

Marek Czupski

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Zastosowanie mikroemulsji jako składnika poprawiającego sprawność płynów szczelinujących i odbiór cieczy po wykonanym zabiegu

Wstęp

Jednym z podstawowych czynników mających wpływ na powodzenie zabiegów hydraulicznego szczelinowania skał – zarówno w złożach konwencjonalnych, jak i niekonwencjonalnych – jest odpowiednio dobrany płyn. Jest on kompozycją wielu dodatków, w tym również środków powierzchniowo czynnych. Jednym z ich zadań w przypadku szczelinowania odwiertów ropnych płynem na bazie wody jest zapobieganie tworzeniu się emulsji pomiędzy ropą złożową a płynem zabiegowym [8]. Dla złóż gazowych kluczowym czynnikiem jest natomiast oczyszczenie odwiertu po wykonanym zabiegu, które czasami staje się bardzo trudne ze względu na zatrzymanie płynu w pobliżu i wewnątrz szczeliny. Problemy te są szczególnie widoczne dla złóż gazowych o niskich temperaturach, ciśnieniach złożowych i przepuszczalnościach. Dlatego głównym za-

daniem środków powierzchniowo czynnych dodawanych do płynów szczelinujących jest zredukowanie napięcia powierzchniowego na granicy faz, kąta zwilżania i kontrola filtracji. Jednak jak wykazuje praktyka przemysłowa, zastosowanie konwencjonalnych środków powierzchniowo czynnych nie przynosi zadowalających efektów [5, 7], dlatego od kilku lat jako dodatki do płynów zabiegowych z powodzeniem stosowane są tzw. mikroemulsje, które stanowią mieszaninę wody, rozpuszczalnika, współrozpuszczalnika (dodatkowego rozpuszczalnika) i środków powierzchniowo czynnych. Stąd też w niniejszym artykule przedstawiono badania, które miały na celu sprawdzenie wpływu, jaki na właściwości cieczy szczelinujących będzie miało zastosowanie w ich składzie dostępnych na rynku mikroemulsji.

Zjawisko uszkodzenia przepuszczalności złóż związane z filtracją płynu zabiegowego podczas hydraulicznego szczelinowania oraz sposoby jego ograniczenia

Podczas zabiegów hydraulicznego szczelinowania skał szybkość filtracji płynu do złoża jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na geometrię szczeliny. Filtracja spowodowana jest różnicą pomiędzy ciśnieniem szczelinowania a ciśnieniem złożowym. Efektywność płynu szczelinującego definiowana jest przez objętość płynu traconego w trakcie zabiegu w wyniku tego zjawiska lub też poprzez stosunek objętości szczeliny do zatłoczonej objętości płynu. Dodatkowo szybkość filtracji wpływa na czas zamknięcia szczeliny oraz na końcowy rozkład materiału podsadzki w szczelinie. Zbyt duża nie-

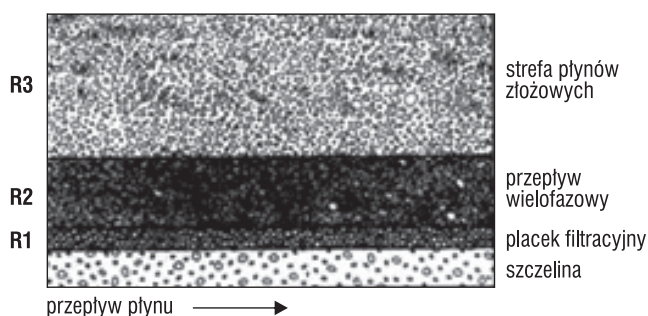
kontrolowana filtracja cieczy szczelinującej w matrycę skalną podczas zabiegu szczelinowania może prowadzić do jego przedwczesnego zakończenia (tzw. *screen out*). Szybkość filtracji płynu do złoża jest zależna od jego współczynnika filtracji (C), na który z kolei ma wpływ kombinacja trzech rodzajów czynników występujących podczas zabiegu szczelinowania. Są to: wpływ lepkości filtratu i względnej przepuszczalności (C_v), wpływ lepkości/ściśliwości płynu złożowego (C_c) i wpływ tworzenia placka filtracyjnego (C_w). Pierwsze dwa współczynniki mogą być obliczone na podstawie danych złożowych oraz lepkości

plynu szczelinującego. Natomiast trzeci współczynnik musi być wyznaczony eksperymentalnie [3].

Podczas wtłaczania do złoża plynu szczelinującego następuje wytworzenie się trzech stref [2]:

- placka filtracyjnego (tzw. *filter cake*) o różnej grubości,
- strefy zajętej przez filtrat,
- obszaru zajmowanego wyłącznie przez płyny złożowe.

W pierwszej strefie (R1) osadzane są cząsteczki polimeru lub inne ciała stałe tworzące placek, przez który filtruje płyn szczelinujący (rys. 1).

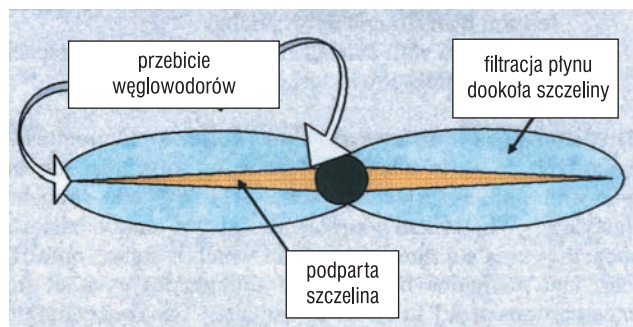


Rys. 1. Schemat stref filtracji plynu szczelinującego [2]

Grubość tego placeka zależy od składu plynu, szybkości ścinania w szczelinie oraz czasu. Druga strefa (R2) zawiera filtrat o właściwościach, które mogą zależeć od czasu (degradacja w wyniku przepływu przez placek i złożo), jak również od pierwotnego składu plynu. Charakterystyka przepływu w tej strefie może zostać zmieniona przez filtrat przy ewentualnym osadzeniu się cząstek w ośrodku porowatym. W trzecim obszarze (R3) następuje przepływ jedynie plynów złożowych. Granica pomiędzy strefami R2 i R3 definiowana jest jako maksymalna odległość, na którą penetruje filtrat, a jej położenie zależy od czasu.

