

Badania laboratoryjne nad zastosowaniem tetratlenku trimanganu jako materiału obciążającego do płuczek wiertniczych

Laboratory studies on the use of trimanganese tetroxide as a weighting material for drilling fluids

Sławomir Błaż, Grzegorz Zima, Bartłomiej Jasiński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Wiercenie otworów metodą nadciśnieniową wymaga stosowania płuczek wiertniczych o gęstości gwarantującej zrównoważenie ciśnienia złożowego i zapewnienie stabilności otworu. Do zwiększania gęstości płuczek wiertniczych najczęściej wykorzystywane są materiały obciążające takie jak węglan wapnia, baryt, ferrohem, hematyt. W praktyce do obciążania płuczek wiertniczych do dowiercania stosowany jest węglan wapnia CaCO_3 z uwagi na jego wysoką rozpuszczalność w kwasie. Jednak zbyt duża koncentracja węglanu wapnia w płuczce wpływa na podwyższenie parametrów reologicznych płuczki oraz związane z tym komplikacje wiertnicze (np. przechwycenie przewodu wiertniczego). Dlatego też do płuczek o wyższej gęstości w celu zmniejszenia ilości materiałów stałych dodawany jest baryt, charakteryzujący się znacznie większą gęstością – $4,2 \text{ g/cm}^3$. Płuczki wiertnicze obciążane barytem w zmiennych warunkach ciśnienia i temperatury narażone są na częste zmiany gęstości, wynikające ze statycznego i dynamicznego osiadania barytu. Podczas wiercenia baryt może także powodować znaczne uszkodzenia formacji złożowych i konieczne jest w związku z tym przeprowadzenie zabiegów stymulacyjnych. Zwiększenie przepuszczalności złoża przeprowadza się między innymi poprzez zabieg kwasowania. Baryt jako materiał obciążający nie reaguje z powszechnie stosowanymi w zabiegach kwasami, co może powodować trwałe uszkodzenie złoża. Stosunkowo nowym rodzajem materiału obciążającego, który wykazuje zupełnie inne właściwości niż standardowy baryt używany do obciążania płuczek jest tetratlenek trimanganu. Materiał ten z uwagi na swoje właściwości wykazuje niewielki wpływ na parametry reologiczne płuczki, łatwo ulega w niej zawieszeniu, a dodatkowo stabilizuje zawiesiny, ograniczając sedymentację zwierconej fazy stałej, co ma znaczenie przy wierceniu otworów kierunkowych. W artykule przedstawiono badania laboratoryjne nad możliwością zastosowania tetratlenku trimanganu Mn_3O_4 jako środka do regulowania gęstości płuczek przeznaczonych do wiercenia otworów w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia HTHP. Tetratlenek trimanganu jako materiał obciążający może stanowić alternatywę dla barytu, szczególnie w płuczkach wiertniczych stosowanych do wiercenia otworów geotermalnych oraz do dowiercania horyzontów produktywnych. Opracowane płuczki zawierające nowy rodzaj materiału obciążającego charakteryzują się mniejszą tendencją do sedymentacji materiału obciążającego i niższymi parametrami reologicznymi w porównaniu z konwencjonalnymi płuczkami wiertniczymi obciążonymi barytem.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, materiał obciążający, tetratlenek trimanganu, baryt, osad filtracyjny, współczynnik sedymentacji.

ABSTRACT: Drilling holes using the overpressure method requires the use of drilling fluids with a density that guarantees the balance of the reservoir pressure and ensures the stability of the hole. Weighting materials such as calcium carbonate, barite, ferrohem, hematite are most often used to increase the density of drilling fluids. In practice, calcium carbonate CaCO_3 is used for weighting drilling fluids due to its high acid solubility. However, too high a concentration of calcium carbonate in the drilling fluid increases the rheological parameters of the drilling fluid and the related drilling complications (e.g. interception of the drill string). Therefore, barite with a much higher density of 4.2 kg/m^3 is added to higher-density muds to reduce the amount of solids. Drilling muds weighted with barite under changing pressure and temperature conditions are exposed to frequent changes in density resulting from static and dynamic barite sedimentation. During drilling, barite can also cause significant damage to reservoir formations, and it is therefore necessary to carry out stimulation treatments. The permeability of the deposit is increased through, among other things, acidization. Barite as a weighting material does not react with acids commonly used in treatments, which may cause permanent damage to the deposit. A relatively new type of weighting material that exhibits completely different properties compared to the standard barite used for weight drilling muds is trimanganese tetroxide. Due to its properties, this material has little effect on the rheological parameters of the drilling muds, it can be easily suspended in the drilling muds, and in addition it stabilizes the suspensions, limiting sedimentation of the solid phase, which is important when drilling directional holes. The article presents laboratory research on the possibility of using trimanganese tetroxide

