

Mateusz Masłowski

*Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno*

## Nowa metoda usuwania osadu filtracyjnego w otworach kierunkowych

W artykule został przedstawiony mechanizm tworzenia się osadu filtracyjnego. Opisano metody chemiczne stosowane do jego usuwania. Przedstawiono enzym służący do usuwania skrobi z osadu filtracyjnego. Przedstawiono również środki powierzchniowo-czynne służące do zwiększania lepkości płynów przemysłowych (enzymów). Określono skład płynu przemysłowego: woda, inhibitor minerałów ilastych, enzym, środki powierzchniowo-czynne. Przedstawiono własności reologiczne uzyskanych płynów przemysłowych dla różnych szybkości ścinania i różnych koncentracji enzymów. Sprawdzono skuteczność płynów przemysłowych do usuwania osadu filtracyjnego.

### New method to remove filter cake especially in lateral wells

The filter cake is generated during drilling lateral well. In this paper is described mechanism of filter cake generating and chemical methods which are used to remove it. Author presented also enzyme which is used to degrade starch in filter cake and surfactants which provide enhancing viscosity of cleaning fluids. Based on these studies composition of cleaning fluid was determined: water, clay control, enzyme, surfactants. Rheology of cleaning fluids for different shear rates and different enzyme concentrations are presented. Removing filter cake efficiency for tested cleaning fluids were also checked.

### Wstęp

Podczas licznych prac prowadzonych w otworze (związanych z jego wierceniem, dowiercaniem, rekonstrukcją odwiertu) ma miejsce zjawisko filtracji płuczki w złożu, a tym samym dochodzi do tworzenia się tzw. osadu filtracyjnego. Powstały w otworze osad filtracyjny powoduje uszkodzenie pierwotnej przepuszczalności strefy przyodwiertowej. Do jego usuwania stosuje się metody mechaniczne oraz metody chemiczne (kwasy, utleniacze, enzymy). Mają one za zadanie przywrócenie pierwotnej przepuszczalności strefy przyodwiertowej, poprzez usunięcie: biopolimerów (żywicy ksantanowej), środków celulozowych lub skrobiowych i cząstek

CaCO<sub>3</sub>, które są obecne w placku filtracyjnym. Ograniczeniem dla tych metod są: duża szybkość reakcji kwasu i związków utleniających (ze składnikami osadu filtracyjnego) oraz zjawisko korozji, powodowane przez kwasy (szczególnie w wysokiej temperaturze). Jednocześnie powyższe płyny nie są efektywne w niejednorodnych formacjach charakteryzujących się dużą przepuszczalnością, co wymaga zastosowania dużych objętości płynów zabiegowych. Sposobem przezwyciężenia problemów związanych z niejednorodnością natury złóż gazu ziemnego i ropy naftowej jest podniesienie lepkości płynów przemysłowych.

### Mechanizm uszkodzenia strefy przyodwiertowej w otworach kierunkowych

Uszkodzenie formacji złożowej definiowane jest w literaturze [3] jako bariera dla eksploatacji płynu złożowego w strefie przyodwiertowej, która ogranicza jego maksymalne, naturalne wydobycie. Wielkością opisującą to uszkodzenie jest współczynnik *skin efektu* (*S*). Przyjmuje się, że jeśli obliczony współczynnik *skin efektu* jest równy zeru to nie występuje uszkodzenie formacji. Natomiast gdy jego wartość jest dodatnia to mamy do czynienia z jej uszkodzeniem [3]. Do uszkodzenia strefy przyodwiertowej dochodzi podczas kontaktu płuczki ze

skałą zbiornikową. Skały zbiornikowe charakteryzują się niejednorodnością, związaną z występowaniem warstw o dużej przepuszczalności, spękań i mikroszczelin. Czynniki te przyczyniają się do ucieczki płuczki wiertniczej lub jej filtratu w głąb formacji złożowej, co powoduje uszkodzenie jej przepuszczalności. Głównym zjawiskiem towarzyszącym wykonywanym w otworze pracom jest zjawisko filtracji, określane jako zdolność do odfiltrowania fazy rozpraszającej (dyspersyjnej) do przewierconych skał, wskutek różnicy ciśnień w otworze [3, 8]. Czynnikiem

kształtującym filtrację jest mechanizm tworzenia się osadu filtracyjnego, tzw. „placka filtracyjnego”, który jest mniej przepuszczalny niż sama skała. Dlatego też straty płuczki wiertniczej są bardziej regulowane przez osad filtracyjny niż przez skałę, a wielkość ucieczki filtratu lub filtracji cieczy w złożu opisywana jest współczynnikiem ( $C_w$ ) [3]. Wizualny schemat uszkodzenia strefy przyodwiertowej, związany z tworzeniem się osadu filtracyjnego, został przedstawiony na rysunku 1 [10].