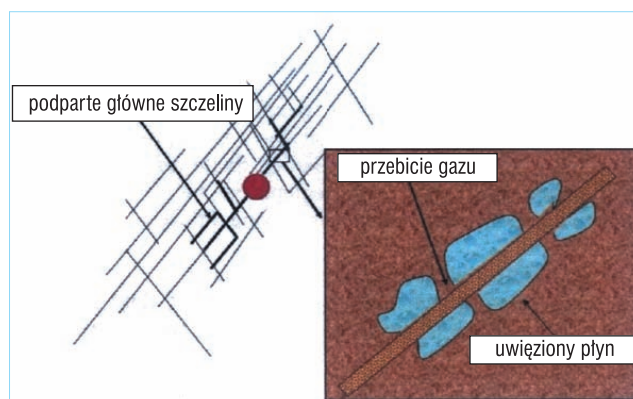
W przypadku szczelinowania skał w odwiertach gazowych przy użyciu plynów szczelinujących na bazie wody kluczowe znaczenie dla ich oczyszczenia po zabiegu ma zatrzymanie plynu w pobliżu wygenerowanej szczeliny oraz redukcja napięcia powierzchniowego pomiędzy skałą i zatłaczanym płynem [6]. Jak zilustrowano na rysunku 2, duże ilości zatłoczonych plynów mogą zostać uwięzione w obszarze w pobliżu podsadzonej szczeliny. Gaz przebija się w takim przypadku w punktach o najmniejszym oporze hydraulicznym, a więc na końcu szczeliny lub w pobliżu odwiertu.

Kiedy to następuje, wysokie nasycenie wodą ma negatywny wpływ na względną przepuszczalność skał zbiornikowych dla gazu, w ten sposób znacznie zakłócając przepływ gazu do szczeliny, a następnie do odwiertu. Prowadzi to do dłuższego czasu oczyszczania odwiertu i jego słabej wydajności.



Rys. 2. Schemat podsadzonej szczeliny z otaczającym ją płynem. Gaz przebija się w miejscach o najmniejszym oporze hydraulicznym, pozostawiając uwięziony filtrat [6]

Podobne problemy zaobserwowano również w przypadku szczelinowania skał w odwiertach na złożu Barnett Shale w Teksasie [7]. Na rysunku 3 przedstawiono rozległy system szczelin, który został zaproponowany na podstawie mikrosejsmiki dla jednego z odwiertów, w którym wykonano zabieg szczelinowania.



Rys. 3. Schemat pojedynczego systemu szczelin dla odwiertu usytuowanego na złożu Barnett z płynem uwięzionym dookoła szczelin [7]

Porównanie objętości plynów odebranych po zabiegu do objętości zatłoczonych wskazywało, że od 60 do 90% zatłoczonego plynu pozostawało w złożu. Zaznaczone jest to również na rysunku 3, który pokazuje płyn uwięziony blisko jednej ze szczelin z powodu wysokich ciśnień kapilarnych. Bardzo ważny jest również profil oczyszczania wewnątrz szczeliny. Jak już wspomniano wcześniej, gaz ma tendencję do przepływu w miejscach, gdzie napotyka najniższy opór, a więc np. na szczycie szczeliny lub w pobliżu odwiertu. Przepływa więc wtedy poprzez górną część szczeliny, omijając dużą ilość zatłoczzonego plynu zabiegowego. Płyn ten, uwięziony zarówno w pobliżu ścian szczeliny, jak i wewnątrz obszaru podpartej szczeliny, wpływa niekorzystnie na względną przepuszczalność skał dla gazu, a zatem znacznie osłabia przepływ gazu do i przez podsadzoną szczelinę do odwiertu.

Filtrację cieczy szczelinującej można ograniczyć poprzez zwiększenie koncentracji polimeru czy zastosowanie stałych i płynnych dodatków do kontroli filtracji, ale to z kolei niekorzystnie wpływa na przepuszczalność wytworzonej w trakcie zabiegu szczeliny. Istnieje również możliwość chwilowego zwiększenia koncentracji podszadki w trakcie jej tłoczenia (tzw. *slag*).

To niekorzystne zjawisko można ograniczyć również poprzez zastosowanie odpowiednich dodatków chemicznych do cieczy, które spowodują [7]:

- zmniejszenie filtracji w celu zredukowania obszaru uszkodzenia przepuszczalności dookoła szczeliny,
- zminimalizowanie efektu kapilarnego płynu filtrującego w złożu poprzez kontrolę właściwości powierzchniowych (napięcia powierzchniowego),
- wypieranie zatłoczonego płynu ze złoża w sposób podobny do tłoka – tak, aby pozostawić niższe nasycenie wodą (S_w) i wyższą przepuszczalność skał zbiornikowych dla gazu (k_{rg}) oraz niższy efektywny stosunek uszkodzenia dookoła szczeliny,
- niższe ciśnienie niezbędne do przepływu płynu w wypełnieniu podsadzkowym wewnątrz szczeliny. Wyparcie w sposób podobny do tłoka powoduje wyższy procent oczyszczenia i większą efektywną długość szczeliny.