Autor do korespondencji: S. Błaż, e-mail: slawomir.blaz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.12.2021 r. Zatwierdzono do druku: 08.03.2022 r.

Mn₃O₄ as an agent to regulate the density of muds intended for drilling holes in HTHP conditions. Trimanganese tetroxide as a weighting material can be an alternative to barite, especially in drilling fluids used for drilling geothermal holes and drilling productive horizons. The developed muds containing a new type of weighting material are characterized by a lower tendency to cause sedimentation of the weighting material and lower rheological parameters compared to conventional barite-weighted drilling muds.

Key words: drilling mud, weighting material, trimanganese tetroxide, barite, filter cake, sag factor.

Wstęp

Zmniejszające się odkryte zasoby ropy i gazu ziemnego zmuszają firmy poszukiwawcze do wiercenia otworów w coraz trudniejszych warunkach geologicznych. Jednym z ważniejszych zadań występujących podczas wiercenia głębokich otworów jest dostosowanie właściwości płuczki do panujących warunków otworowych. Trudne warunki geologiczne wymagają stosowania stabilnych płuczek wiertniczych odpornych na działanie wysokiej temperatury i ciśnienia, które zapobiegają sedymentacji materiału obciążającego, umożliwiają utrzymywanie wymaganej ekwiwalentnej gęstości cyrkulacyjnej (ECD), zapobiegają uszkodzeniu złoża i innym zagrożeniom związanym z wierceniem otworów w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia (HTHP). Spełnienie tych wymagań jest jednym z najtrudniejszych wyzwań i ma kluczowe znaczenie w procesie bezawaryjnego odwiercenia otworu i jego późniejszej efektywnej eksploatacji (Al-Bagoury i Steele, 2012; Alrasheed et al., 2018; Abdelmjeed et al., 2019).

Wiercenie otworów w warunkach HTHP wymaga stosowania płuczek wiertniczych o dużej gęstości. W celu uzyskania pożądanej gęstości i zapewnienia przeciwcisnienia na przewiercane warstwy skalne do płuczek wiertniczych dodawane są materiały obciążające. Gęstość płuczki przyczynia się do stabilności ścian otworu poprzez zwiększenie nacisku wywieranego przez płuczkę, proporcjonalnego do jej gęstości i głębokości otworu. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem zwiększania gęstości płuczek jest dodawanie do nich różnych sproszkowanych materiałów o dużej gęstości, nazywanych materiałami obciążającymi, lub rozpuszczanie w nich soli organicznych lub nieorganicznych (Xiao et al., 2013; Al-Foudari et al., 2015; Zima, 2015; Wagle et al. 2017a; Li i Li, 2020).

Rodzaj zastosowanego środka obciążającego do płuczki zależy od wielu czynników, które determinują jego wybór.

Zdecydowanie najczęściej stosowanym materiałem do obciążania płuczek wiertniczych jest standardowy baryt, który charakteryzuje się gęstością 4,2 g/cm³ i wartością średnicy cząstek D50 wynoszącą około 20 μm. Baryt w wiertnictwie do zwiększenia gęstości płuczek wiertniczych wykorzystywany jest od 1922 r. Co roku na całym świecie zużywa się 6 milionów ton barytu, z czego połowa pochodzi z Chin i Indii (Al-Yami i Nasr-El-Din, 2007; Amighi i Shahbazi, 2010; Ofei et al., 2020).