**Rys. 1.** Wizualny schemat uszkodzenia strefy przyodwiertowej, związany z tworzeniem się osadu filtracyjnego [10]

Najczęściej stosowanym zagęstnikiem płuczek wiertniczych, stosowanym w odwiertach kierunkowych oraz horyzontalnych, są biopolimery. Jednym z biopolimerów jest żywica ksantanowa, XC-polimer (od nazwy bakterii *Xanthomonas campestris* – używanych do jego produkcji) [8]. Biopolimer w niewielkim stopniu wpływa na obniżanie filtracji, jednak wspomaga w tym zakresie działania innych koloidów ochronnych zmniejszających filtrację i powoduje wzrost lepkości osadu filtracyjnego [8].

Środkami zmniejszającymi filtrację są koloidy ochronne pochodzenia skrobiowego lub celulozowego. W praktyce przemysłowej koloidy ochronne pochodzenia skro-

biowego stosuje się przy wierceniu otworów w złożach o niższych temperaturach. W przypadku występowania wysokich temperatur złożowych (powyżej 90°C) stosuje się koloidy ochronne pochodzenia celulozowego. Zdolność koloidu ochronnego do obniżania filtracji płuczki wiertniczej uzależniona jest w znacznym stopniu od jego względnej masy cząsteczkowej – im jest ona większa, tym skuteczniej zmniejszana jest filtracja [8]. Ziarenka skrobi zawierają głównie dwa składniki: amylopektynę (stanowiącą otoczkę ziarenek) oraz amylozę (wypełniającą ich wnętrze). Wysoka hydrofilność i duża względna masa cząsteczkowa umożliwiają otrzymywanie ze skrobi bardzo efektywnych środków regulujących filtrację płuczek – praktycznie niezależnie od stopnia ich zasolenia i rodzaju rozpuszczonych w płuczce soli. Często stosowanym koloidem ochronnym podczas wierceń w skałach piaskowcowych na przedgórzu Karpat jest modyfikowana skrobia ziemniaczana [8].

Kolejnym składnikiem płuczki wiertniczym wchodzącym w skład osadu filtracyjnego jest tzw. blokator (faza stała). Jako blokatory używane są różne odmiany węgla wapnia  $\text{CaCO}_3$  (marmur, wapień, dolomit, kreda) oraz sole ziarniste (sól kamienna). Blokator może również pełnić rolę materiału obciążającego, zwiększającego gęstość płuczki. Zróżnicowanie wymiarów cząstek blokatora umożliwia tworzenie się na ścianie otworu odpowiedniego osadu filtracyjnego oraz wpływa na szybkość jego tworzenia. Blokatory węglanowe najczęściej stosuje się w skałach piaskowcowych, natomiast blokatory solne stosuje się w skałach zasolonych oraz w płuczkach, w których fazę ciekłą stanowi nasycony roztwór  $\text{NaCl}$  lub innej soli [8].

W wyniku odpowiedniego połączenia przedstawionych powyżej składników płuczki, tj. zagęstnika, środka zmniejszającego filtrację, blokatora i materiału obciążającego, uzyskuje się małą filtrację – poprzez tworzenie się osadu filtracyjnego o małej przepuszczalności. Powstały osad filtracyjny stanowi uszkodzenie pierwotnej przepuszczalności strefy przyodwiertowej, utrzymując wydobycie płynu złożowego.

### Przegląd metod chemicznych używanych do usuwania osadu filtracyjnego ze strefy przyodwiertowej

Metody chemiczne służące do usuwania uszkodzenia strefy przyodwiertowej, związanego z tworzeniem się osadu filtracyjnego, polegają na zatłoczeniu cieczy przemysłowej (kwasy, utleniacze, enzymy lub kombinacja tych środków). Zatłoczenie cieczy odbywa się przez rury

wydobywcze, wiertnicze albo przy użyciu sprzętu Coiled Tubing. Następnie pozostawia się ją przez pewien czas w otworze. Istnieje również możliwość zatłoczenia składników cieczy przemysłowych w różnych kolejnościach. Kwasami stosowanymi w zabiegach usuwania osadu filtra-

cyjnego są: kwas solny HCl, kwas octowy CH<sub>3</sub>COOH oraz kwas mrówkowy HCOOH [1, 3]. Służą one głównie do usunięcia blokatora (np. cząsteczek węglanowych) [3].