W tym celu w skład płynów szczelinujących włączane są różnego rodzaju środki powierzchniowo czynne, a od kilku lat z powodzeniem stosowane są na świecie mikroemulsje. Są to termodynamicznie stabilne mieszaniny środka powierzchniowo czynnego, rozpuszczalnika/ropy/współrozpuszczalnika i wody, występujące jako jedna faza, która jest optycznie przejrzysta. Termodynamicznie stabilną mieszaninę składników tworzy się poprzez utworzenie trójkątnego schematu stabilnych/klarownych proporcji środka powierzchniowo czynnego, ropy i wody. Struktury wewnątrz systemów mikroemulsji mogą się znacznie różnić, w zależności od względnych ilości składników, stężeń i innych czynników. Składniki mogą tworzyć kuliste, sferoidalne lub cylindryczne pręty lub robakowate micelle. Systemy mikroemulsji ze względu na małe domeny ropy lub wody (o średnicy około 10÷20 nm lub mniejszej) zwykle nie rozpraszają światła. Dla porównania systemy emulsji mają struktury wystarczająco duże, aby rozproszyć światło, podobnie jak mętne roztwory koloidalne.

System rozpuszczalnik/woda/środek powierzchniowo czynny tworzy wielopłaszczyznowe struktury, określane jako struktury Voronoi, w których krawędzie wielościanów zbudowane są ze środka powierzchniowo czynnego, natomiast płaszczyzny zawierają ropę i wodę. Taki system powstaje, gdy mikroemulsja jest dyspergowana w płynie

zabiegowym. Dzięki temu minimalizowane jest napięcie międzyfazowe pomiędzy zatłaczanym płynem a skałą złożową, co pozwala na przezwycięzenie sił kapilarnych powodujących uwięzienie gazu w skale. Umożliwia to przepływ gazu przez szczelinę do odwiertu. Dodatkowo mikroemulsje, tworząc micelle, mają tendencję do łączenia się z polimerem wchodzącym w skład płynu zabiegowego, tworząc odfalowaną barierę o małej przepuszczalności na ścianach szczeliny we wczesnej fazie penetracji płynu, co powoduje zmniejszenie dalszej inwazji płynu w formację skalną.

Efektywność mikroemulsji jako dodatków do płynów szczelinujących została potwierdzona również w praktyce; zarówno na złożach typu zamkniętego (*tight gas*), jak i w łupkach (*shale gas*). W pierwszym przypadku ich skuteczność badano między innymi na złożach Bradford i Speechley w Stanach Zjednoczonych, zalegających odpowiednio na 914÷1219 m oraz 549÷853 m [6]. Są to złoża piaskowcowe o przepuszczalnościach rzędu od 0,1 mD do 0,7 mD, gdzie ze względu na niskie ciśnienia złożowe i małe przepuszczalności metoda hydraulicznego szczelinowania jest szeroko stosowana w celu zwiększenia wydajności. Niskie ciśnienia były powodem, dla którego złoża te nastęrczały spore trudności w odbiorze płynów po zabiegach szczelinowania. Testy przeprowadzone przez okres 18 miesięcy, począwszy od roku 2004, jednoznacznie wykazały, że w skałach szczelinowanych przy użyciu płynów z dodatkiem 0,2% (obj.) mikroemulsji następował większy odbiór płynu w porównaniu do skał szczelinowanych płynami z dodatkiem konwencjonalnych środków powierzchniowo czynnych. Jeżeli w przypadku tych pierwszych objętość odbieranych cieczy wynosiła około 90% w stosunku do objętości zatłoczonej, to dla tych drugich wynosiła ona tylko około 60÷65%. Było to powiązane z ograniczeniem głębokości inwazji filtratu oraz wyższą względną przepuszczalnością skał dla gazu w strefie przez niego zajętej i/lub większymi efektywnymi długościami wytworzonych szczelin. Poza tym, że oczyszczanie odwiertów było szybsze oraz uzyskiwano większe wydajności odwiertów po zabiegach, to również większe były ilości odbieranych cieczy, które mogły być powtórnie użyte do kolejnych szczelinowań. Powodowało to więc redukcję kosztów dostarczenia niezbędnej ilości wody na miejsce wykonania następnego zabiegu.

Podobne badania przeprowadzono na złożu Barnett Shale w Teksasie [7]. Złoże to charakteryzuje się porowatością skał rzędu 3÷6% (w interwale produkcyjnym) i przepuszczalnością matrycy rzędu 10^{-21} m² [7]. Na podstawie kilkudziesięciu szczelinowań wykonanych na tym

złożu cieczami z dodatkiem konwencjonalnego SPCz lub też mikroemulsji stwierdzono, że dla tych drugich odbiór cieczy po zabiegach i wydobywanie gazu było o około 50% większe niż dla tych pierwszych. Wynika to również z tego,

że mikroemulsje mają dużo niższą tendencję do adsorbowania się na powierzchni skały złożowej niż konwencjonalne środki powierzchniowo czynne, dzięki czemu mogą głębiej penetrować w formację razem z cieczą zabiegową [4].

Badania efektywności działania mikroemulsji w porównaniu do standardowego środka powierzchniowo czynnego wchodzącego w skład płynów szczelinujących

Dotychczas w skład cieczy szczelinujących używanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania w Polsce oprócz środków bakteriobójczych, polimeru, środków stabilizujących minerały ilaste, sieciownika i łamacza używano produktu N, służącego jako środek powierzchniowo czynny. Według opisu producenta jest to mieszanina środków powierzchniowo czynnych redukujących napięcie powierzchniowe i międzyfazowe, co pomaga w oczyszczeniu odwiertu po zabiegu. Dodatkowo zapobiega on powstawaniu emulsji cieczy szczelinującej na bazie wody z węglowodorami oraz pozostawia powierzchnię skał hydrofilową, co ułatwia późniejszą produkcję węglowodorów. Jest to ciekły środek o charakterze niejonowym.

Do badań nad zastosowaniem mikroemulsji pozyskano dwa środki, dwóch różnych firm, M1 i M2. Według opisu pierwszy z nich to niejonowa mieszanina środka powierzchniowo czynnego, alkoholu oraz rozpuszczalnika tworząca mikroemulsję. Może być on używany jako dodatek do płynów kwasujących lub szczelinujących w celu poprawy odbioru płynu zabiegowego i lepszego oczyszczenia od-

wiertu. Poprzez redukcję ciśnienia kapilarnego powoduje on obniżenie ciśnienia niezbędnego do przepływu płynu przez kapilary.