Baryt jako materiał obciążający w płuczkach wiertniczych nie nadaje się do wszystkich zastosowań. Jedną z głównych wad barytu jest jego sedymentacja i jego wpływ na wysoki wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych, szczególnie w przypadku cieczy wiertniczych o dużej gęstości. Zjawisko sedymentacji polega na dynamicznym i statycznym osadzaniu materiału obciążającego na dolnej ścianie otworu, a następnie jego zsuwaniu na dno otworu, co zwiększa gęstość płuczki w dolnej jego części, obniżając ją tym samym w górnej części. Niestabilny profil gęstości w systemie obiegowym może prowadzić do poważnych problemów związanych z zatrzymaniem obiegu, niestabilnością otworu lub przechwyceniem przewodu (Elkatatny et al., 2012; Jasiński, 2012; Al-Yami et al., 2018; Elkatatny, 2018). Płuczki wiertnicze obciążane barytem w zmiennych warunkach ciśnienia i temperatury narażone są na częste zmiany gęstości wynikające ze statycznego i dynamicznego osiadania barytu.

Problemy z sedymentacją barytu występują zarówno w warunkach dynamicznych, jak i statycznych. Sedymentacja dynamiczna związana jest z niskimi wartościami lepkości i granicy płynięcia przy niskich szybkościach ścinania i może być poważnym problemem, nawet jeśli nie występują problemy z opadaniem statycznym barytu (Power i Zamora, 2003; Wagle et al., 2018).

Baryt jest również jednym z potencjalnych źródeł zanieczyszczeń. Jego składniki, takie jak ołów, kadm, rtęć i arsen, w przypadku dostania się do wód mogą rozpuścić się i tworzyć potencjalne zagrożenie dla środowiska (Al-Bagoury i Steele, 2012).

Kolejną wadą barytu jest niska twardość (2,5–3,5). Przy długotrwałym działaniu sił ścinających może ona prowadzić do tworzenia drobnych cząstek koloidalnych, które przyczyniają się do żelowania płuczek wiertniczych.

Barytu nie zaleca się także stosować w płuczkach mrówczanowych z powodu jego częściowego rozpuszczania się. Podczas wiercenia baryt może także powodować znaczne uszkodzenia formacji złożowych i konieczne jest w związku z tym wykonanie zabiegów stymulacyjnych. Zwiększenie przepuszczalności złoża przeprowadza się m.in. poprzez zabieg kwasowania. Baryt jako materiał obciążający nie reaguje z powszechnie stosowanymi w zabiegach kwasami, co może prowadzić do trwałego uszkodzenia złoża (Al-Moajil i Nasr-El-Din, 2010, 2013; Wagle et al., 2017b).

Tabela 1. Rodzaje i właściwości materiałów stosowanych do obciążania płuczek

Table 1. Types and properties of materials used for weighting the drilling muds

Materiał obciążający	Wzór chemiczny	Gęstość	D50 – Średnica	Rozpuszczalność w kwasie	Twardość w skali Mohsa
		[kg/m ³]	[µm]		
Węglan wapnia	CaCO ₃	2,8	15–50	rozpuszczalny	3–4
Baryt	BaSO ₄	>4,2	15–20	nierozpuszczalny	2,5–3,5
Mikronizowany baryt	BaSO ₄	>4,2	10	nierozpuszczalny	2,5–3,5
Ilmenit	FeTiO ₃	4,5–4,7	15	rozpuszczalny	5–6
Mikronizowany ilmenit	FeTiO ₃	4,5–4,7	ok. 5	rozpuszczalny	5–6
Tetratlenek trimanganu	Mn ₃ O ₄	4,7–4,9	<1	rozpuszczalny	5,5
Hematyt	Fe ₂ O ₃	4,9–5,2	15–20	rozpuszczalny	5,5–6,5