Do usuwania osadu filtracyjnego stosuje się także różnego rodzaju utleniacze [1, 3, 7]. Zasada ich działania polega na zmniejszaniu lepkości osadu filtracyjnego, poprzez działanie utleniacza na łańcuchy polimeru, co powoduje ich rozrywanie na mniejsze fragmenty. Zaletą utleniaczy jest ich szeroki zakres działania, przy pH o wartości od 3 do 14 [3]. Utleniacze nie mogą być stosowane w środowisku kwaśnym, ponieważ możliwe jest utlenianie H<sub>2</sub>S do siarki elementarnej (S) i zatykanie porów [7].

Innymi środkami stosowanymi do zmniejszania lepkości osadu filtracyjnego są enzymy [1, 3, 5, 6, 7, 9]. Enzymy są to biologiczne katalizatory, proteiny, które przyspieszają specyficzne reakcje chemiczne wskutek obniżenia ich energii aktywacji. Ze względu na proteinową naturę, aktywność enzymów jest zależna od parametrów fizyko-chemicznych środowiska, tj.: temperatury i pH. Szybkość reakcji enzymatycznych wzrasta wraz z temperaturą. Po przekroczeniu temperatury optymalnej postępuje denaturacja termiczna enzymów i ich aktywność gwałtownie spada. Większość enzymów ma także swoje optymalne pH działania. Optimum pH, obok optimum temperaturowego, to drugi najważniejszy parametr środowiska, charakteryzujący aktywność enzymów. Enzymy mają największą aktywność w swoim optymalnym zakresie pH i aktywność ta spada wraz ze zwiększeniem lub zmniejszeniem pH poza ten zakres. Szybkość reakcji enzymatycznych wzrasta również wraz ze zwiększaniem stężenia enzymu. Podobnie jak wszystkie katalizatory, enzymy nie zmieniają stanu równowagi reakcji chemicznej, a jedynie przyspieszają jego ustalenie. Zazwyczaj w obecności enzymu reakcja zachodzi w takim samym kierunku, w jakim zachodziłaby spontanicznie, a jedynie wzrasta jej szybkość. W większości przypadków enzymy są niezwykle specyficzne wobec swoich substratów [4, 9].

Do usuwania XC-polimeru z osadu filtracyjnego stosuje się enzymy, które niszczą każde wiąza-

nie  $\alpha$ -1,2 albo  $\beta$ -1,4 glikozydowe z podstawnikiem oraz wiązanie  $\beta$ -1,4 ze szkieletem biopolimeru [5, 6].

Do usuwania skrobi używa się enzymy zawierające dwa typy amylazy: alfa ( $\alpha$ ) i beta ( $\beta$ ), które w różny sposób powodują hydrolizę skrobi.  $\alpha$ -amylaza jest z nich bardziej efektywna i degraduje polisacharydową skrobię na mniejsze jednostki oligosacharydowe: dekstryny i „zwykły” cukier [9]. Mechanizm reakcji degradowania amylozy i amylopektyny do oligosacharydów przez  $\alpha$ -amylazę został przedstawiony na rysunku 2 [9].

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że utleniacze oraz enzymy nie usuwają z osadu filtracyjnego blokatora (np. węglanów). Służą jedynie do usuwania zagęstnika (biopolimeru) – środka zmniejszającego filtrację (skrobi lub pochodnych celulozowych). Dla usunięcia blokatora wymagane jest wówczas wysokie ciśnienie złożowe, umożliwiające wyniesienie go na powierzchnię. W przypadku niskich ciśnień konieczne jest zastosowanie dodatkowo kwasu, w celu rozpuszczenia blokatora (np. węglanów).

W ostatnich latach podjęto próby stosowania kombinacji wyżej przedstawionych technik chemicznych, służących do usuwania uszkodzenia związanego z tworzeniem się osadu filtracyjnego. Miały one za zadanie lepsze (dokładniejsze) oczyszczanie uszkodzenia strefy przyodwiertowej, w przypadku odwiertów kierunkowych i horyzontalnych. Polegały one na równoczesnym zastosowaniu w otworze różnych enzymów, w kombinacji z kwasami (głównie organicznymi) [10].

Struktura kompleksu enzym-substrat dla alfa-amylazy i pięciu monomerycznych jednostek z skrobią polisacharydową (czarna barwa).



**Rys. 2.** Mechanizm degradowania amylozy i amylopektyny do oligosacharydów przez  $\alpha$ -amylazę [9]

## Charakterystyka środków chemicznych użytych w badaniach laboratoryjnych

Do wytworzenia osadu filtracyjnego została użyta płuczka potasowo-polimerowa o składzie przedstawionym w tablicy 1. Do usunięcia uszkodzenia związanego z wytworzonym osadem filtracyjnym zastosowano płyn czyszczący składający się z następujących składników:

- wody (woda wodociągowa),
- inhibitora minerałów ilastych (In),
- enzymu (E),
- środków powierzchniowo-czynnych (SPCz).

