyskane wyniki zostały przedstawione w tablicy 1 oraz na rysunkach 4 i 5.

Na podstawie przedstawionych na rysunkach 4 i 5 wyników stymulacji wnioskuję się, że dla testu bazowego (test I), wykonanego bez zastosowania azotu, z wydajnością tłoczenia cieczy kwasującej wynoszącą 2,5 ml/min, uzyskano wzrost przepuszczalności dla rdzenia nr 2 (o mniejszej przepuszczalności przed kwasowaniem) – z 15,18 mD do 16,65 mD, a wartość stosunku współczynników stymulacji SI_1/SI_2 rdzeni w badanym zestawie wyniosła 123,8. W przypadku wzrostu wydajności tłoczenia cieczy kwasującej do 5 ml/min (w teście IV) uzyskano nieznaczny wzrost przepuszczalności dla rdzenia nr 2 – z 9,12 mD do 10,29 mD, a wartość SI_1/SI_2 rdzeni wyniosła 244,7. Całkowite nasycenie rdzeni azotem przed zatłaczaniem cieczy kwasującej nie powoduje widocznego wzrostu przepuszczalności rdzenia nr 2 w teście II oraz V. Występuje również wzrost wartości SI_1/SI_2 po tych testach, w stosunku do testu bazowego. W przypadku testu III, azot zatłaczano w połowie procesu kwasowania, prowadzonego z wydajnością tłoczenia cieczy kwasującej



Rys. 4. Wartości zmian stosunku współczynników stymulacji SI_1/SI_2



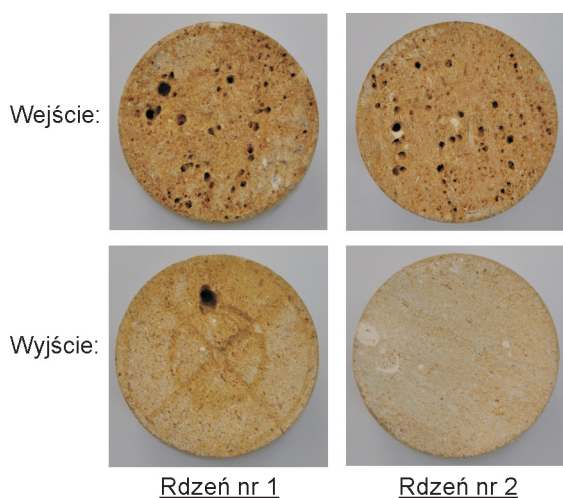
Rys. 5. Zmiana współczynnika przepuszczalności rdzenia o mniejszej przepuszczalności

2,5 ml/min, i uzyskano nieznaczny wzrost przepuszczalności dla rdzenia nr 2 – z 9,85 mD do 15,62 mD, a wartość SI_1/SI_2 wyniosła 236,3. Najlepszą efektywność osiągnięto w przypadku zatłaczania azotu w trakcie procesu selektywnego kwasowania (test VI). W teście VI, przy wydajności tłoczenia cieczy kwasującej 5 ml/min, wartość przepuszczalności rdzenia nr 2 wzrosła z 12,62 mD do 49,63 mD, a wartość SI_1/SI_2 wyniosła 42,3.

Na rysunkach 6 i 8 przedstawiono powierzchnię czołową rdzeni wchodzących w skład zestawów, na których wykonano testy kwasowania bez udziału azotu. Na rysunkach 7 i 9 przedstawiono powierzchnię czołową rdzeni wchodzących w skład zestawów, w których zaobserwowano widoczne tworzenie się głównego kanału (otworu robaczkowego).