Szczególnie interesującym nowym rodzajem materiału obciążającego, który wykazuje zupełnie inne właściwości niż standardowy baryt używany do obciążania płuczek, jest tetratlenek trimanganu (tabela 1). Tetratlenek trimanganu (Mn₃O₄) został po raz pierwszy zastosowany jako środek obciążający do płuczek wiertniczych w latach dziewięćdziesiątych. Jest on ubocznym produktem syntetycznym wytwarzania stopów żelazomanganu, powstającym w wyniku przedmuchiwanie tlenu przez stopiony metaliczny mangan. W wyniku tego procesu tworzą się mikrosferyczne cząsteczki Mn₃O₄ o kulistym kształcie i wąskim zakresie rozkładu wielkości ziaren. Mn₃O₄ ma o 15% większą gęstość i jest o ponad 60% twardszy niż baryt. Z uwagi na kulisty kształt i wielkość cząstek ścieralność i tarcie są znacznie mniejsze niż w przypadku barytu i hematytu. Tetratlenek trimanganu o gęstości 4,8 g/cm³ ma zazwyczaj kolor czerwonobrazowy i średnią wielkość cząstek wynoszącą 1–3 µm. W związku z tym płuczki z dodatkiem Mn₃O₄ charakteryzują się większą stabilnością sedymentacyjną i niższymi parametrami reologiczno-strukturalnymi (Tehrani et al., 2014; Wagle et al., 2015; Sindi et al., 2019).

Metodyka badań

Metodyka badań została zaprojektowana w taki sposób, aby można było ocenić wpływ dodatku nowego rodzaju materiału obciążającego – tetratlenku trimanganu (Mn₃O₄) na właściwości wodnodispersyjnych płuczek wiertniczych. W tym celu sporządzono płuczkę potasowo-polimerową, którą obciążono do gęstości 1600 kg/m³, 1800 kg/m³ i 2000 kg/m³ Mn₃O₄. Równoległe z badaniami płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu prowadzono badania płuczek obciążonych do takich samych gęstości barytem. Następnie na podstawie wyników z badań przystąpiono do analizy porównawczej wpływu obecnie stosowanego barytu w stosunku do nowego rodzaju materiału obciążającego – Mn₃O₄. Analizę porównawczą prowadzono, opierając się na wynikach z badań parametrów

reologiczno-strukturalnych, filtracji oraz badań sedymentacji materiału obciążającego i stabilności sedymentacyjnej określonej za pomocą indeksu TSI.

Badania sedymentacji materiału obciążającego w zależności od charakterystyki reologiczno-strukturalnej płuczek obciążonych Mn₃O₄ wykonywano w warunkach statycznych i dynamicznych. W warunkach płynięcia badania sedymentacji prowadzono przy wykorzystaniu wiskozymetru Ofite 900 i specjalnej wkładki wyprofilowanej pod kątem 45°. Procedurę pomiaru sedymentacji za pomocą wiskozymetru przedstawiono poniżej.

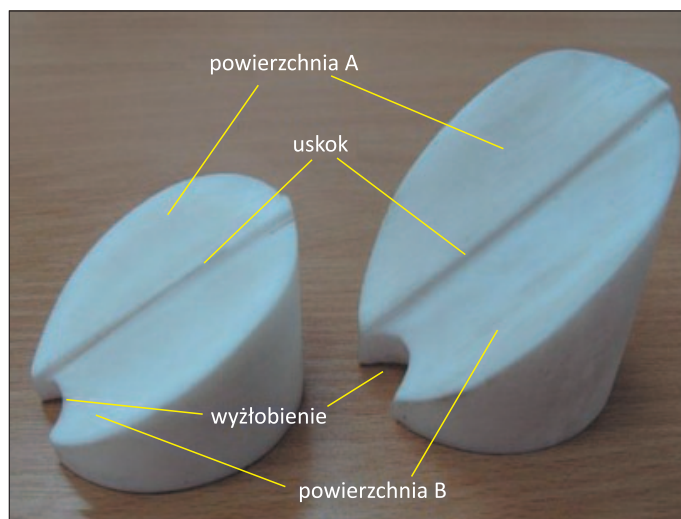
Ocena sedymentacji materiału obciążającego za pomocą metody VSST

Viscometer Sag Shoe Test (VSST) jest prostą metodą pomiaru sedymentacji materiałów obciążających w cieczach wiertniczych. Pomiaru można dokonać zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i na wiertni. Do przeprowadzenia pomiaru metodą VSST potrzebna jest następująca aparatura:

- wiskozymetr obrotowy typu Ofite 900;
- wkładka (ang. *sag shoe*);
- kubek podgrzewający płuczkę;
- strzykawka z przymocowanym gumowym wężykiem;
- stoper;
- waga o dokładności 0,01 g.