Drugi środek natomiast to biodegradowalna, termodynamicznie stabilna mikroemulsja (klarowna mieszanina rozpuszczalnika, współrozpuszczalnika i środka powierzchniowo czynnego) zaprojektowana specjalnie jako dodatek do płynów stymulacyjnych. Ten niejonowy środek poprawia penetrację płynów kwasujących oraz odbiór płynów szczelinujących.

Zdecydowano, że badania skuteczności działania opisanych powyżej środków obejmować będą:

- pomiar kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego roztworów sporządzonych na bazie tych środków,
- testy filtracji cieczy szczelinujących zawierających w swoim składzie poszczególne środki,
- testy oczyszczania warstwy podsadzki, której przepuszczalność została uszkodzona przy pomocy cieczy szczelinujących sporządzonych z dodatkiem poszczególnych środków.

Pomiar kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego wytypowanych roztworów

W celu wykonania pomiarów kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego sporządzono roztwory wodne trzech testowanych środków o stężeniu 0,2% (obj.), które jest zalecane do stosowania przez ich producentów.

Pomiar kąta zwilżania przeprowadzono prostą metodą „uwięzionego pęcherzyka” na płytce szklanej, którą umieszczano poziomo w kuwecie pomiarowej, wypełnionej odpowiednią objętością 0,2% (obj.) roztworu badanego środka.

Do cieczy pod powierzchnię płytki wprowadzano przy pomocy kapilary pęcherzyk powietrza i po kilku minutach

(po ustaleniu się równowagi adsorpcyjnej) wykonywano fotografię pęcherzyka na powierzchni płytki, z której odczytywano kąt zwilżania.

Wielkość napięcia powierzchniowego roztworów na granicy z powietrzem zmierzono przy użyciu tensjometru K9 firmy KRÜSS. Wyniki testów dla badanych roztworów zestawiono poniżej w tablicy 1.

Niepewność związana z wyznaczeniem wartości z tablicy 1 została oszacowana na poziomie odchylenia standardowego dla obliczonych średnich z serii pomiarów.

Tablica 1. Wyniki pomiarów kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego dla 0,2% (obj.) roztworów badanych środków

Rodzaj środka	N	M1	M2
Napięcie powierzchniowe [N/m]	0,0319 ($\pm 0,0005$)	0,0334 ($\pm 0,0004$)	0,0310 ($\pm 0,0004$)
Kąt zwilżania θ [°]	25 ($\pm 5,0$)	40 ($\pm 5,0$)	45 ($\pm 5,2$)
cos kąta zwilżania θ	0,91 ($\pm 0,04$)	0,77 ($\pm 0,06$)	0,71 ($\pm 0,06$)

Analizując wpływ poszczególnych środków na odbiór cieczy po wykonanym zabiegu szczelinowania, należy porównać, w jaki sposób pomierzone wielkości wpływają na wartość ciśnienia kapilarnego, które jest wyrażane następującym wzorem:

$$P_k = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

gdzie:

P_k – ciśnienie kapilarne [$\text{Pa} = \text{N/m}^2$],

γ – napięcie powierzchniowe [N/m],

$\cos \theta$ – cosinus kąta zwilżania [–],

r – promień kapilarny (porów skały) [m].

Przy założeniu stałej wartości promienia kapilary wartość ciśnienia kapilarnego jest tym mniejsza (a więc łatwiejszy jest odbiór cieczy pozabiegowej), im niższe są wartości napięcia powierzchniowego i cosinusa kąta zwilżania. Najniższe wartości obydwu tych wielkości

otrzymano dla roztworu środka M2 (tab. 1), stąd też można wyciągnąć wniosek, że będzie on najbardziej efektywnie wpływał na odbiór cieczy zabiegowej ze strefy wokół szczeliny. Spośród dwóch pozostałych produktów mniejszych wartości ciśnienia kapilarnego należy spodziewać się dla roztworu M1, pomimo że zmierzono dla niego wyższą wartość napięcia powierzchniowego, ale z kolei cosinus kąta zwilżania ma mniejszą wartość niż dla tradycyjnego środka powierzchniowo czynnego N. Dla porównania należy również nadmienić, że wartość napięcia powierzchniowego zmierzona dla czystej wody wynosiła 0,0726 N/m. Tak więc wszystkie te środki powodowały obniżenie jego wielkości o ponad 50% w stosunku do wody. Należy również dodać, że pomierzone wartości kąta zwilżania prostą metodą użytą do jego wyznaczenia na pewno obarczone są pewnym błędem, związanym z jego optycznym odczytem. Również sam pomiar odbywał się na płytce szklanej, która zastępowała płytkę z piaskowca.

Testy filtracji cieczy szczelinujących zawierających w swoim składzie poszczególne środki

Testy filtracji przeprowadzono w warunkach statycznych według procedury pomiarowej zaczerpniętej z normy API RP39 [1], dotyczącej badań cieczy szczelinujących, której rozdział 5 poświęcony jest badaniom współczynnika filtracji. Według normy komora pomiarowa powinna umożliwiać badania w temperaturze do 121°C i przy ciśnieniu do 10,34 MPa. Sposób zamontowania rdzenia powinien gwarantować przepływ całego filtratu przez rdzeń (pełna szczelność). Norma zaleca, aby źródłem ciśnienia była butla azotowa. Rdzeń przeznaczony do badań powinien według niej być wycięty w postaci krążka o średnicy 2,54 cm (1,0 cal), jednak z powodu konstrukcji komory, która jest w posiadaniu Zakładu Stymulacji Wydobywania Węglowodorów INiG, testy przeprowadzono na rdzeniu o średnicy 3,81 cm (1,5 cala). Nie zmieniło to zasady pomiaru, jedynie przy obliczaniu współczynnika filtracji uwzględniono większą powierzchnię filtracji.

