

Sławomir Błaż

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Badania laboratoryjne nad opracowaniem składu płuczki wiertniczej do przewiercania formacji łupkowych

Wprowadzenie

W ciągu ostatniej dekady na całym świecie, w tym także w Polsce, nastąpił znaczny wzrost zainteresowania koncernów naftowych perspektywami poszukiwania i eksploatacji gazu ziemnego ze złóż niekonwencjonalnych. Do złóż niekonwencjonalnych gazu zaliczane są: gaz z formacji łupkowych (*shale gas*), gaz zamknięty w izolowanych porach skalnych, głównie piaskowców (*tight gas*), oraz gaz z pokładów węgla (*coalbed methane*) i hydraty gazowe.

Poszukiwania i udostępnianie niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego zawartego w łupkach ilasto-mułowcowych (*shale gas*) rozpoczyna się wierceniem otworu pionowego do planowanej głębokości, po czym, według zaprojektowanej trajektorii, następuje stopniowe krzywienie jego osi i przechodzenie do warstw łupkowych odcinkiem poziomym. W związku z tym, że złoża gazu w łupkach charakteryzują się bardzo niewielką porowatością i przepuszczalnością, dla zwiększenia wydobycia gazu udostępniane są one przede wszystkim otworami o długim odcinku horyzontalnym. Celem tych wierceń jest zwiększenie powierzchni kontaktu odwiertu ze strefą złożową [13, 14].

Rodzaj i właściwości płuczek wiertniczych stosowanych do pozyskiwania węglowodorów zarówno ze złóż konwencjonalnych, jak i niekonwencjonalnych określają warunki geologiczno-złożowe oraz technologia wiercenia otworu. Biorąc pod uwagę warunki geologiczno-złożowe występowania gazu w łupkach (rodzaj przewiercanych warstw i ich skład mineralogiczny, głębokość, temperatura) oraz technologie wiercenia otworów w formacjach łupkowych, można zauważyć, że dobór systemów płuczek wiertniczych jest istotnym i ważnym zagadnieniem. Zastosowane płucz-

ki wiertnicze powinny charakteryzować się odpowiednimi właściwościami reologiczno-strukturalnymi, inhibitacyjnymi i technologicznymi, celem ograniczenia występowania niekorzystnych zjawisk fizykochemicznych zachodzących w układzie skała – płuczka wiertnicza oraz w celu zapobiegania komplikacjom podczas przewiercania określonego profilu stratygraficzno-litologicznego otworami horyzontalnymi. Właściwy dobór płuczki umożliwi odwiercenie otworu do planowanej głębokości, a następnie – przeprowadzenie szczelinowania perspektywicznych formacji łupkowych z wytworzeniem sieci szczelin. Nieodpowiedni dobór płuczki do przewiercanych warstw może spowodować zmianę parametrów skał łupkowych (zmniejszenie modułu sprężystości i zwiększenie współczynnika plastyczności K), utrudniając tym samym efektywne przeprowadzenie zabiegu szczelinowania [2, 4].

Najczęściej do wierceń niekonwencjonalnych stosowane są płuczki olejowe, których właściwości pozwalają na użycie ich w zdecydowanej większości otworów. Doskonała stabilizacja łupków, wysoka odporność na zanieczyszczenia oraz właściwości smarne to tylko jedne z wielu zalet ich stosowania. Natomiast wadą płuczek olejowych jest ich niekorzystny wpływ na środowisko i problemy związane z utylizacją oleju – głównego składnika płuczki, oraz bardzo wysoki koszt jej sporządzania. W związku z powyższym prowadzone są badania nad opracowaniem i wdrażaniem nowych rodzajów płuczek wodnodispersyjnych o właściwościach zbliżonych do płuczek olejowych, które charakteryzują się mniejszą szkodliwością dla środowiska, a przede wszystkim niższymi kosztami ich stosowania [4, 8, 9, 11].

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań laboratoryjnych nad opracowaniem nowego rodzaju płuczki do wiercenia w złożach niekonwencjonalnych gazu,

ze szczególnym uwzględnieniem parametrów reologiczno-strukturalnych, właściwości inhibitacyjnych oraz właściwości smarnych.

Badania laboratoryjne nad opracowaniem składu płuczki do przewiercania formacji łupkowych

Badania nad doborem polimerów zapewniających uzyskanie odpowiednich parametrów reologicznych, zapobiegających sedymentacji fazy stałej

Właściwości reologiczne płuczek wiertniczych stosowanych do wiercenia otworów kierunkowych i poziomych, oprócz czynników związanych z technologią wiercenia oraz geometrią otworu i zwiercin, odgrywają podstawową rolę w zapobieganiu sedymentacji materiału obciążającego i oczyszczaniu otworu ze zwiercin. Wymagania kontroli i regulacji tych parametrów są tym większe, im większy jest kąt odchylenia otworu od pionu, a jednym z podstawowych parametrów oceny efektywności działania stosowanej płuczki jest wartość lepkości przy niskich prędkościach ścinania – LSRV.

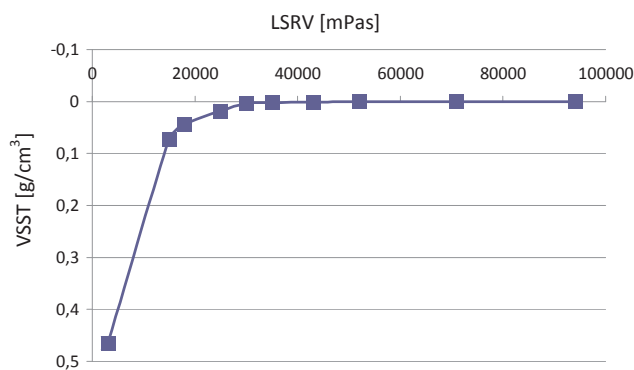
Kontrolowanie i regulowanie właściwości reologicznych płuczek, tj. lepkości, granicy płynięcia i wytrzymałości strukturalnej, pozwala na dobór, w zależności od kąta odchylenia, optymalnych prędkości i reżimu przepływu płuczki w przestrzeni pierścieniowej, decydujących o stopniu oczyszczania otworu ze zwiercin, zdolności zapobiegania opadaniu zwiercin i stateczności ścian otworu. Płuczka zatem powinna charakteryzować się niewielką lepkością przy wysokich prędkościach ścinania, natomiast w strefach, gdzie prędkość przepływu jest niewielka, lepkość płuczki należy zwiększać w celu ograniczenia sedymentacji fazy stałej. Dotyczy to również okresów, kiedy płuczka nie krąży i materiały obciążające oraz zwierciny muszą być zawieszane w strukturze płuczki. Należy również zauważyć, że lepkość płuczki nie powinna nadmiernie wzrastać w warunkach statycznych. Zbyt duża wartość lepkości powoduje wzrost oporów przepływu, co może doprowadzić do zagrożenia związanego z rozszczelnieniem przewierczanych warstw, zaników i utraty obiegu płuczki [18, 21].