Wkładka musi być wykonana z materiału odpornego na działanie wysokiej temperatury (do około 100°C), wody, oleju i materiałów stosowanych w płuczkach wiertniczych. Kształt wkładki zaprojektowano w taki sposób, aby sedymentujący materiał obciążający zsuwał się na dno kubka. Górna część składa się z dwóch nachylonych, półkolistych powierzchni, oddzielonych od siebie uskokiem o wysokości 3 mm. W najniższej części wkładki zlokalizowane jest wyżłobienie, w którym gromadzi się wysedymentowany materiał obciążający.

Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest zasymulowanie warunków panujących w otworze kierunkowym o kącie 45°. Wkładki przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Wkładka (ang. *sag shoe*) do badania sedymentacji dynamicznej barytu w płuczkach wiertniczych

Figure 1. Sag shoe for testing dynamic sedimentation of barite in drilling fluids

Wartość sedymentacji oblicza się ze wzoru (Zamora i Bell, 2004):

$$VSST [g/cm^3] = (WT2 - WT1)/10 \quad (1)$$

gdzie:

WT1 – gęstość płuczki pobrana z górnej części naczynia pomiarowego [g/cm^3],

WT2 – gęstość płuczki pobrana z dolnej części wkładki sedymentacyjnej [g/cm^3].

Badania sedymentacji statycznej przeprowadzano przez wygrzewanie płuczek wiertniczych w temperaturze 120°C przez 24 godziny. Płuczki wygrzewano w warunkach statycznych w autoklawach ułożonych pod kątem 45°. Następnie po ochłodzeniu płuczek do temperatury otoczenia określano gęstość płuczki w dolnej i górnej części autoklawu, a wartość współczynnika sedymentacji statycznej SF obliczano ze wzoru:

$$SF = \frac{\text{gęstość płuczki w dolnej części autoklawu}}{\text{gęstość w dolnej części autoklawu} + \text{gęstość w górnej części autoklawu}} \quad (2)$$

Badania stabilności płuczek obciążonych Mn_3O_4 i płuczek obciążonych barytem badano także za pomocą urządzenia Turbiscan Tower, które umożliwia pomiar stabilności zawiesin, emulsji i pian. Turbiscan pozwala na obserwowanie zjawiska sedymentacji fazy stałej, wydzielania się frakcji lekkich materiałów, takich jak np. lateks i mikrosfery, rozdzielania się emulsji (śmietankowanie) i pian oraz zmian rozmiarów cząstek zachodzących w emulsjach i pianach lub podczas flokulacji fazy stałej. Analizator działa na zasadzie analizy światła wielokrotnie rozproszonego (przechodzącego i wstecznie odbitego). Dzięki ruchomej głowicy i dwóm detektorom pracującym synchronicznie aparat zbiera z zadaną częstotliwością dane dotyczące natężenia światła przechodzącego i wstecznie odbitego

co 20 mikronów wzdłuż wysokości próbki. Zmiany sygnału w kolejnych pomiarach świadczą o zachodzącej destabilizacji – migracji lub zmianie wielkości cząstek. Za pomocą Turbiscan Tower możliwe jest prowadzenie pomiarów na 6 próbkach równocześnie – w zakresie temperatury 4–80°C, dla cząstek o rozmiarach w przedziale 0,01–1000 μm i ich koncentracji 0,01–95%. Objętość próbki używanej do badań wynosi od 4 ml do 20 ml.

Stabilność obciążonych płuczek określano poprzez obliczenie indeksu stabilności TSI.

Obliczenie indeksu TSI jest wykonywane w oparciu o dane podstawowe otrzymywane w wyniku pomiaru sygnału światła przechodzącego T i wstecznie odbitego BS. Następnie sumowane są wszystkie zmiany sygnału w próbce, aby otrzymać unikalną liczbę odzwierciedlającą destabilizację danej próbki. Im większa liczba TSI, tym próbka bardziej niestabilna.