Woda wodociągowa stanowi bazę przedstawionego powyżej składu płynu przemywającego. Jako inhibitora minerałów ilastych użyto środka chemicznego będącego pochodną chlorku. Stosowany jest on w zabiegach hydraulicznego szczelinowania w płynach zabiegowych.

Tablica 1. Skład płuczki potasowo-polimerowej

Składnik	Zawartość [%]	Właściwości płuczki
Woda wodociągowa	100	pH = 10,2
KCl	1	
XCD-polimer	0,1	
Środek skrobiowy	3	
Brocyl	0,1	
Blokator węglanowy	7	

### Dobór składu płynów przemywających do usuwania osadu filtracyjnego

Zadaniem płynu przemywającego osad filtracyjny, który powstaje na skale tworzącej ścianę otworu wiertniczego oraz w strefie przyodwiertowej, jest usunięcie żywicy ksantanowej, skrobi oraz cząsteczek węglanowych. Składniki te wchodziły w skład płuczki potasowo-polimerowej (o składzie przedstawionym w tablicy 1), stosowanej podczas wiercenia i dowiercania oraz rekonstrukcji odwiertów kierunkowych (o nachyleniu do 40° od pionowej osi odwiertu). Odwierty te usytuowane są w formacjach piaskowcowych przedgórza Karpat. Temperatura w przewiercanych warstwach tych złóż wynosi ok. 60°C.

Usunięcie żywicy ksantanowej i skrobi przez enzymy polega na zmniejszeniu lepkości osadu filtracyjnego. Z kolei usunięcie z niego cząsteczek węglanowych polega na przetransportowaniu ich (w formie zawiesiny) w płynie z miejsca uszkodzenia strefy przyodwiertowej na powierzchnię odwiertu. Związane jest to z uzyskaniem podwyższonej lepkości płynu poreakcyjnego w momencie jego odbioru na powierzchni. Innym zadaniem płynu przemywającego o podwyższonej lepkości jest ogranicze-

nie jego ucieczki w złożę podczas procesu zatłaczania. Zapobiega on pęcznieniu oraz migracji minerałów ilastych. Jako enzym został zastosowany preparat enzymatyczny, który zawiera  $\alpha$ -amylazę, otrzymywaną w procesie biosyntezy z wykorzystaniem szczepu bakterii *Bacillus subtilis*. Enzym ten hydrolizuje szybko i powoduje rozerwanie wiązania  $\alpha$ -(1,4) glikozydowego w cząsteczce skrobi (amylozie, amylopektynie), tworząc cząsteczki dekstryn, oligocukrów i maltozy.

W celu podwyższenia lepkości płynu przemywającego zastosowano system dwóch środków powierzchniowo-czynnych: anionowego (ASPCz) i kationowego (KSPCz). Środki te – dodane w odpowiedniej proporcji i stężeniu – tworzą lepkosprężysty płyn, pokazany na rysunku 3 [2].



Rys. 3. Tworzenie się płynu lepkosprężystego (Z) w wyniku wymieszania dwóch środków powierzchniowo-czynnych: anionowego i kationowego (A, K) [2]

nie jego ucieczki w złożę podczas procesu zatłaczania. Podczas doboru składników płynów przemywających należy również uwzględnić obecność minerałów ilastych w skałach piaskowcowych, które mogą ulegać pęcznieniu oraz migracji.

Do badań wytypowano trzy płyny czyszczące, o różnej zawartości enzymu E w składzie płynu przemywającego:

- płyn nr 1 (woda + 0,12% In + 2% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz), pH = 7,20;
- płyn nr 2 (woda + 0,12% In + 3% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz), pH = 6,65;
- płyn nr 3 (woda + 0,12% In + 4% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz), pH = 6,52.