Do opracowania składu płuczki wiertniczej do przewiercania formacji skał łupkowych zastosowano polimery strukturotwórcze, przy których możliwe było uzyskanie parametrów reologicznych zapewniających skuteczne oczyszczenie otworu ze zwiercin, a także zapobiegających sedymentacji materiału obciążającego z płuczki (efekt Boycotta).

Wybrane roztwory polimerów obciążono barytem do gęstości $1,3 \text{ g/cm}^3$, określono ich właściwości reologiczne z uwzględnieniem lepkości LSRV, a następnie prze-

prowadzono pomiary sedymentacji w warunkach płynięcia pod kątem 45° . Do określenia sedymentacji fazy stałej w warunkach dynamicznych wykorzystano wiskozyometr Fann 35 i specjalną wkładkę wyprofilowaną pod kątem 45° , mierząc jej gęstości po 30 min. mieszania przy 100 obr./min., jako zakładanej w przybliżeniu szybkości ścinania występującej w przestrzeni pierścieniowej.

Uzyskane wartości sedymentacji VSST w zależności od lepkości LSRV przedstawiono graficznie na rysunku 1. Niepewność pomiaru dla wartości VSST oszacowano na około $\pm 0,002 \text{ g/cm}^3$. Jak przedstawiono na wykresie, największą sedymentację zanotowano w roztworze o lepkości LSRV 3000 mPas, wynosiła ona $0,465 \text{ g/cm}^3$. Przy lepkości roztworu LSRV około 25 000 mPas sedymentacja wynosiła tylko około $0,018 \text{ g/cm}^3$, natomiast przy wartości 30 000 mPas – około $0,004 \text{ g/cm}^3$. Różnice gęstości roztworu pobranego z górnej i dolnej części naczynia pomiarowego wykazały, że w miarę wzrostu lepkości przy niskich prędkościach ścinania, ilość wysedymentowanego barytu ulega obniżeniu, uzyskując prawie taką samą gęstość próbki roztworu – zarówno w górnej, jak i dolnej części naczynia pomiarowego, już przy lepkości LSRV około 35 000 mPas. Zwiększenie lepkości LSRV wpływa na zmniejszanie ilości wysedymentowanego materiału obciążającego. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wartość lepkości LSRV zapobiegająca sedymentacji barytu i przeciwdziałająca opadaniu zwiercin powinna wynosić około 30 000 mPas, co powinno zapobiegać niepożądanym zjawiskom, takim jak efekt Boycotta czy nagromadzenie zwiercin w otworze.



Rys. 1. Sedymentacja płuczki o gęstości $1,3 \text{ g/cm}^3$ w zależności od wartości lepkości LSRV

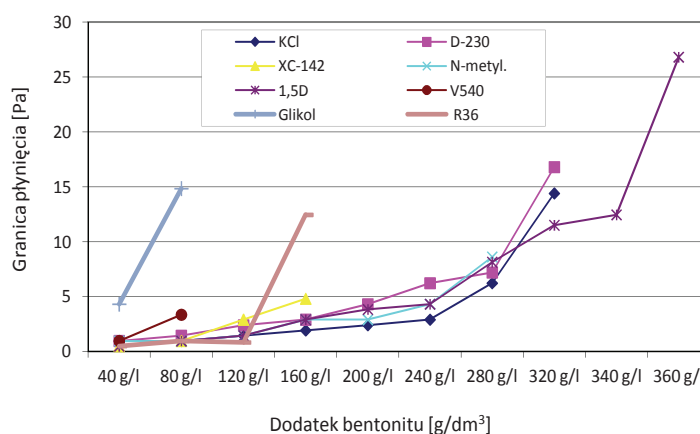
Badania laboratoryjne nad doбором efektywnych inhibitorów hydratacji skał do płuczek do wiercenia w formacjach łupkowych

Dobór odpowiednich właściwości inhibitacyjnych płuczek wiertniczych do przewiercania łupków ilastych, które są jednocześnie skałą macierzystą i zbiornikową, ma duże znaczenie ze względu na skłonność tego rodzaju skał do adsorpcji wody/filtratu płuczki, powodując ich hydratację. W wyniku niekontrolowanej hydratacji wywołanej fizykochemicznym oddziaływaniem filtratu z płuczki wiertniczej na skały ilasto-łupkowe zostaje naruszona struktura krystaliczna minerałów, a tym samym równowaga statyczna skał w otworze wiertniczym. Prowadzi ona do zmniejszenia wytrzymałości skały ilastej, zwiększenia jej objętości i dyspersji, a także do powstania naprężeń hydratacyjnych w skale, na skutek czego może wystąpić zmniejszenie średnicy otworu, przyspieszenie erozji ścian otworu lub tworzenie kawern. Sprzyja ona również powstawaniu nadmiaru bezużytecznej fazy stałej w płuczce wiertniczej i tym samym podwyższaniu jej parametrów reologicznych [18, 19]. Zjawiskom tym można zapobiegać, stosując w składach płuczek wiertniczych środki chemiczne pełniące funkcję inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych. Z uwagi na brak materiału badawczego z perspektywicznych formacji łupkowych badania doboru inhibitorów hydratacji dla skał łupkowych przeprowadzono na łupku mioceńskim, który charakteryzuje się pęcznieniem i dyspergowaniem poprzez występowanie w jego składzie około 85% pakietów smektytowych.

Przy doborze inhibitorów do przewiercania formacji łupkowych szczególną uwagę zwrócono na możliwość zastosowania nowych związków aminowych i środków opartych na związkach PVP. Ich skuteczne działanie w zapobieganiu uwodnieniu łupków zostało udokumentowane w licznych publikacjach dotyczących zapobiegania hydratacji skał ilasto-łupkowych [1, 8, 9, 10, 11, 12]. Dobór inhibitorów do skał łupkowych prowadzono w oparciu o badania inhibicji bentonitu, pomiarów czasu kapilarnej nasiąkliwości, badań pęcznienia łupków oraz badań dyspersji skał łupkowych.

Badanie oddziaływania inhibitora hydratacji skał ilasto-łupkowych na stopień uwodnienia bentonitu, przy zachowaniu niskiego profilu reologicznego, jest jedną z najprostszych metod określających efektywność jego działania inhibitacyjnego. Metoda ta została zastosowana w celu wykazania różnic w działaniu poszczególnych środków i wyboru najskuteczniejszego inhibitora.

Na rysunku 2 przedstawiono zależność granicy płynięcia badanych roztworów od dodatku ilości bentonitu. Badane związki charakteryzowały się różnym stopniem inhibitowania bentonitu. W wyniku przeprowadzanych badań zaobserwowano, że poprzez zobojętnienie związków aminowych kwasem solnym do około $\text{pH} = 7$ można uzyskać zwiększenie skuteczności w działaniu inhibitorów.