Obciążone płuczki w zakresie danych gęstości zostały sprawdzone na działanie wysokiej temperatury i ciśnienia. Właściwości reologiczno-strukturalne płuczek wyznaczono za pomocą wiskozymetru Ofite 77. Płuczki wygrzewano w temperaturze od 20°C do 120°C, a następnie schładzano do temperatury pokojowej. Określono również właściwości filtracyjne płuczek obciążonych Mn_3O_4 . Filtrację płuczek badano w warunkach statycznych na prasie filtracyjnej w temperaturze 120°C i pod ciśnieniem różnicowym 0,7 MPa. Przeprowadzone zostały również badania laboratoryjne usuwania osadów filtracyjnych z płuczek wiertniczych zawierających nowy rodzaj materiału obciążającego Mn_3O_4 . Próby usuwania osadów filtracyjnych zostały poprzedzone badaniami doboru rodzaju kwasu do rozpuszczenia tetratlenku trimanganu.

Badania laboratoryjne usuwania osadów filtracyjnych z płuczek wiertniczych

Badania skuteczności usuwania osadów filtracyjnych przeprowadzono na dynamicznej prasie filtracyjnej.

Badanie przebiegało według schematu:

- 1) filtracja roztworu NaCl przez dysk ceramiczny;
- 2) badanie wartości filtracji płuczki w warunkach dynamicznych przez dysk ceramiczny z wytworzeniem osadu filtracyjnego w temperaturze 120°C i pod ciśnieniem 0,7 MPa;
- 3) statyczne oddziaływanie roztworu kwasu na wytworzony osad filtracyjny;
- 4) końcowy pomiar filtracji roztworu NaCl.

Pomiar filtracji dynamicznej HTHP rozpoczynał się od umieszczenia w dolnej pokrywie dysku ceramicznego o średnicy porów 3 μm . Następnie po napełnieniu komory filtracyjnej płuczką wiertniczą skręcano tę komorę, umieszczano w komorze grzejnej i podłączano zawory doprowadzające ciśnienie. Po osiągnięciu przez płuczkę zadanej temperatury ustawiano wymagane ciśnienie oraz włączano mieszadło umieszczone

w komorze filtracyjnej, zapewniające krążenie badanej cieczy. Filtrat po przeniknięciu przez dysk ceramiczny trafiał do cylindra pomiarowego, z którego w określonych odstępach czasu odczytywano jego objętość.

Skuteczność usuwania osadu filtracyjnego określono na podstawie pomiaru objętości wypływu przefiltrowanej solanki przez dysk ceramiczny w funkcji czasu.

Usuwanie osadu filtracyjnego przeprowadzono w warunkach statycznych, oddziałując na osad filtracyjny roztworem wytypowanych kwasów przez okres 1 godziny.

Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu w porównaniu z płuczkami obciążonymi barytem

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań właściwości płuczki potasowo-polimerowej obciążonej do gęstości 1600, 1800 i 2000 kg/m³ Mn₃O₄ i dla porównania – barytem.

Porównując właściwości sporządzonych płuczek o takich samych gęstościach, można zauważyć różnice głównie w znacznie wyższej lepkości plastycznej i pozornej oraz granicy płynięcia płuczek obciążonych barytem. Im wyższa gęstość płuczki, tym większa różnica pomiędzy płuczkami w wartościach parametrów reologiczno-strukturalnych. Dla przykładu płuczka obciążona barytem do gęstości 2000 kg/m³ charakteryzowała się lepkością plastyczną 89 mPa·s, lepkością pozorną 120 mPa·s i granicą płynięcia 29,6 Pa. Natomiast lepkość plastyczna płuczki obciążonej Mn₃O₄ wynosiła 64 mPa·s, a lepkość pozorną 91,5 mPa·s (tabela 2). Również granica płynięcia tej płuczki jest niższa i wynosi 26,3 mPa·s. Różnice występują także w wartości filtracji. Płuczki obciążone Mn₃O₄ charakteryzują się w temperaturze 20°C wyższymi wartościami filtracji w stosunku do płuczek obciążonych barytem. Wartość filtracji płuczki obciążonej Mn₃O₄ do gęstości 2000 kg/m³ wynosi 4,8 cm³/30 min (tabela 2). Filtracja płuczki obciążonej barytem jest mniejsza i wynosi 3,6 cm³/30 min. Wyższe są również wartości pH płuczek obciążonych Mn₃O₄ – i wynoszą od 10,2 do 11,0 (tabela 2). Reasumując, płuczki obciążone