Zatłaczany płyn przemywający (podobnie jak płyn szczelinujący) poddawany jest działaniu naprężeń ścinających i temperatury. Wraz ze wzrostem szybkości tłoczenia wzrasta działanie naprężeń ścinających, powodując obniżenie jego lepkości dynamicznej. Po przejściu przez kanały perforacyjne szybkość przepływu znacznie maleje. Następuje wówczas kontakt płynu z uszkodzeniem

strefy przyodwiertowej. Uwidacznia się również znaczący wpływ temperatury na lepkość płynu przemywającego. Podczas kontaktu płynu z osadem filtracyjnym, szybkość ścinania jest bliska zeru. Natomiast w przypadku, gdy przepływ płynu odbywa się wzdłuż szczeliny, szybkość ścinania wynosi ok.  $40 \text{ s}^{-1}$  (podobnie jak w przypadku zabiegów szczelinowania hydraulicznego z podsadzką). Najważniejszymi właściwościami charakteryzującymi płyny o podwyższonej lepkości dynamicznej są parametry reologiczne w trakcie przepływu, czyli zmiana lepkości dynamicznej w zależności od szybkości ścinania przy określonych temperaturach. Opiswane są one za pomocą różnych modeli reologicznych. Najlepszą korelację uzyskuje się w modelu potęgowym (*Power Law*). W modelu tym właściwości reologiczne cieczy nienewtonowskich opisywane są dwoma parametrami, tj. współczynnikiem konsystencji ( $k'$ ) i współczynnikiem potęgowym ( $n'$ ). Parametry ( $k'$ ) i ( $n'$ ) dla płynów przemywających zostały wyznaczone na w pełni zautomatyzowanym, wysokotemperaturowym i wysokociśnieniowym wiskozymetrze NORDMAN, w INiG Oddział Krosno. W tym celu wykorzystano test użytkownika, ustawiając czas badania na okres 92 minut i wyznaczając parametry ( $k'$ ) i ( $n'$ ) co 10 minut. Otrzymane wartości pozwoliły na wy-

znaczenie lepkości dynamicznej płynu szczelinującego w oparciu o równanie 1:

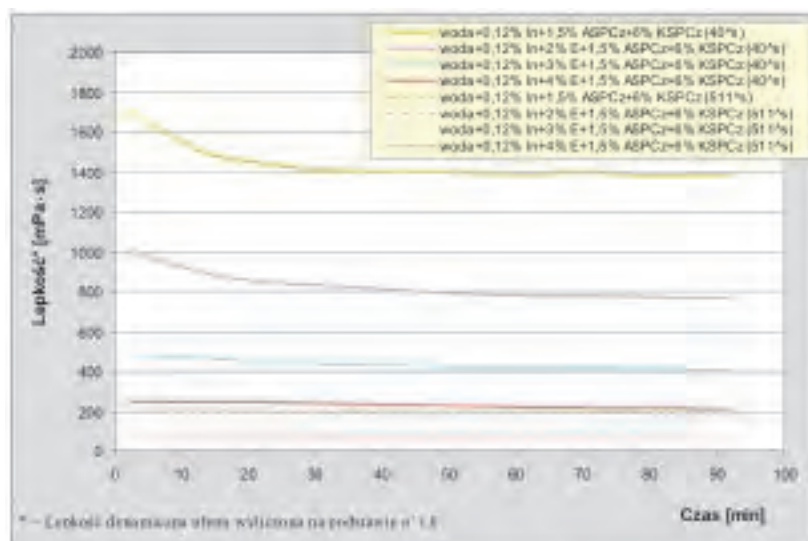
$$\mu = k' \dot{\gamma}^{(n'-1)} \quad (1)$$

gdzie:

- $\mu$  – lepkość dynamiczna [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ],
- $k'$  – współczynnik konsystencji [ $\text{Pa}\cdot\text{s}^{n'}$ ],
- $n'$  – współczynnik potęgowy [-].

Wyznaczone krzywe lepkości dynamicznej płynów przemywających, przy różnych zawartościach enzymu E oraz przy różnych szybkościach ścinania, zostały przedstawione na rysunku 4.

Zgodnie z przebiegiem krzywych lepkości dynamicznych płynów czyszczących pokazanych na rysunku 1, widać, że wzrost zawartości enzymu E w płynie oraz wzrost szybkości ścinania powodują zmniejszenie jego lepkości. Zaobserwowano również, że po upływie ok. 50 minut następuje stabilizacja lepkości badanych płynów czyszczących. Uzyskanie lepkości dynamicznej płynu przemywającego pozwala na utrzymanie blokatora (cząsteczek węglanowych) w formie zawiesiny, a tym samym przetransportowanie go z miejsca uszkodzenia strefy przyotworowej na powierzchnię.