Krążek skalny o średnicy 3,81 cm i wysokości około 2,54 cm po wycięciu wysuszono do stałej masy i umieszczono w eksykatorze. Po wystygnięciu krążek ten osadzono w komorze pomiarowej przy użyciu silikonu wysokotemperaturowego. Następnie skręcono pozostałe elementy komory pomiarowej i pozostawiono ją na około 24 godziny. Później komorę umieszczono w prasie hydraulicznej, termostатовano do temperatury 60°C i przystępowano do pomiaru. Rdzeń nasycono najpierw 2-procentowym roztworem KCl (podczas testów płynów na bazie węglowodorów rdzeń wg normy nasyca się ropą) przy stałej

wydajności za pomocą pompy konstatymetrycznej. Po ustabilizowaniu się ciśnienia wykonywano pomiar przepuszczalności rdzenia dla solanki. Pomiar ten powtarzano jeszcze dwukrotnie, zmieniając wydajność tłoczenia i czekając na stabilizację ciśnienia. Następnie komorę wypełniono cieczą szczelinującą i przykładano ciśnienie równe 6,89 MPa (1000 psi). Po otwarciu zaworu u dołu komory rozpoczynano pomiar, mierząc wielkość filtracji po 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 i 64 minutach. Dysponując danymi o objętości filtratu w funkcji czasu, wykreślono w układzie kartezyjskim wykres zależności objętości filtratu [cm^3] od pierwiastka czasu [$\text{min}^{1/2}$].

Dopasowując prostą do punktów pomiarowych, określono współczynnik filtracji C_w i wartość *Spurt* w następujący sposób:

$$C_w = 0,0164 \frac{m}{a} \quad (2)$$

$$Spurt = \frac{\text{przecięcie z OY}}{a} \cdot 0,246 \quad (3)$$

gdzie:

C_w – współczynnik kontroli filtracji [$\text{ft}/\text{min}^{1/2}$] przeliczony później na [$\text{m}/\text{min}^{1/2}$],

m – współczynnik kierunkowy prostej [$\text{cm}^3/\text{min}^{1/2}$],

a – powierzchnia rdzenia [cm^2],

przecięcie z osią rzędnych –

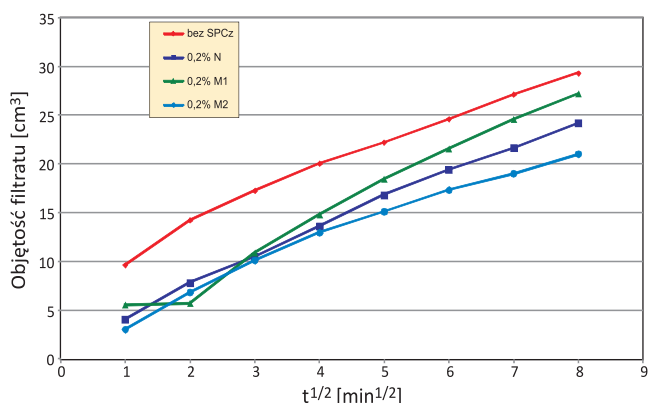
– wartość funkcji dla pierwiastka z czasu = 0 [cm^3],

Spurt loss [gal/ft^2] przeliczony na [m^3/m^2].

Wszystkie badania przeprowadzono na rdzeniach z piaskowca z Chęciny o zbliżonych niskich przepuszczalnościach, które wynosiły od $1,18 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ do $1,82 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$.

Pierwszy test filtracji wykonano przy użyciu cieczy szczelinującej zawierającej w swoim składzie: środek bakteriobójczy, polimer guar (w koncentracji $3,6 \text{ g/dm}^3$), środki stabilizujące ily i łupki oraz sieciownik. Następne testy przeprowadzono dla trzech płynów zawierających dodatkowo jeden z trzech środków: N, M1 lub M2 w koncentracji $2,0 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$.

Porównanie objętości filtratów odebranych podczas testów z udziałem poszczególnych cieczy szczelinujących przedstawiono poniżej na rysunku 4.



Rys. 4. Porównanie objętości filtratów odebranych podczas testów filtracji dla cieczy szczelinujących z dodatkiem poszczególnych środków powierzchniowo czynnych

W tabelicy 2 zebrano wyliczone na podstawie testów i przedstawionej powyżej metodyki wykonywania obliczeń wartości współczynników kontroli filtracji i *Spurt loss* dla cieczy szczelinujących z poszczególnymi dodatkami. Niepewność związana z wyliczeniem wartości z tabli-

cy 2 została oszacowana metodą różniczeki zupełnej przy uwzględnieniu niepewności wyznaczenia parametrów modelu.

Analizując przedstawione wyniki testów można stwierdzić, że dla cieczy z dodatkiem każdego z badanych środków następowało zmniejszenie objętości odbieranego filtratu (rys. 4). Najmniejszą objętość cieczy odebrano dla płynu z dodatkiem środka M2.

W przypadku analizy danych zawartych w tabelicy 2 należy przypomnieć, że współczynnik C_w jest wprost proporcjonalny do szybkości filtracji poprzez utworzony plackę filtracyjną. Wartość *Spurt* natomiast przybliża objętość płynu, który odfiltrował podczas tworzenia placki filtracyjnej. Współczynniki kontroli filtracji wyliczone na podstawie pomiarów wskazują, że środkiem najefektywniej ograniczającym ten proces przez plackę filtracyjną jest M2, dla którego uzyskano wartość C_w mniejszą niż dla cieczy bez dodatku środka powierzchniowo czynnego. Natomiast jeżeli chodzi o wartość *Spurt Loss*, to dla cieczy z dodatkiem wszystkich produktów otrzymano mniejsze wartości niż dla cieczy pozbawionej SPCz. Najmniejszy *Spurt* uzyskano dla cieczy z dodatkiem M1, następnie dla cieczy z M2 i N.