Tabela 2. Właściwości płuczki potasowo-polimerowej obciążonej do gęstości 1600, 1800 i 2000 kg/m³ tetratlenkiem trimanganu oraz dla porównania – barytem

Table 2. Properties of a potassium-polymer drilling mud weighted to the density of 1600, 1800 and 2000 kg/m³ with trimanganese tetroxide and for comparison with barite

Nr płuczki	Skład płuczki [%]		Gęstość [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Granica płynięcia przy niskich prędkościach ścinania [Pa]	Filtracja [cm ³ /30 min]	PH
				η_{pl}	η_s					
			ρ			τ_y	I/II	LSYP		
1	biocyd biopolimer środek skrobiowy skrobia HPHT inhibitor jonowy blokator M-25	0,1 0,3 2,5 0,5 7,0 3,0	1070	23	33,5	10,0	1,9/2,9	9,3	4,0	9,3
2	Płuczka 1 + baryt do gęstości 1,6 g/cm ³		1590	44	66,5	21,5	3,8/5,7	3,3	1,6	9,2
3	Płuczka 2 + temperatura 120°C		1590	39	59,5	19,6	3,3/4,8	2,4	2,8	8,9
4	Płuczka 1 + Mn ₃ O ₄ do gęstości 1,6 g/cm ³		1600	43	60,5	16,7	3,3/4,8	2,4	2,4	10,2
5	Płuczka 4 + temperatura 120°C		1600	38	53,5	14,8	3,3/4,3	2,4	3,2	9,7
6	Płuczka 1 + baryt do gęstości 1,8 g/cm ³		1780	61	87,0	24,9	4,2/8,1	2,4	2,6	9,1
7	Płuczka 6 + temperatura 120°C		1780	55	79,0	22,9	3,8/6,2	1,9	4,0	8,9
8	Płuczka 1 + Mn ₃ O ₄ do gęstości 1,8 g/cm ³		1790	53	74,0	20,1	3,8/6,7	2,9	4,4	10,8
9	Płuczka 8 + temperatura 120°C		1790	47	66,0	18,1	3,8/5,7	2,4	4,8	10,5
10	Płuczka 1 + baryt do gęstości 2,0/cm ³		1970	89	120,0	29,6	7,2/13,4	5,7	3,6	9,1
11	Płuczka 10 + temperatura 120°C		1970	82	110,0	26,8	5,7/10,0	3,8	4,4	8,8
12	Płuczka 1 + Mn ₃ O ₄ do gęstości 2,0/cm ³		1980	64	91,5	26,3	4,8/8,6	3,8	4,8	11,0
13	Płuczka 12 + temperatura 120°C		1980	59	84,0	23,9	4,3/7,2	4,3	5,2	10,6

barytem w temperaturze 20°C charakteryzują się wyższymi parametrami reologicznymi, niższą wartością pH i niższą filtracją w stosunku do płuczek obciążonych Mn_3O_4 .

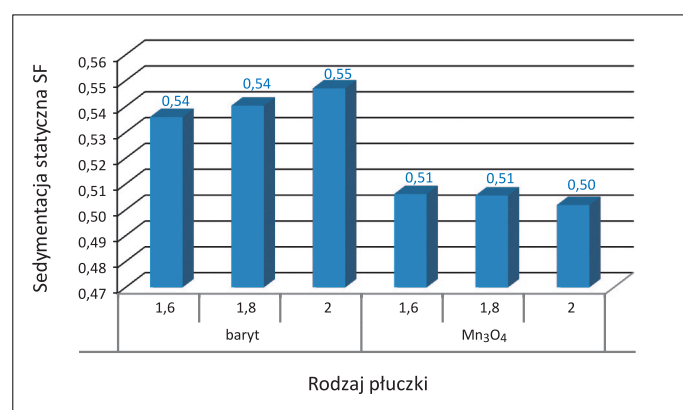
Następnie płuczki obciążone do danych gęstości tetratlenkiem trimanganu oraz płuczki obciążone barytem zostały sprawdzone pod kątem ich odporności na działanie wysokiej temperatury. Sporządzone płuczki zostały wygrzane w temperaturze 120°C przez okres 24 godzin. Po ochłodzeniu do temperatury pokojowej określono ich parametry.