Na podstawie obserwacji powierzchni czołowych rdzeni wnioskuje się, że we wszystkich testach uzyskano ciecz

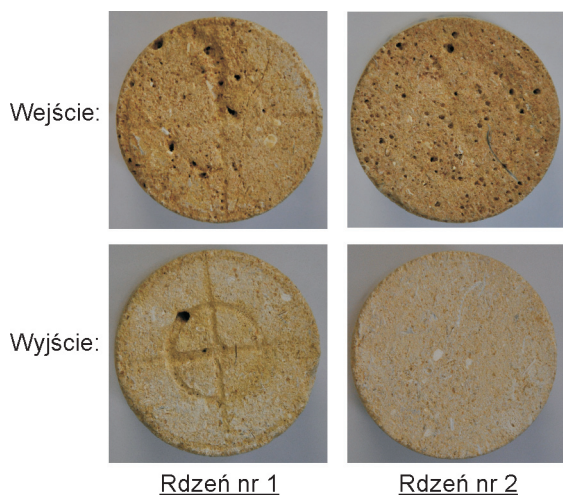
kwasującą na wyjściu z rdzeni nr 1, natomiast nie uzyskano jej na wyjściu z rdzeni nr 2, danego zestawu. W przypadku procesu selektywnego kwasowania zestawu bez udziału azotu, na powierzchni rdzeni nr 2 zaobserwowano dużą ilość otworów robaczkowych o małej średnicy. Natomiast w teście III (rysunek 7), na powierzchni czołowej rdzenia nr 2 zaobserwowano tworzenie się kilku krótkich otworów robaczkowych o małej średnicy oraz jednego otworu robaczkowego o dużej średnicy. W wyniku obserwacji bocznej ścianki rdzenia nr 2 (rysunek 7) zaobserwowano uzyskanie penetracji przez jeden z otworów robaczkowych, wynoszącej 2,30 cm w głąb rdzenia. W przypadku testu VI (rysunek 9), na powierzchni czołowej rdzenia nr 2 zaobserwowano tworzenie się kilku otworów robaczkowych o małej średnicy oraz jednego otworu robaczkowego o dużej średnicy. W wyniku obserwacji rdzenia nr 2, niemożliwe było określenie głębokości penetracji otworu robaczkowego.



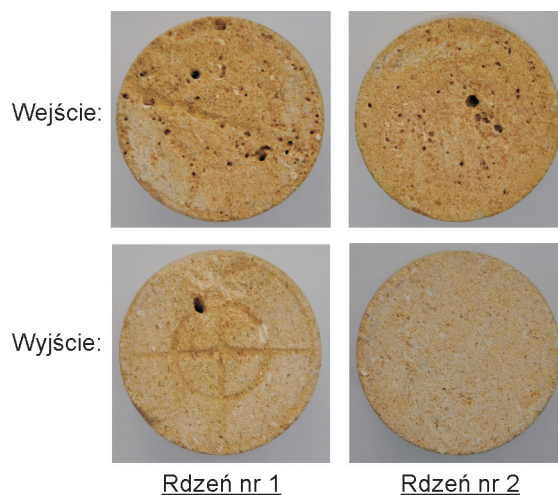
Rys. 6. Fotografije powierzchni czołowych zestawu rdzeni po teście I (bez azotu) przy 2,5 ml/min



Rys. 7. Fotografije powierzchni czołowych zestawu rdzeni po teście III (z azotem) przy 2,5 ml/min



Rys. 8. Fotografije powierzchni czołowych zestawu rdzeni po teście IV (bez azotu) przy 5 ml/min



Rys. 9. Fotografije powierzchni czołowych zestawu rdzeni po teście VI (z azotem) przy 5 ml/min