Rys. 2. Wpływ dodatku bentonitu na granicę płynięcia wodnych roztworów polimerów

Roztwory protonowanych związków aminowych zachowują płynność nawet przy dodatku 320÷360 g/dm³ bentonitu. W 3% roztworze D230 można było zdyspergować 320 g/dm³ bentonitu, uzyskując wartość granicy płynięcia 16,76 Pa, a roztwór posiada niemierzalne parametry reologiczne przy dodatku 340 g/dm³ bentonitu. Natomiast roztwór 1,5D, jako jedyny ze wszystkich zastosowanych do badań, w całym cyklu pomiarowym charakteryzował się najniższymi wartościami granicy płynięcia, co świadczy o jego wysokiej efektywności w zapobieganiu hydratacji bentonitu. Roztwór 1,5D przy zawartości bentonitu 360 g/dm³ posiadał granicę płynięcia 26,81 Pa, a był niemierzalny na viskozymetrze Fann 35 przy dodatku 370 g/dm³. Dodatkowo, dla porównania, na rysunku 2 przedstawiono wartości granicy płynięcia w zależności od dodatku bentonitu dla 3% KCl, R36 i glikolu. Maksymalna ilość bentonitu, jaką można było zdyspergować w 3% roztworze KCl, wynosiła 320 g/dm³ i była ona niższa niż w przypadku zastosowania związku 1,5D, w którym można było zdyspergować 360 g/dm³ bentonitu.

Przeprowadzone badania wykazały, że roztwory zawierające środki aminowe poddane protonowaniu w znacznym stopniu zmniejszyły podatność bentonitu na pęcznienie. Każdy rodzaj inhibitora posiada różne stężenie progowe, przy którym rozpoczyna się gwałtowne pęcznienie. Protonowane związki aminowe, oddziałując na przestrzeń międzypakie-

towe, zapobiegają przede wszystkim hydratacji osmotycznej oraz adsorbowaniu wody przez cząsteczki bentonitu [19, 20].

Dla potwierdzenia efektywności w zapobieganiu uwodnieniu badanych środków przeprowadzono pomiary określenia czasu kapilarnej nasiąkliwości t_{CST} .

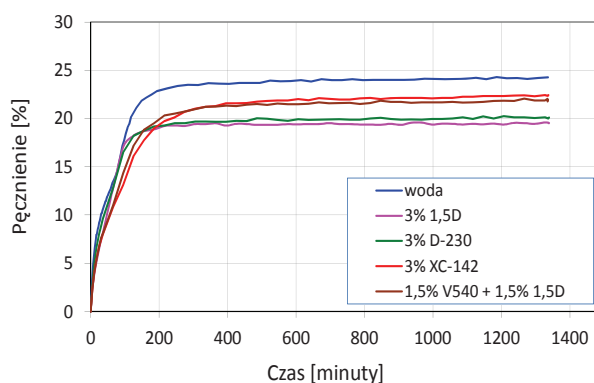
Pomiar czasu kapilarnej nasiąkliwości dostarcza informacji o właściwościach sporządzonej zawiesiny koloidalnej, a uzyskane wartości mogą być wskaźnikiem stopnia przepuszczalności utworzonego osadu oraz doboru rodzaju i optymalnego stężenia inhibitora, głównie w roztworze/płuczce wiertniczej. Wartość t_{CST} jest zależna od wielu czynników, np.: zawartości w roztworze polimeru i jego właściwości, wartości pH i właściwości reologicznych roztworu, składu mineralnego skały i stopnia zmieszania jej z badanym roztworem.

Na podstawie uzyskanych wartości możliwe jest ustalenie rodzaju i stężenia w wodzie skutecznych inhibitorów dla maksymalnego ograniczenia hydratacji skał ilasto-łupkowych. Środki zapobiegające hydratacji takich skał powinny charakteryzować się niskimi czasami t_{CST} . Wyniki badań czasu kapilarnej nasiąkliwości t_{CST} zawiesiny łupka mioceńskiego sporządzonej w roztworach badanych związków aminowych i związków PVP przedstawiono w tabelicy 1. Wartość t_{CST} zawiesiny łupka mioceńskiego sporządzonej na wodzie słodkiej wynosiła dla niego 295 s. Na podstawie przeprowadzonych badań najniższe wartości czasu kapilarnej nasiąkliwości t_{CST} , tj. 16,3 s, uzyskano w 3% roztworze 1,5D, podobną wartość czasu zanotowano w 3%

roztworze D-230 – 16,5 s. Niewiele wyższe czasy uzyskano w 3% roztworze XC-142, tj. 17 s.

Uzyskane czasy kapilarnej nasiąkliwości t_{CST} dla ww. inhibitorów są niższe niż w przypadku zastosowania wysokich stężeń KCl (do 10%), którego t_{CST} wynosił 19,0 s. Określone na podstawie badań optymalne stężenie inhibitora jonowego KCl dla badanego łupka mioceńskiego ustalono na około 5%, ponieważ zwiększanie jego ilości powodowało wzrost wartości t_{CST} , co świadczyłoby o zachodzącym procesie dehydratacji tych skał.

Przedstawione badania pęcznienia łupka mioceńskiego wykonane zostały w celu określenia zdolności ograniczania przyrostu jego objętości przez wytypowane inhibitory hydratacji skał ilasto-łupkowych, tj. 1,5D, D-230, XC-142 oraz V540 + 1,5% 1,5D. Przeprowadzono również pomiar kontrolny dla wody wodociągowej. Wyniki badań przedstawiono graficznie na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność pęcznienia łupka mioceńskiego od czasu, przy zastosowaniu różnych roztworów polimerów

Tabela 1. Wartości czasu kapilarnej nasiąkliwości t_{CST}

Skład roztworu [%]	CST [s] ±0,1
woda	295,0
3% V540	120,0
1% HP56K	49,6
3% D-230, pH = 11,2	30,3
3% D-230, pH = 7	16,5
3% XC-142, pH = 3,2	17,0
3% N, pH = 11,9	47,1
3% N, pH = 7	18,5
3% 1,5D, pH = 11,8	45,2
3% 1,5D, pH = 7	16,3
3% 1,2DH, pH = 12,3	30,7
3% KCl	21,5
5% KCl	19,05
7% KCl	19,6
10% KCl	19,4

Wysuszony łupek mioceński w wyniku działania wody zwiększył swoją objętość o ok. 24,3%, wtedy próbka uległa całkowitej destrukcji. Spośród badanych inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych największym stopniem spęcznienia (22,4%) wykazała się próbka zanurzona w 3% roztworze XC-142, przy czym należy zauważyć, iż w stosunku do wody pęcznienie próbki zmniejszyło się o ok. 2%. Niewiele niższe spęcznienie otrzymano przy zastosowaniu 3% roztworu (V540/1,5D), wynosiło ono 21,9%. Natomiast w najmniejszym stopniu swoją objętość zwiększyła próbka łupka mioceńskiego w środowisku 3% roztworu 1,5D, dla której spęcznienie wynosiło ok. 19,5%. Zastosowane inhibitory hydratacji skał ilasto-łupkowych są w stanie ograniczyć pęcznienie łupka mioceńskiego do poziomu ok. 19%. Przeprowadzone badania pęcznienia łupka mioceńskiego potwierdziły możliwości stosowania wytypowanych środków jako inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych.