Podsumowując, największe ograniczenie filtracji otrzymano dla cieczy zawierającej dodatek środka M2. Można przypuszczać, że jego składniki powodują szybkie powstanie placki o małej przepuszczalności, który skutecznie blokuje proces filtracji cieczy. Dzięki temu rośnie sprawność cieczy szczelinującej, gdyż mniejsza jej objętość ucieka ze szczeliny podczas zabiegu. Pociąga to za sobą również mniejszą inwazję cieczy do strefy otaczającej hydraulicznie wytworzoną szczelinę, względnie system szczelin. Dzięki temu możliwe jest łatwiejsze oczyszczenie skał zbiornikowych po zabiegu szczelinowania.

Tabela 2. Porównanie współczynników kontroli filtracji C_w i *Spurt loss* dla cieczy szczelinujących z poszczególnymi dodatkami

Ciecz bez SPCz		Ciecz z 0,2% N		Ciecz z 0,2% M1		Ciecz z 0,2% M2	
C_w [m/min ^{1/2}]	<i>Spurt</i> [m ³ /m ²]	C_w [m/min ^{1/2}]	<i>Spurt</i> [m ³ /m ²]	C_w [m/min ^{1/2}]	<i>Spurt</i> [m ³ /m ²]	C_w [m/min ^{1/2}]	<i>Spurt</i> [m ³ /m ²]
0,001190	0,007402	0,001261	0,001648	0,001479	0,000865	0,001106	0,001641
(±3,5 E-06)	(2,3 E-05)	(±3,7 E-06)	(±5,0 E-06)	(±4,4 E-06)	(±2,6 E-06)	(±3,3 E-06)	(±5,0 E-06)

Testy oczyszczania warstwy podsadzki, której przepuszczalność została uszkodzona przy pomocy cieczy szczelinujących sporządzonych z dodatkiem poszczególnych środków

Testy oczyszczania warstwy podsadzki uszkodzonej cieczami szczelinującymi przeprowadzono na stanowisku Proppant Conductivity Unit, które służy do badania materiałów podsadzkowych. Dzięki zastosowaniu zmodyfikowanej komory pomiarowej API możliwe jest

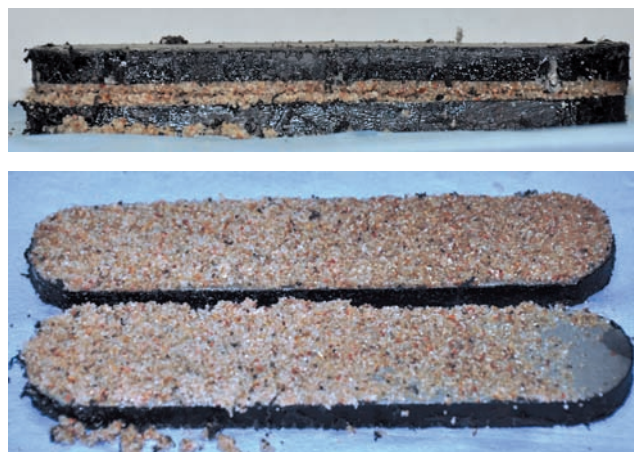
wykonywanie na tym urządzeniu szeregu badań, w tym i stopnia uszkodzenia przepuszczalności podsadzek płynami szczelinującymi w warunkach otworopodobnych. Testy oczyszczania szczeliny uszkodzonej cieczami szczelinującymi przeprowadzono według następującej procedury:

- W komorze pomiarowej osadzano kształtki z piaskowca Ohio w ten sposób, że odległość pomiędzy nimi umożliwiała umieszczenie materiału podsadzkowego w koncentracji $9,76 \text{ kg/m}^2$ wymieszanego z 20 cm^3 cieczy szczelinującej.
- Komorę umieszczano w prasie hydraulicznej i podgrzewano ją do temperatury 60°C . Przez szczelinę pomiędzy kształtkami z piaskowca Ohio przetłaczano ciecz szczelinującą przy przeciwnym ciśnieniu równym $6,9 \text{ MPa}$ (1000 psi) przez 60 minut. Powodowało to, że ciecz filtrowała również przez rdzenie z piaskowca, a na ich powierzchni powstawał placek filtracyjny.
- Następnie komorę usuwano z prasy, a szczelinę pomiędzy rdzeniami wypełniano piaskiem kwarcowym z Tomaszowa Mazowieckiego (produkowanym przez firmę Badger Mining) o granulacji $1190/600 \mu\text{m}$ ($16/30 \text{ mesh}$) wymieszanym z cieczą szczelinującą.
- Komorę ponownie umieszczano w prasie hydraulicznej i po podłączeniu do niej wszystkich połączeń i podgrzaniu do temperatury 60°C przykładano nacisk taki, aby ciśnienie zamknięcia szczeliny wynosiło $20,7 \text{ MPa}$ (3000 psi). Odczekiwano chwilę na filtrację cieczy ze szczeliny.
- Przez rdzenie z piaskowca Ohio i szczelinę przetłaczano 2-procentowy roztwór chlorku potasu z wydajnością $2,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ przez okres 3 godzin, w kierunku przeciwnym do filtracji cieczy szczelinującej – podobnie jak odbywa się przepływ mediów złożowych do szczeliny, a następnie do odwiertu po zabiegu szczelinowania.
- Po tym czasie przerywano tłoczenie, zamykano porty komory i umieszczano ją w suszarce w temperaturze 60°C .
- Po 18 godzinach komorę ponownie umieszczano w prasie hydraulicznej, łączono wszystkie elementy systemu pomiarowego i wykonywano pomiar przepuszczalności materiału podsadzkowego dla ciśnienia zamknięcia szczeliny $20,7 \text{ MPa}$ (netto) przy przeciwnym ciśnieniu równym $2,76 \text{ MPa}$. Test ten wykonywano dla jednej wydajności 2-procentowego roztworu KCl równej $2,5 \text{ cm}^3/\text{min}$, rejestrując zmiany przepuszczalności przez 3 godziny.
- Przed badaniami z użyciem cieczy szczelinujących wykonano test porównawczy (aby wyznaczyć tzw. linię bazową), który polegał na 3-godzinnym pomiarze przepuszczalności nieuszkodzonego przez ciecze piasku kwarcowego. Test ten przeprowadzono również dla wydajności roztworu KCl równej $2,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ i ciśnienia zamknięcia $20,7 \text{ MPa}$ netto (przeciwnie było równe $2,76 \text{ MPa}$). Pozwalało to na późniejsze

porównanie, na ile poszczególne ciecze szczelinujące powodowały uszkodzenie przepuszczalności warstwy podsadzki w szczelinie.