**Rys. 4.** Wpływ stężenia enzymu E na lepkość dynamiczną płynu przemywającego w temperaturze  $60^{\circ}\text{C}$ , przy szybkościach ścinania  $40 \text{ s}^{-1}$  i  $511 \text{ s}^{-1}$

### Badania na rdzeniach naturalnych

Badania skuteczności płynów przemywających służących do usuwania uszkodzenia spowodowanego wytworzonym osadem filtracyjnym przeprowadzono w temperaturze  $60^{\circ}\text{C}$  na stanowisku do pomiaru filtracji, przedstawionym na rysunku 5. W badaniach zostały użyte rdzenie wycięte z bloku skalnego piaskowca białego z Chęciny. Posiadały one średnicę  $3,81 \text{ cm}$  i długość ok.  $1,1 \text{ cm}$ .

Przebieg testu tworzenia i usuwania osadu filtracyjnego polegał na wytworzeniu osadu filtracyjnego na rdzeniu, przez płuczkę wiertniczą o składzie podanym w tabelicy 1. Płuczka wiertnicza była zatłaczana do komory filtracyjnej ze stałą wydajnością tłoczenia ok.  $2 \text{ ml/min}$ . Temperatura w komorze wynosiła  $60^{\circ}\text{C}$ . W trakcie zatłaczania płuczki odbierano filtrat płuczki w ilości ok.

27÷28 ml, po upływie 30 minut (licząc od momentu pojawienia się filtratu). Określano również wartość końcowego ciśnienia w komorze filtracyjnej, które wahało się w granicach 118÷129 psi. Następnie po rozkręceniu komory fotografowano wytworzony osad filtracyjny, który został przedstawiony na rysunku 6.

Przyjmuje się, że przepuszczalność wytworzonego osadu filtracyjnego jest bliska zeru. Kolejnym etapem badań było zatłaczanie do komory filtracyjnej płynu przemywającego, o składzie:

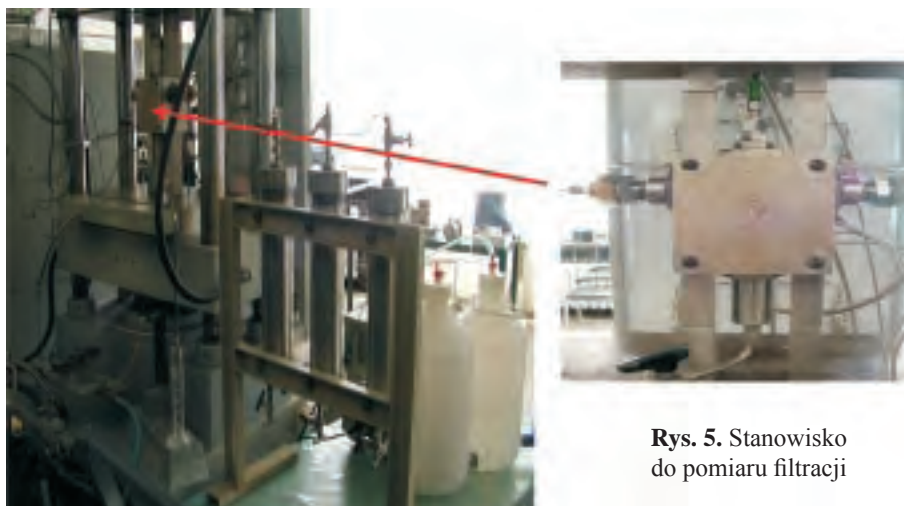
- woda + 0,12% In + 2% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz (test nr 1 na rdzeniu nr 10),
- woda + 0,12% In + 3% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz (test nr 2 na rdzeniu nr 11),
- woda + 0,12% In + 4% E + 1,5% ASPCz + 6% KSPCz (test nr 3 na rdzeniu nr 15).

Płyn przemywający był zatłaczany ze stałą wydajnością tłoczenia ok. 2 ml/min. Temperatura w komorze wynosiła 60°C. Po przejściu przez rdzeń ok. 2 ml płynu przemywającego, zamykano zawory na wejściu i wyjściu z komory. Następnie umieszczano komorę w suszarce,

w temperaturze 60°C na okres 24 godzin. Okres ten był zbliżony do okresu stosowanego w przypadku badań płynów przemywających opisanych w literaturze [1, 5, 7]. Po upływie tego czasu rozkręcano komorę filtracyjną i fotografowano usunięcie osadu filtracyjnego, w celu oceny wizualnej skutków jego usuwania. Wyniki przeprowadzonych testów zostały przedstawione na rysunku 7.

Oceniając wizualnie przedstawione na rysunku 7 fotografie, można stwierdzić, że na powierzchni rdzenia został jedynie biały osad, którym może być blokator (cząsteczki węglanowe) występujący w płuczkach wiertniczej.