W celu wykazania różnic w działaniu poszczególnych środków jako inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych przeprowadzono badania dyspersji na łupku mioceńskim charakteryzującym się właściwościami silnie dyspergującymi i pęczniającymi.

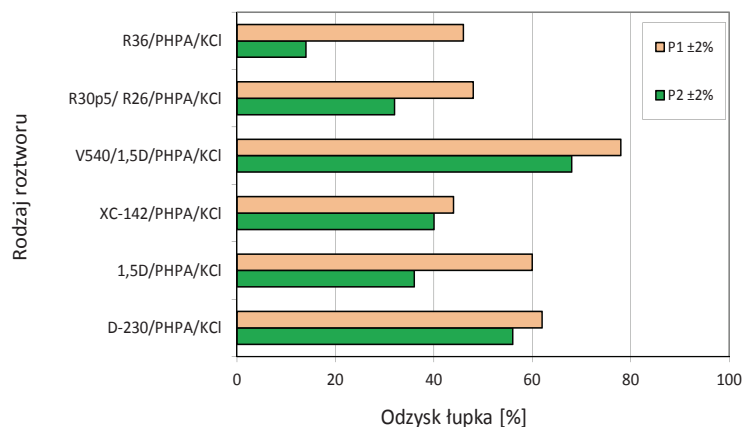
Otrzymane wartości dyspersji łupka mioceńskiego (tablica 2) różnią się w zależności od zastosowanych środków. Średnie wartości odzysku łupka mioceńskiego dyspergowanego w roztworze R36 czy w roztworze R30p5/R26 wynoszą około 20%. Jednak te same próbki łupka mioceńskiego po wstępnym oddziaływaniu roztworu polimeru ponownie dyspergowane w wodzie ulegają prawie całkowitej destrukcji (P_2). W przypadku inhibitorów opartych o związki aminowe, takich jak np. D-230, odzyski łupka po dyspergowaniu w roztworze wynoszą 22%, a po ponownym dyspergowaniu w wodzie są niewiele mniejsze – ok. 20%. Największe ilości łupka mioceńskiego odzyskano po dyspersji w 3% roztworze V540.

Tablica 2. Wartości odzysku łupka mioceńskiego dyspergowanego w roztworach wodnych polimerów

Rodzaj i stężenia środka [%]	Dyspersja [%] ±2	
	P_1	P_2
3% KCl	2	0
3% R30p5 1% R26	18	6
3% Glikol	0	-
3% R36	20	4
3% N-metyl.	16	12
3% 1,5D	20	16
3% D-230	22	20
3% XC-142	22	18
3% V540	26	16

Na podstawie otrzymanych wyników inhibicji bentonitu, pomiarów pęcznienia i wstępnych badań dyspersji, stwierdzono, że związki aminowe różniące się właściwościami chemicznymi oddziałują przeważnie na przestrzenie wewnętrzne pakietów minerałów ilastych, ograniczając głównie dostęp wody do przestrzeni międzypakietowej, zapobiegając tym samym ich pęcznieniu, natomiast nie zabezpieczają w dostatecznym stopniu zewnętrznych powierzchni skał ilasto-łupkowych przed hydratacją powierzchniową.

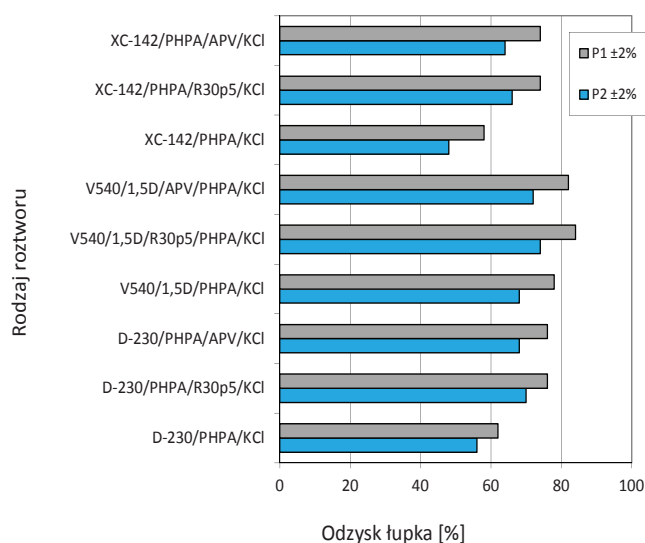
W związku z tym, dalsze badania dyspersji przeprowadzono na roztworach z dodatkiem 0,1% polimeru kapsułującego PHPA i inhibitora jonowego KCl w ilości 5%.



Rys. 4. Wartości odzysku łupka mioceńskiego dyspergowanego w wodnych roztworach polimerów

Z przedstawionego wykresu wynika, że dodatek polimeru PHPA i KCl wpłynął na zwiększenie ilości odzyskiwanych próbek badanych skał (rysunek 4). W roztworze z dodatkiem D-230 odzyskano 62% łupka mioceńskiego, a po wstępnym oddziaływaniu roztworu i wody (P_2) około 56%. Najlepsze właściwości inhibicyjne, na co wskazuje wynik dezintegracji łupka mioceńskiego wynoszący ok. 78%, posiadał roztwór z dodatkiem 3% roztworu 1,5D + V540. Skuteczność inhibicji łupka przez badany roztwór wskazuje na jego trwałą adsorpcję i zabezpieczenie łupka przed dalszym działaniem wody ($P_2 = 68\%$ (rysunek 4)). W pozostałych roztworach, tj.: R36, 30p5/R26/ i XC-142, wspomagające działanie PHPA i KCl wpłynęło na poprawę właściwości inhibicyjnych o ok. 20%. Wzrost właściwości inhibicyjnych jest wynikiem kapsułowania łupka mioceńskiego przez utworzenie warstwy ochronnej zabezpieczającej skały przed hydratacją powierzchniową i zwiększeniem lepkości roztworów.