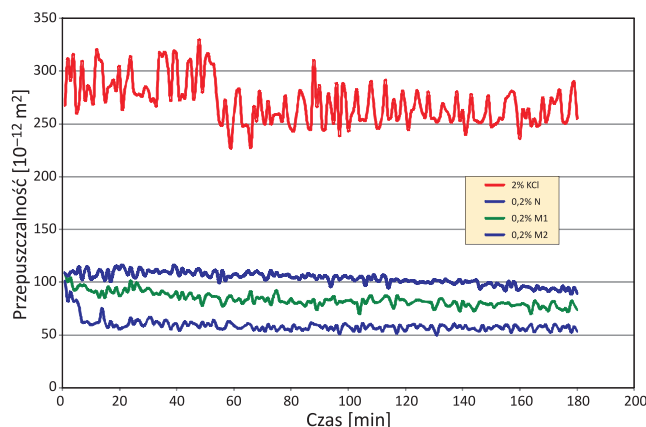
W skład cieczy szczelinujących użytych do badań wchodziły następujące dodatki: środek bakteriobójczy, polimer guar (w koncentracji $3,6 \text{ g/dm}^3$), środki stabilizujące ropy i łupki, sieciownik oraz łamacz. Dodatkowo każda z nich zawierała jeden z testowanych dodatków w koncentracji $2 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$.

Wygląd warstwy podsadzki po jednym z testów przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Fotografie warstwy podsadzki po teście z użyciem cieczy szczelinującej z dodatkiem M2

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono graficznie wyniki testów oczyszczania warstwy podsadzki.

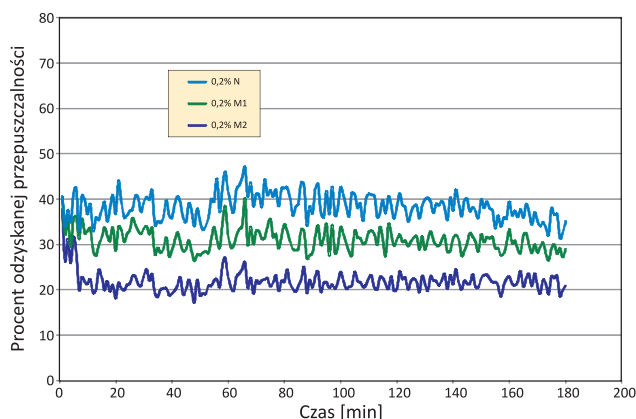


Rys. 6. Porównanie przepuszczalności warstwy podsadzki o przepuszczalności nieuszkodzonej cieczą szczelinującą do podsadzki o przepuszczalności uszkodzonej przez ciecze szczelinujące zawierające poszczególne dodatki

Na podstawie analizy danych zawartych na przedstawionym powyżej wykresie (rys. 6) stwierdzono, że przepuszczalność warstwy podsadzki nieuszkodzonej cieczą szczelinującą zmieniała się w granicach od $227 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ do $330 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, podczas gdy dla podsadzki

uszkodzonej cieczami zawierającymi w swoim składzie testowane dodatki wynosiła ona odpowiednio:

- dla cieczy zawierającej konwencjonalny SPCz (N): od $50 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ do $101 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$,
- dla cieczy zawierającej M1: od $70 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ do $107 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$,
- dla cieczy zawierającej M2: od $88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ do $116 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.



Rys. 7. Porównanie stopni odzyskania przepuszczalności przez warstwę podsadzki uszkodzoną przez cieczy szczelinujące zawierające w swoim składzie poszczególne testowane dodatki

Dzięki zastosowaniu poszczególnych środków osiągnięto różne wielkości oczyszczenia warstwy podsadzki (rys. 7). Jej przepuszczalność dla badanych środków wynosiła:

- dla cieczy zawierającej konwencjonalny SPCz (N): od 17 do 32% w stosunku do podsadzki o przepuszczalności nieuszkodzonej,

- dla cieczy zawierającej M1: od 26 do 40% w stosunku do podsadzki o przepuszczalności nieuszkodzonej,
- dla cieczy zawierającej M2: od 31 do 47% w stosunku do podsadzki o przepuszczalności nieuszkodzonej.

Najbardziej interesujące wydaje się porównanie oczyszczenia warstwy podsadzki pod koniec czasu pomiaru przepuszczalności, tj. po blisko 180 minutach. Po tym czasie zaczyna ustalać się powoli równowaga pomiędzy zjawiskiem oczyszczania szczeliny, powodującym wzrost jej przepuszczalności, a procesem niszczenia struktury ziaren podsadzki spowodowanym zastosowanym ciśnieniem zamknięcia, który z kolei skutkuje zmniejszeniem jej przepuszczalności. Dla środka N przepuszczalność warstwy podsadzki wynosiła wtedy około 20% wartości pomierzonych dla podsadzki o przepuszczalności nieuszkodzonej cieczą szczelinującą, dla M1 około 27÷29%, natomiast dla M2 31÷35%.

Z przeprowadzonych powyżej analiz wynika więc jednoznacznie, że środkiem najbardziej efektywnie poprawiającym oczyszczenie warstwy podsadzki z cieczy szczelinującej spośród trzech badanych jest produkt M2, nieco mniejszą skutecznością wykazuje się środek M1, natomiast obydwa te środki charakteryzują się większą efektywnością niż konwencjonalny SPCz (N).

Można więc stwierdzić, że dzięki zastosowaniu w składzie płynów szczelinujących mikroemulsji możliwe jest lepsze oczyszczenie szczelin wytworzonych podczas zabiegów, a więc i wzrost wydobycia gazu w stosunku do zabiegów wykonywanych przy użyciu konwencjonalnych SPCz.