Podsumowanie

Wykonane testy laboratoryjne symulacji procesu selektywnego kwasowania złóż z udziałem azotu pozwalają na opracowanie technologii zatłaczania azotu. Najlepszą efektywność/skuteczność wykonania takiego procesu uzyskano w teście VI (z azotem). Związana była ona ze wzrostem przepuszczalności rdzenia nr 2 (o mniejszej przepuszczalności przed kwasowaniem) oraz ze spadkiem wartości stosunku współczynników stymulacji SI_1/SI_2 rdzeni w badanym zestawie, w stosunku do bazowego testu I (bez azotu). W teście VI ciecz kwasującą była zatłaczana z wydajnością 5 ml/min. Wartość przepuszczalności rdzenia nr 2 (o mniejszej przepuszczalności przed kwasowaniem) wzrosła z 12,62 mD do 49,63 mD, a wartość stosunku współczynników SI_1/SI_2 wyniosła 42,3. W badaniu tym azot zatłaczany był w trakcie procesu kwasowania. Na podstawie obserwacji powierzchni czołowych rdzeni nr 2 (o mniejszej przepuszczalności), w testach III i VI zaobserwowano penetrację tworzących się otworów robaczkowych w głąb tych rdzeni. Oba te testy były prowadzone z zatłaczaniem azotu w połowie procesu kwasowania. Podczas nich na powierzchniach czołowych rdzeni nr 1 (o większej przepuszczalności) zaobserwowano tworzenie się otworu robaczkowego, o dużej średnicy. W przypadku zatłaczania azotu przed procesem kwasowania (w testach

II i V) nie uzyskano widocznego wzrostu przepuszczalności dla rdzenia nr 2 (o mniejszej przepuszczalności). Uzyskano natomiast widoczny wzrost wartości stosunku współczynników SI_1/SI_2 . Wpływ wzrostu wydajności tłoczenia cieczy kwasującej na efektywność procesu selektywnego kwasowania zaobserwowano jedynie w teście VI. Zatłaczanie azotu w trakcie procesu kwasowania może powodować odwrócenie przepływu cieczy kwasującej od stref o większej przepuszczalności i kierowanie jej w kierunku stref o mniejszej przepuszczalności i/lub o większym uszkodzeniu. W wyniku tego można uzyskać ograniczenie ucieczki cieczy kwasującej w strefy o większej przepuszczalności i kierowanie większej jej ilości w stronę stref o mniejszej przepuszczalności, uzyskując tym samym lepszą efektywność wykonania zabiegów kwasowania. Należy również zaznaczyć, że obecność sprężonego azotu podczas zabiegów kwasowania powoduje dodatkowy dopływ energii, która sprzyja wzrostowi szybkości przepływu cieczy poreakcyjnej w matrycy skalnej. Umożliwia to usunięcie nie rozpuszczonych drobin, zalegających w porach lub kanałach porowych. Ułatwia także wynoszenie cieczy poreakcyjnej z odwiertu na powierzchnię. Ma to duże znaczenie w przypadku kwasowania złóż charakteryzujących się małym ciśnieniem złożowym.

Artykuł nadesłano do Redakcji 27.11.2009 r. Przyjęto do druku 15.02.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

Literatura

- [1] Biały E. i in.: *Analiza możliwości metody żelowania mieszanin kwasowych do selektywnego kwasowania złóż*. Oprac. INiG, Kraków, sierpień 2009.
- [2] Chang F.F., Xiangdong Qiu, Nasr-El-Din H.A.: *Chemical diversion techniques used for carbonate matrix acidizing: An overview and case histories*. SPE 106444, 2007.
- [3] Economides M.J., Nolte K.G.: *Reservoir stimulation*. Houston 1989.
- [4] Guidry G.S., Ruiz G.A.: *SXE/N2 matrix acidizing*. SPE 17951, 1989.
- [5] Kasza P. i in.: *Zastosowanie dwufazowych cieczy kwasujących do efektywnej stymulacji złóż*. Oprac. INiG, Krosno, czerwiec 2008.
- [6] Shukla S., Zhu D., Hill A.D.: *Gas assisted acidizing of carbonate formations*. SPE 82273, 2003.



Mgr inż. Mateusz MASŁOWSKI – absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracownik Zakładu Stymulacji Wydobywania Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie, Oddział Krosno. Zajmuje się zagadnieniami związanymi ze stymulacją złóż węglowodorów.