Dla poprawy właściwości inhibicyjnych badanych roztworów wprowadzono dodatkowo polimery niejonowe R30p5 i 10% roztwór APV. Wyniki uzyskane w tym etapie badań przedstawiono na rysunku 5. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że polimery aminowe w połączeniu z R30p5 lub 10% APV znacząco wpływały na poprawę właściwości inhibicyjnych roztworów, czego wynikiem były duże wartości odzysku łupka mioceńskiego po dyspersji w roztworze – ok. 76÷84%, a szczególnie w wodzie ($P_2 = 68\div 74$). Uzyskane wyniki badań dowodzą, że do efektywnego działania badanych związków aminowych powinny być stosowane odpowiednie inhibitory polimerowe,



Rys. 5. Wartości odzysku łupka mioceńskiego dyspergowanego w wodnych roztworach polimerów

których fizykochemiczne oddziaływanie na zewnętrzne powierzchnie pakietów minerałów ilastych powinno ograniczyć hydratację czułych na wodę skał ilasto-łupkowych.

W oparciu o przeprowadzoną analizę dotychczas otrzymanych wyników badań, w zakresie zastosowania badanych środków jako inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych, stwierdzono, że spośród zastosowanych do badań związków rolę stabilizatora łupków może spełniać głównie roztwór D-230, 1,5D, XC-142 i mieszanina środków V540/1,5D.

Badania laboratoryjne nad poprawą właściwości smarnych płuczek do wiercenia w formacjach łupkowych

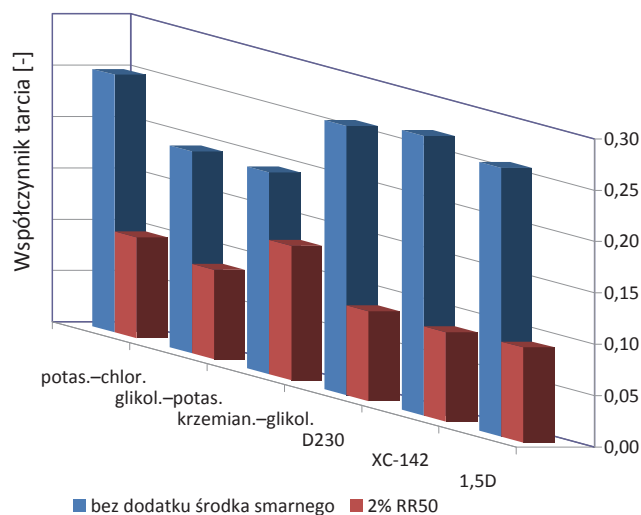
Stosowanie środków smarnych do płuczek wiertniczych ma szczególne znaczenie przy wierceniu długich horyzontalnych odcinków otworu, podczas których występują duże siły tarcia. Tarcie może występować pomiędzy przewodem wiertniczym a ścianą otworu, świdrem a skałą oraz gryzem świdra a jego osią. Jest ono zjawiskiem niekorzystnym, gdyż powoduje wzrost momentu obrotowego oporów tarcia w czasie zapuszczania i wyciągania przewodu wiertniczego oraz jego ścierne, ciepłe i zmęczeniowe zużycie.

Dodatki środków smarnych do płuczek wiertniczych wpływają na zmniejszenie sił tarcia poprzez utworzenie adsorpcyjnych i chemisorpcyjnych warstw smarnych na powierzchni skały, przewodu wiertniczego i narzędzi. Środki smarne powinny łatwo mieszać się z płuczką wiertniczą, charakteryzować się niską toksycznością, a co najważniejsze – efektywnie obniżać współczynnik tarcia, nadając płuczce odpowiednie właściwości poślizgowe, wpływające na zwiększenie postępu wiercenia otworu. Środki

smarne dodawane do płuczek w celu zmniejszenia współczynnika tarcia i momentu obrotowego nie mogą również negatywnie wpływać na fizyczne i chemiczne właściwości płuczki wiertniczej, takie jak: gęstość, filtracja, parametry reologiczne. Dlatego też parametry płuczki przy doborze środków smarnych muszą być ściśle kontrolowane.

Wybór właściwego środka smarnego do płuczki zależy głównie od jego parametrów technicznych i ograniczeń środowiskowych. W wyniku prowadzonych badań opracowano nowy środek smarny do płuczek przeznaczonych do wiercenia otworów kierunkowych. Głównym substratem do otrzymania nowego środka smarnego RR50 jest olej rycynowy, który stanowi mieszaninę kwasów tłuszczowych naturalnie występujących w oleju rycynowym.

Wstępne wyniki badań potwierdziły, że nowo opracowany środek RR50 może znaleźć zastosowanie jako środek smarny do płuczek wiertniczych. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki, stwierdzono, że optymalne ilości środka smarnego do płuczek do wiercenia otworów kierunkowych powinny wynosić od 0,5 do 3%, w stosunku do całkowitej objętości płuczki, przy czym najkorzystniejszy dodatek środka smarnego wynosi 2% obj. i takie ilości środka smarnego stosowano w badanych płuczkach.



Rys. 6. Wpływ środka smarnego RR50 na obniżenie współczynnika tarcia płuczek wiertniczych

Na rysunku 6 przedstawiono wpływ środka smarnego RR50 na obniżenie współczynnika tarcia płuczek proponowanych do wiercenia w formacjach łupkowych. Opracowane płuczki charakteryzowały się współczynnikiem tarcia w zakresie od 0,21 (płuczka glikolowo-potasowa) do $0,26 \pm 0,004$. Wprowadzenie do płuczek 2% obj. środka RR50 wpływa na efektywne obniżenie współczynnika tarcia do ok. $0,08 \div 0,13$, w zależności od siły nacisku.

Badania właściwości płuczek opracowanych do przewiercania formacji łupkowych

Uzyskane wyniki badań wstępnych w zakresie doboru polimerów do uzyskania odpowiednich parametrów reologiczno-strukturalnych, efektywnych inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych oraz doboru skutecznych środków smarnych wykorzystano do opracowania składu płuczki wiertniczej, która może zostać zastosowa-

na do wiercenia w formacjach łupkowych. Sporządzone płuczki, różniące się między sobą rodzajem zastosowanego inhibitora hydratacji skał ilasto-łupkowych, poddawano badaniom pod kątem odporności na elektrolity, fazę stałą i podwyższoną temperaturę. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 3.