Podsumowanie i wnioski

1. Płyn szczelinujący, od którego właściwości zależy w znacznej mierze powodzenie zabiegów hydraulicznego szczelinowania jest kompozycją wielu składników, w tym środków powierzchniowo czynnych, których zadaniem jest między innymi zredukowanie napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania oraz kontrola filtracji. Od kilku lat w skład płynów szczelinujących stosowanych zarówno na złożach konwencjonalnych, jak i niekonwencjonalnych włączane są mikroemulsje będące mieszaniną środka powierzchniowo czynnego, rozpuszczalnika/ropy/współrozpuszczalnika i wody.
2. W niniejszym artykule opisano badania mające na celu sprawdzenie, jaki wpływ na właściwości cieczy szczelinującej będzie miało zastosowanie w jej składzie mikroemulsji w porównaniu do stosowanego dotychczas konwencjonalnego środka powierzchniowo czynnego (N). Testy wykonano dla dwóch produktów dostępnych na rynku: M1 i M2.
3. Pomiary kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego wykazały, że obydwa te środki będą bardziej efektywnie obniżać ciśnienie kapilarne w stosunku do konwencjonalnego SPCz (N). Z kolei wartość tego ciśnienia ma zasadniczy wpływ na odbiór cieczy po wykonanym zabiegu szczelinowania, a więc na oczyszczenie złoża oraz szczeliny i wielkość późniejszej produkcji. Najbardziej efektywny okazał się tutaj środek M2.
4. Testy filtracji przeprowadzone na rdzeniach piaskowcowych w warunkach statycznych, w temperaturze 60°C , wykazały, że dodatek środków powierzchniowo czynnych wpływa na obniżenie ilości filtratu odbieranego podczas testu. Z kolei wyliczone na ich podstawie wartości współczynnika kontroli filtracji C_w wskaży-

wały, że środkiem, który najefektywniej ograniczał proces filtracji cieczy przez utworzony na powierzchni skały placek filtracyjny, był M2 ($C_w = 0,001106 \text{ m/min}^{1/2}$, podczas gdy dla cieczy bez dodatku SPCz: $C_w = 0,001190 \text{ m/min}^{1/2}$). Natomiast najmniejszymi obliczonymi wartościami *Spurt Loss* charakteryzował się środek M1, który o około 88% zmniejszał wartość tego współczynnika w stosunku do cieczy bez dodatku SPCz. Zatem dla płynu zawierającego w swoim składzie ten środek, ilość cieczy, która odfiltrowuje podczas tworzenia się placka filtracyjnego była najmniejsza.

5. Badania oczyszczania warstwy podsadzki (piasek kwarcowy o granulacji 1190/600 μm (16/30 mesh)), której przepuszczalność została uszkodzona cieczami szczelinującymi zawierającymi w swoim składzie poszczególne środki powierzchniowo czynne, wykazały, że najbardziej efektywnym dodatkiem jest M2. Ciecz zawierająca w swoim składzie ten środek powodowała najmniejsze uszkodzenie przepuszczalności warstwy podsadzki, gdyż była ona najłatwiej wypierana przez medium pomiarowe (2-procentowy KCl). Badania wy-

kazały, że wartość przepuszczalności warstwy podsadzki uszkodzonej cieczą z dodatkiem tego środka wynosiła 31÷47% wartości dla podsadzki nieuszkodzonej żadną cieczą. Dla pozostałych środków wartości te wynosiły następująco: dla M1 26÷40% i dla N 17÷32%.

6. Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły, że ciecz szczelinująca zawierająca w swoim składzie mikroemulsje (M2 i M1) charakteryzuje się lepszymi właściwościami w stosunku do cieczy zawierającej jedynie konwencjonalny środek powierzchniowo czynny (N). Posiada ona bowiem większą sprawność, co związane jest ze zmniejszoną filtracją w formację złożową, natomiast dzięki znacznemu obniżeniu ciśnienia kapilarnego możliwe jest lepsze oczyszczenie strefy dookoła wytworzonej szczeliny, jak również samej warstwy podsadzki. W związku z tym jak najbardziej zasadne wydaje się stosowanie tego typu dodatków w krajowej praktyce przemysłowej poprzez zastępowanie stosowanych dotychczas SPCz lub też jednoczesne używanie mikroemulsji i konwencjonalnego SPCz.

Literatura

- [1] Economides M.J., Nolte K.G.: *Reservoir stimulation*. Second edition, Houston TX, 1989.
- [2] Gidley J.L., Holditch S.A., Nierode D.E., Veatch R.W. Jr: *Recent advances in hydraulic fracturing*. Richardson TX, 1989.
- [3] Paktinat J., Pinkhouse J.A., Fontaine J., Lash G.G., Penny G.S.: *Investigation of methods to improve Utica Shale hydraulic fracturing in the Appalachian Basin*. SPE 111 063, 2007.
- [4] Paktinat J., Pinkhouse J.A., Williams C., Stoner B., Willis R.: *Microemulsion reduces adsorption and emulsion tendencies in Bradford and Speechley sandstone formations*. SPE 93 270, 2005.
- [5] Paktinat J., Pinkhouse J.A., Williams C.: *Field case studies: Damage preventions through leakoff control of fracturing fluids in marginal/low-pressure gas reservoirs*. SPE 100 417, 2006.
- [6] Penny G.S., Pursley J.T., Clawson T.D.: *Field study of completion fluids to enhance gas production in the Barnett Shale*. SPE 100 434, 2006.
- [7] *Recommended practice for standard procedure for evaluation of hydraulic fracturing fluids*. American Petroleum Institute, API RP 39, January 1983.
- [8] Yang Y., Dismuke K.I., Penny G.S., Paktinat J.: *Lab and field study of new microemulsion-based crude oil demulsifier for well completions*. SPE 121 762, 2009.



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 oraz publikacji z tego zakresu.