W trakcie badań wykonano również pomiar współczynnika przepuszczalności rdzenia dla azotu i 2% roztworu



Rys. 5. Stanowisko do pomiaru filtracji



Test nr 1 na rdzeniu nr 10

Test nr 2 na rdzeniu nr 11

Test nr 3 na rdzeniu nr 15

Rys. 6. Widok uszkodzenia rdzenia płuczką wiertniczą



Test nr 1 na rdzeniu nr 10

Test nr 2 na rdzeniu nr 11

Test nr 3 na rdzeniu nr 15

Rys. 7. Wygląd usuniętego osadu filtracyjnego

KCl przed uszkodzeniem rdzenia ( $k_{pg}$  – dla azotu,  $k_{ps}$  – dla 2% roztworu KCl) oraz po usunięciu osadu filtracyjnego ( $k_{kg}$  – dla azotu,  $k_{ks}$  – dla 2% roztworu KCl). Pomiar współczynnika przepuszczalności rdzenia dla azotu był wykonywany na przepuszczalnościomierzu gazowym. Natomiast określenie przepuszczalności rdzenia dla 2% roztworu KCl wykonywano na stanowisku do pomiaru filtracji. Polegało ono na przepływie przez rdzeń 2% roztworu KCl (przy stałej wydajności 2 ml/min), do momentu uzyskanie stabilnego ciśnienia w komorze. Do odczytu różnicy ciśnień DP wykorzystano stanowisko Proppant Conductivity. Pomiar ten powtórzono dla wydajności przepływu 4 ml/min oraz 6 ml/min 2% roztworu KCl. Dla określenia wartości przepuszczalności rdzenia dla konkretnego przepływu wykorzystano prawo Darcy’ego, opisane równaniem (2):

$$k = \frac{q \cdot \mu \cdot L}{F \cdot \Delta P} \quad (2)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik przepuszczalności [mD],

$q$  – wydajność przepływu [m<sup>3</sup>/s],

$F$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia, równe  $D \cdot R^2$  [m<sup>2</sup>], gdzie  $R$  – promień rdzenia [m],  
 $\Delta P$  – różnica ciśnień przed i za rdzeniem [Pa], wartość ta odczytywana była w programie na stanowisku Proppant Conductivity [psi],

$\mu$  – lepkość dynamiczna 2% roztworu KCl [Pa·s], przyjmuje się wartość 0,488 cP = 488·10<sup>-6</sup> Pa·s,

$L$  – długość rdzenia [m].

Jako wartość współczynnika przepuszczalności rdzenia ( $k_{ps}$  lub  $k_{ks}$ ) przyjęto średnią arytmetyczną z wyliczonej przepuszczalności rdzenia przy wydajności 2, 4, 6 ml/min.

Wyniki wyznaczonych współczynników przepuszczalności rdzeni przed uszkodzeniem oraz po usunięciu osadu filtracyjnego umieszczono w tablicy 2. Posłużyły one do określenia skuteczności usuwania osadu filtracyjnego przy przepływie gazu ( $k_{kg}/k_{pg}$ ) i solanki ( $k_{ks}/k_{ps}$ ), w celu przywrócenia pierwotnej przepuszczalności skały.

W trakcie badań wykonano również pomiar współczynnika przepuszczalności rdzenia dla azotu i 2% roztworu KCl: przed uszkodzeniem rdzenia oraz po usunięciu osadu filtracyjnego.

**Tablica 2.** Wyniki przeprowadzonych badań oczyszczania rdzenia z osadu filtracyjnego

Nr rżenia/ nr testu	Wartości $k$ przed uszkodzeniem rdzenia		Wartości $k$ po oczyszczeniu rdzenia		Skuteczność oczyszczania, badana azotem ( $k_{kg}/k_{pg} \cdot 100\%$ ) [%]	Skuteczność oczyszczania, badana 2% KCl ( $k_{ks}/k_{ps} \cdot 100\%$ ) [%]
	$k_{pg}$ dla azotu [mD]	$k_{ps}$ dla 2% roztworu KCl [mD]	$k_{kg}$ dla azotu [mD]	$k_{ks}$ dla 2% roztworu KCl [mD]		
10/1	88,65	0,45	46,15	6,92	52,1	73,2
11/2	94,89	4,93	37,11	2,15	39,1	43,6
15/3	89,00	0,76	47,27	1,85	53,0	38,8

$k_{pg}$  – początkowa wartość współczynnika przepuszczalności rdzenia dla azotu [mD].

$k_{ps}$  – początkowa wartość współczynnika przepuszczalności rdzenia dla 2% roztworu KCl [mD].

$k_{kg}$  – końcowa wartość współczynnika przepuszczalności rdzenia dla azotu [mD].