Tabela 3. Właściwości płuczek poddanych działaniu skażeń chemicznych i temperatury

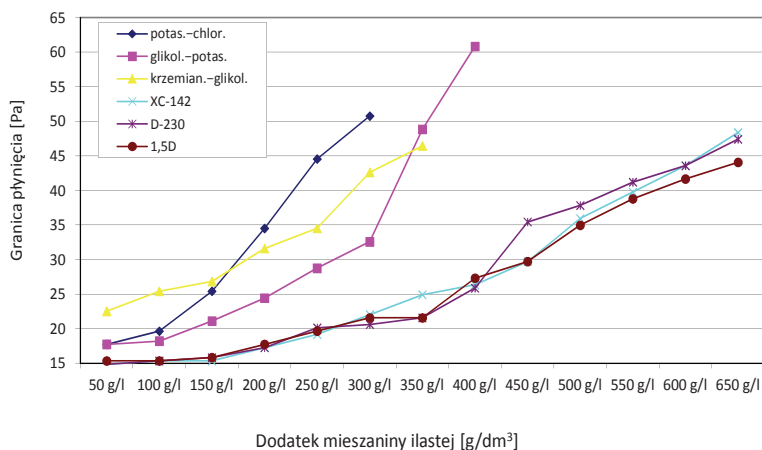
Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPa s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm ³ /30 min.]	pH	
			ρ ± 5	η_{pl} ± 1					η_s ± 0,25
1	Biostat Polimer I Polimer II Polimer III Skrobia KCl XC142 RR50 Blokator M25	0,10 0,25 0,25 0,15 1,0 5,00 3,00 2,00 7,00	1080	15	30,5	14,84	6,7/9,1	3,6	9,5
2	Płuczka 1 + zwierciny (miocen)	5,00	1110	16	32,0	15,32	7,2/9,6	3,2	9,4
3	Płuczka 2 + baryt		1310	18	35,5	16,76	8,1/10,53	2,8	9,6
4	Płuczka 3 – temp. 120°C		1320	18	34,5	15,8	7,7/9,6	3,2	9,0
5	Płuczka 4 + baryt		1780	38	62,0	23,0	8,1/11,0	2,8	9,1
6	Płuczka 5 + CaCl ₂ + NaOH	1,00 0,01	1800	37	61,0	22,5	7,7/10,0	2,6	9,3
7	Biostat Polimer I Polimer II Polimer III Skrobia KCl D-230 RR50 Blokator M25	0,10 0,25 0,25 0,15 1,00 5,00 3,00 2,00 7,00	1080	15	30,5	14,84	6,7/9,1	3,8	9,6
8	Płuczka 7 + zwierciny (miocen)	5,00	1110	16	32,5	15,8	7,2/10,0	3,2	9,6
9	Płuczka 8 + baryt		1330	18	35,0	16,3	7,7/9,6	2,8	9,5
10	Płuczka 9 – temp. 120°C		1330	18	34,5	15,8	7,7/9,1	3,4	9,3
11	Płuczka 10 + baryt		1800	37	63,0	24,9	9,1/11,5	2,6	9,3
12	Płuczka 11 + CaCl ₂ + NaOH	1,00 0,01	1820	36	62,0	24,42	8,1/10,53	2,4	9,5

Porównując właściwości opracowanych płuczek, różniących się między sobą zastosowanym inhibitorem hydratacji skał ilasto-łupkowych, można stwierdzić, że charakteryzują się one podobnymi właściwościami reologiczno-strukturalnymi. Płuczki zawierające inhibitory hydratacji skał ilasto-łupkowych z grupy amin, takich jak D-230, XC-142 (tablica 3), charakteryzowały się lepkością plastyczną 15 mPas i granicą płynięcia 14,84 Pa. Po wprowadzeniu do płuczek iłu miocenińskiego imitującego zwiercinę we wszystkich płuczках stwierdzono niewielki wzrost parametrów reologicznych i spadek wartości filtracji. Obciążenie płuczek barytem do gęstości około 1300 kg/m³ powoduje wzrost wartości parametrów reologiczno-strukturalnych oraz niewielkie obniżenie filtracji. W przypadku płuczki z dodatkiem inhibitora hydratacji skał ilasto-łupkowych D-230 zaobserwowano obniżenie filtracji z wartości 3,2 do ok. 2,8 cm³/30 min. Wyniki badań uzyskane podczas wygrzewania płuczek w temperaturze 120°C w warunkach statycznych a następnie ich ochłodzenia do temperatury pokojowej potwierdzają dobrą odporność płuczek na działanie podwyższonej temperatury.

W wyniku działania temperatury następuje niewielkie obniżenie granicy płynięcia płuczek (o około 0,5÷1 Pa) i nieznaczny wzrost filtracji. Zwiększenie gęstości płuczek za pomocą barytu do gęstości około 1800 kg/m³ powoduje wzrost parametrów reologicznych, a płuczki po obciążeniu są stabilne i nie wykazują tendencji do sedymentowania fazy stałej. Wprowadzenie chlorku wapnia w ilości 1% obj. do wygrzanych płuczek wpływa na niewielkie obniżenie lepkości plastycznej (o około 1 mPas), granicy płynięcia (o około 0,5÷1 Pa) i filtracji (o około 0,2÷0,4 cm³/30 min).

Z przeprowadzonych badań wynika, że opracowane płuczki zawierające inhibitory hydratacji skał, takie jak: D-230, XC-142, cechują się dobrą odpornością na skażenie fazą stałą (łupek mioceniński), dobrą odpornością termiczną oraz można je bezpiecznie obciążać przy zachowaniu płynności płuczek do gęstości 1800 kg/m³.

Płuczki do przewiercania formacji łupkowych powinny charakteryzować się podwyższoną odpornością na skażenie fazą stałą. Skały łupkowe zawierają minerały pęczniące z grupy illit-smektyt, które przy kontakcie z wodą lub filtrem płuczki ulegają rozmakaniu i dyspersji, co może prowadzić do powstania nadmiaru fazy stałej w płuczce wiertniczej – objawiającego się wzrostem parametrów reologicznych płuczki, pogorszenia wskaź-



Rys. 7. Wpływ dodatku mieszaniny ilastej na granicę płynięcia płuczek wiertniczych

ników hydraulicznych oraz tworzenia na ścianie otworu grubego osadu filtracyjnego, a także spowolnienia postępu wiercenia.

W związku z powyższym, opracowane płuczki poddano skażeniu fazą stałą składającą się ze zmielonego łupka miocenińskiego, charakteryzującego się silnymi właściwościami dyspersyjnymi, oraz bentonitu, który ulega w wodzie pęcznieniu. Tak skomponowaną fazą ilastą w ilości 5% skażano płuczki, obserwując ich właściwości, a głównie parametry reologiczne. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań skażenia płuczek wiertniczych zmieloną fazą ilastą symulującą zwiercinę. Dla porównania przeprowadzono również skażenie płuczek: potasowo-chlorkowej, glikolowo-potasowej i krzemianowo-glikolowej.

Skażenie badanych płuczek fazą stałą (zwiercinami) powoduje systematyczny wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych. Płuczka potasowo-chlorkowa przy dodatku 300 g/dm³ mieszaniny ilastej imitującej zwierciną fazą stałą uzyskuje granicę płynięcia 50,75 Pa (rysunek 7); przy kolejnym dodatku przestaje być mierzalna na wiskozymetrze. Płuczka glikolowo-potasowa przy dodatku 400 g/dm³ pęczniąco-dyspergującej mieszaniny ilastej uzyskała granicę płynięcia 60,81 Pa, a przy kolejnym dodatku 5% fazy stałej uległa całkowitemu zżelowaniu.

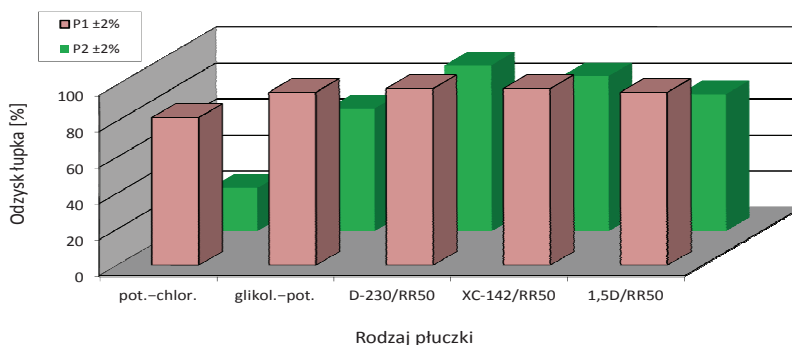
Największą odpornością na skażenie fazą ilastą wykazywały się płuczki z dodatkiem inhibitorów hydratacji skał ilasto-łupkowych, takich jak: XC-142, D-230 i 1,5D. W skażonych płuczках można było zdysperguować około 650 g/dm³ mieszaniny ilastej. Dodatek do płuczek takiej ilości ilastej mieszaniny pęczniąco-dyspergującej spowodował wzrost ich granicy płynięcia, odpowiednio: w przypadku płuczki z dodatkiem XC-142 z wartości 14,84 na 48,36 Pa, a w przypadku płuczki z dodatkiem 1,5D z war-

tości 14,84 na 44,05 Pa. Płaski profil reologiczny skażanych płuczek (rysunek 7) oraz możliwość zdyspergowania takiej ilości mieszaniny świadczy o ich bardzo dobrej odporności na skażenie fazą stałą.

Badania określające właściwości inhibitacyjne opracowanych płuczek przeprowadzono na próbkach skał ilasto-łupkowych reprezentowanych przez łupkę mioceński. Wykonana analiza dyspersyjna potwierdziła ich bardzo dobre właściwości inhibitacyjne w stosunku do łupka mioceńskiego. Wartości odzysku skały ilastej dyspergowanej w płuczce z dodatkiem 3% inhibitora D-230 i 2% środka smarnego RR50 wynosiły około 98%, natomiast po dyspergowaniu w wodzie (P_2) – ok. 92%. W płuczce z dodatkiem inhibitora XC-142 i 2% środka smarnego RR50 oraz w płuczce 1,5D i 2% środka smarnego RR50 odzysk łupka mioceńskiego był niewiele mniejszy (98÷96%), natomiast po oddziaływaniu wody (P_2) – ok. 76÷86%.

Takie ilości odzysku dyspergowanego łupka mioceńskiego świadczą o bardzo dobrych właściwościach inhibitacyjnych opracowanych płuczek (rysunek 8). Dla porównania: w płuczce potasowo-chlorkowej ilości odzysku łupka wynosiły $P_1 = 82$, $P_2 = 24$. Płuczki glikolowo-potasowa i krzemianowo-glikolowa również charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami inhibitacyjnymi, przy czym nie zabezpieczają one skał ilasto-łupkowych przed działaniem hydratacji osmotycznej w takim stopniu jak nowo opracowane płuczki.

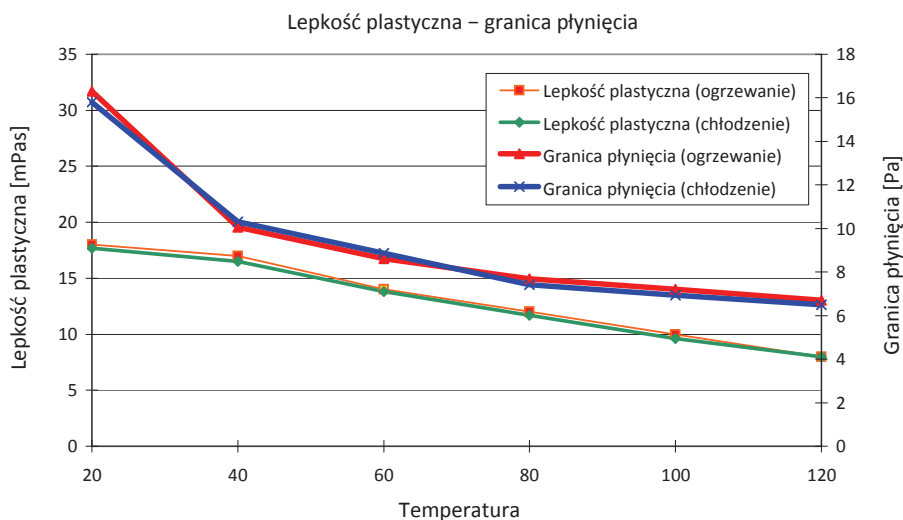
Badanie wpływu podwyższonej temperatury na właściwości reologiczne opracowanej płuczki z dodatkiem inhibitora hydratacji skał ilasto-łupkowych D-230 przeprowadzono za pomocą wysokotemperaturowego i wysokociśnieniowego wiskozymetru MCR 301 firmy Anton Paar. Płuczkę badano w za-



Rys. 8. Wartości odzysku łupka mioceńskiego dyspergowanego w płuczках wiertniczych

kresie temperatur 20÷120°C. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 9 w formie wykresu zmian lepkości plastycznej i granicy płynięcia badanej płuczki.

Ze wzrostem temperatury lepkość plastyczna i granica płynięcia płuczki ulegają obniżeniu, natomiast po całym cyklu pomiarowym i obniżeniu temperatury do warunków otoczenia następuje odbudowa parametrów reologicznych płuczki do wartości zbliżonych do wyjściowych. Histereza zmian lepkości plastycznej i granicy płynięcia jest niewielka, co świadczy o dobrej odporności opracowanej płuczki na działanie podwyższonej temperatury.



Rys. 9. Zmiany lepkości plastycznej i granicy płynięcia płuczki z dodatkiem inhibitora hydratacji skał ilasto-łupkowych D-230 w zależności od zmian temperatury

Wnioski

1. Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano wyboru polimerów odpornych na działanie temperatury, przy których możliwe jest uzyskanie odpowiednich parametrów reologicznych płuczki. Stwierdzono, że war-

tość lepkości płuczki przy niskich prędkościach ścinania LSRV, zapobiegająca sedimentacji barytu i przeciwdziałająca opadaniu zwiercin w otworach horyzontalnych, powinna wynosić powyżej 30 000 mPas.