$k_{ks}$  – końcowa wartość współczynnika przepuszczalności rdzenia dla 2% roztworu KCl [mD].

### Podsumowanie

Płyny przemywające o podwyższonej lepkości pozwalają na ograniczenie szybkiej ich ucieczki w głąb złoża, podczas oczyszczania strefy przyotworowej ze składników osadu filtracyjnego. Ma to znaczenie w przypadku występowania w formacji złożowej warstw o dużej przepuszczalności oraz szczelin i spekań. Zastosowanie niniejszym płynów pozwala na intensywniejsze usunięcie blokatora (cząsteczek węglanowych), w wyniku transportu ich z miejsca uszkodzenia strefy przyotworowej na powierzchnię.

W przypadku niskich ciśnień złożowych wskazana jest modyfikacja płynu przemywającego. Modyfikacja ta może polegać na włączeniu do jego składu kwasu solnego, kwasu organicznego albo prekursora kwasu (wytwarzanie *in-situ* kwasu octowego w złożu). Spowodowałoby to lepsze usunięcie cząsteczek węglanowych obecnych w osadzie filtracyjnym. Wskazane jest również, aby płyn czyszczący posiadał odpowiednią wartość pH, najkorzystniejszą dla najlepszej aktywności danego enzymu.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

## Literatura

- [1] Beall B.B., Brannon H.D., Tjon Joe Pin R.M., O'Driscoll K.: *Evaluation of a New Technique For Removing Horizontal Wellbore Damage Attributable to Grill-In Filter Cake*. SPE 36429, 1996.
- [2] Czupski M. i in.: *Opracowanie technologii płynów lepko-sprężystych w aspekcie jej wykorzystania w zabiegach hydraulicznego szczelinowania*. INiG, Kraków 2007.
- [3] Economides M.J., Kenneth G.N.: *Reservoir stimulation*. Houston 1989.
- [4] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Enzymy>
- [5] Mark R.L., Monroe T.D., Syed A.A.: *Factors Affecting the Performance of Enzyme Breakers for Removal of Xanthan-Based Filter Cakes*. SPE 58749, 2000.
- [6] Nasr-El-Din H.A., Al-Otaibi M.B., Al-Qahtani A.A., Al-Fuwaires O.A.: *Filter-Cake Cleanup In MRC Wells Rusing Enzyme/Surfactant Solutions*. SPE 98300, 2006.
- [7] Nasr-El-Din H.A., Al-Otaibi M.B., Al-Qahtani A.A., Samuel M.: *An Effective Fluid Formulation to Remove Drilling-Fluid Mudcake in Horizontal and Multilateral Wells*. SPE 87960-PA-P, 2007.
- [8] Raczkowski J., Półchłopek T.: *Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych*. Prace IGNiG Nr 95, Kraków 1998.
- [9] Sanders M.W., Twycross J.; Buchan C.R., Cameron J.J.: *A Quantitative Method for Estimating alfa-Amylase-Based Enzyme Concentrations in Wellsite Field Samples and Application on a Gravel Pack Completion*. SPE AADE-04-DF-HO-35, 2004.
- [10] [www.cleansorb.com](http://www.cleansorb.com)



Mgr inż. Mateusz MASŁOWSKI – absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracownik Zakładu Symulacji Wydobywania Węglowodorów w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie, Oddział Krosno.

### ZAKŁAD SYMULACJI WYDOBYCIA WĘGLOWODORÓW

- przygotowywanie receptur i badania płynów zabiegowych do stymulacji wydobywania ropy i gazu;
- symulacje przepływów i badania reologiczne w skali półtechnicznej;
- badania materiałów podsadzkowych;
- badania przewodności szczeliny w zależności od użytego materiału podsadzkowego i płynu zabiegowego;
- symulacje usuwania uszkodzenia strefy przyodwiertowej;
- oznaczanie współczynnika przepuszczalności i porowatości skał, kamienia cementowego, betonu itp.;
- dobór środków regulujących właściwości reologiczne płynów (SPCz, polimery itp.);
- badania szybkości reakcji skał złożowych z cieczami kwasującymi;
- laboratoryjne symulacje zabiegów kwasowania w warunkach złożowych;
- wykonywanie projektów technologicznych zabiegów stymulacji;
- analiza testów miniszczelinowania i analiza pozabiegowa;
- laboratoryjne symulacje metod wspomagających wydobywanie węglowodorów.



Kierownik: dr inż. Piotr Kasza  
 Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno  
 Telefon: 13 436-89-41 wew. 229  
 Faks: 13 436-79-71  
 E-mail: [piotr.kasza@inig.pl](mailto:piotr.kasza@inig.pl)