2. W oparciu o przeprowadzone badania dyspersji, pomiary pęcznienia i testy inhibicji stwierdzono, że spośród zastosowanych do badań związków rolę inhibitorów hydratacji skał łupkowych mogą spełniać protonowane związki aminowe: D-230, 1,5D; XC-142 i mieszanina środków V540/1,5D.
3. Na podstawie badań współczynnika tarcia i doboru środków smarnych do płuczek wiertniczych opracowano nowy rodzaj środka smarnego RR50, który efektywnie obniża współczynnik tarcia płuczek z wartości 0,26 do około 0,08÷0,13, w zależności od siły nacisku.
4. W wyniku przeprowadzonych badań określono optymalne dodatki środka smarnego do płuczek do wiercenia otworów kierunkowych, które powinny wynosić od 0,5 do 3% w stosunku do całkowitej objętości płuczki, przy czym najkorzystniejsze działanie wykazuje dodatek środka smarnego RR50 w ilości 2% obj.
5. Dodatek nowo opracowanego środka smarnego RR50 do płuczek wiertniczych poprzez efektywne obniżenie współczynnika tarcia może ograniczyć zużycie sprzętu wiertniczego oraz przeciwdziałać awariom związanym z przyklejaniem rur płuczkowych do ścian otworu czy przechwyceniem przewodu. Podczas prowadzonych badań zauważono także, że środek smarny RR50 wpływa na poprawę właściwości inhibicyjnych i zmniejszenie pienienia płuczek, co może ułatwić regulację lepkości i gęstości płuczek w czasie obiegu.
6. W celu zastosowania wybranych inhibitorów hydratacji skał łupkowych i zapewnienia im właściwego współdziałania w składach płuczek wiertniczych, należy stosować je łącznie z dodatkiem inhibitorów niejonowych, takich jak R30p5, 10% roztwór APV lub z dodatkiem nowo opracowanego środka smarnego.
7. W wyniku kompleksowych badań laboratoryjnych opracowano skład płuczki, która może zostać zastosowana do przewiercania formacji łupkowych występujących na obszarze Polski.
8. Opracowane płuczki charakteryzują się wysokim stopniem inhibicji hydratacji skał łupkowych (wartości odzysku łupka miocenińskiego wynoszą około 98÷100%), niską filtracją oraz dobrą odpornością na działanie podwyższonej temperatury. Ponadto, płuczki te charakteryzują się dobrymi właściwościami smarnymi, wykazują dużą odporność na skażenie fazą stałą i przeciwdziałają dyspergowaniu zwiercin.
9. Zmienność warunków geologiczno-złożowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na skład mineralogiczny przewierczanych warstw, właściwości fizyczne i głębokość ich zalegania w danym rejonie wiercen, będzie stwarzać konieczność dodatkowego sprawdzenia i dostosowania składu opracowanej płuczki oraz jej właściwości dla wytypowanych warunków geologiczno-złożowych, zależnych od rejonów występowania tych łupków.

Literatura

- [1] Beims T.: *Next-generation systems optimize WBM performance in horizontal shale plays*. „American Oil & Gas Reporter” 2010, vol. 53, No. 8, p. 78–91.
- [2] Deville J. P., Fritz B., Jarrett M.: *Development of water-based drilling fluids customized for shale reservoirs*. SPE 140868, Texas, USA, 2011.
- [3] Eleanya I., Ilkin Bilgesu H., Ameri S.: *Study of Drilling Fluid Additives and Their Impact on Smectite Inhibition, Marcellus Shale Inhibition and Filtration & Rheological Properties of Bentonite Based Drilling Fluids*. SPE 149271, Ohio, USA, 17–19 August 2011.
- [4] Fritz B., Jarrett M.: *Potassium silicate-treated water-based fluid: An effective barrier to instability in the Fayetteville shale*. IADC/SPE 151491, California, USA, 2012.
- [5] Hadro J.: *Strategia poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach*. „Przegląd Geologiczny” 2010, vol. 58, nr 3.
- [6] Hoover E., Trener J.: *High-performance WBM optimizes efficiency in demanding Vicksburg wells*. „American Oil & Gas Reporter” 2008, vol. 29, No. 8, p. 71–74.
- [7] Kiełt M.: *Gaz łupkowy w Polsce. Badanie możliwości występowania gazu ziemnego w sylurskich ilowcach platformy wschodnio-europejskiej: Kompleksowa analiza profilowań geofizycznych*. Geofizyka Toruń.
- [8] Langley D.: *Drilling mud solutions: Cracking the shale code*, www.drillingcontractor.org, 2011.
- [9] LATIDRILL High-performance – Water-based Drilling fluid system, www.bakerhughes.com, 2012.
- [10] Leaper R. et al.: *Meeting Deepwater Challenges with High Performance Water Based Mud*. AAE-06-DF-HO-31, Texas, April 11–12, 2006.
- [11] Leggett D.: *A new water-based mud is helping Haynesville operators save drilling time and spread cost while adding environmental advantages to their operations*. „E&P” 2011, No. 1.
- [12] Michael A. Jarrett, Nyal S. Walker: *Method for Determination of Residual Organo-Amine Salts in Aqueous Filtrates of Drilling Fluids*. AAE-02-DFWM-HO-42, Houston, Texas 2002.
- [13] *Gaz łupkowy. Podstawowe informacje*. Polski Koncern Naftowy ORLEN. Warszawa, lipiec 2010.
- [14] *Rzeczpospolita łupkowa: Studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych*. „Praca Naukowa INiG” nr 183. Kraków 2012.
- [15] Uliasz M., Chudoba J., Herman Z.: *Płuczki wiertnicze z inhibitorami polimerowymi i ich oddziaływanie na przewiercane skały*. „Prace INiG” nr 139. Kraków 2006.

- [16] Uliasz M. i in.: *Problemy techniczne i technologiczne wiercenie kierunkowych. Wpływ płuczek wiertniczych na zdolność wynoszenia urobku w otworach kierunkowych i poziomych*. „Prace INiG” nr 158. Kraków 2009, s. 225–254.
- [17] Uliasz M.: *Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi. Płuczki wiertnicze w technologii wiercenia otworów kierunkowych i poziomych*. „Prace INiG” nr 152. Kraków 2008, s. 99–148.
- [18] Uliasz M.: *Wpływ polimerów z I-rzędowymi grupami aminowymi na właściwości inhibitoryjne płuczki wiertniczej*. „Nafta-Gaz” 2011, nr 1, s. 19–29.
- [19] Uliasz M.: *Wykorzystanie związków aminowych w technologii płuczek wiertniczych*. „Nafta-Gaz” 2010, nr 7, s. 577–585.
- [20] Valluri S. Z., Miska R., Yu A. M., Takach N. E.: *Experimental Study of Effective Hole Cleaning Using „Sweeps” in Horizontal Wellbores*. SPE 101220, 2006.
- [21] Young S., Stamatakis E.: *Novel Inhibitor Chemistry Stabilizes Shales*. AADE-06-DF-HO-39, Texas, April 11–12, 2006.



Mgr inż. Sławomir BŁAŻ – absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracownik Zakładu Technologii Wiercenia Instytutu Nafty i Gazu Oddział Krosno. Zajmuje się tematyką związaną z technologią płuczek wiertniczych.