W wyniku statycznego oddziaływania temperatury parametry reologiczne płuczek, zarówno obciążonych Mn_3O_4 , jak i barytem, ulegają obniżeniu (tabela 2). Pod wpływem temperatury w zależności od gęstości płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu następuje obniżenie lepkości plastycznej o 5–6 mPa·s, lepkości pozornej o 7–8 mPa·s i granicy płynięcia o 1,9–2,4 Pa. Obniżeniu ulega także granica płynięcia przy niskich szybkościach ścinania – o 0,4–0,8 Pa i wartość pH. Wzrasta natomiast filtracja płuczki – o około 0,4–0,8 cm³/30 min.

W przypadku płuczek obciążonych barytem w wyniku działania temperatury lepkość plastyczna obniża się o 5–7 mPa·s, lepkość pozorna o 7–10 mPa·s, a granica płynięcia o 1,9–2,8 Pa (tabela 2).

W zależności od profilu reologicznego płuczek i rodzaju zastosowanego materiału obciążającego podczas wiercenia otworu może dochodzić do sedymentacji. Sedymentacja materiału obciążającego może przebiegać w warunkach statycznych oraz w warunkach płynięcia.

W związku z powyższym na rysunku 2 przedstawiono wartości sedymentacji zachodzącej w warunkach statycznych po wygrzaniu płuczek w temperaturze 120°C przez okres 24 godzin. Płuczki wygrzewano w autoklawach ułożonych pod kątem 45°. Wartości sedymentacji określano po ochłodzeniu



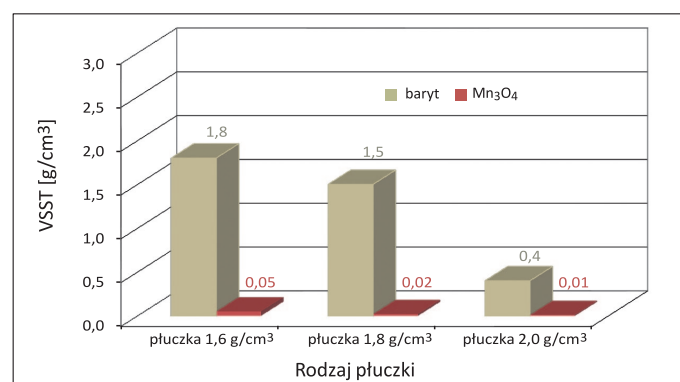
Rysunek 2. Wartości współczynnika sedymentacji SF materiału obciążającego w płuczce potasowo-polimerowej o różnej gęstości w warunkach statycznych

Figure 2. Values of the sedimentation sag factor of the weighting material in potassium-polymer muds of various densities under static conditions

płuczki do temperatury około 20°C. Jeżeli wartości współczynnika sedymentacji statycznej SF mieszczą się w granicach od 0,5 do 0,53, uznaje się, że płuczki są stabilne sedymentacyjnie. Powyżej tych wartości – należy sądzić, że w płuczках będzie zachodzić sedymentacja w warunkach statycznych (Elkatatny, 2018). Otrzymane wartości współczynnika sedymentacji statycznej SF wykazały, że płuczki obciążone barytem nieznacznie przekraczają ten zakres. Największą wartość współczynnika sedymentacji statycznej SF, wynoszącą 0,55, stwierdzono w przypadku płuczki obciążonej barytem do gęstości 2000 kg/m³. Nieznacznie niższe wartości (0,54) uzyskano dla płuczek o gęstości 1600 kg/m³ i 1800 kg/m³ (rysunek 2). Wartości współczynnika sedymentacji SF dla płuczek obciążonych Mn_3O_4 wynosiły od 0,5 w przypadku płuczki o gęstości 2000 kg/m³ do wartości 0,51 w przypadku płuczek o gęstościach od 1600 kg/m³ do 1800 kg/m³ (rysunek 2). Płuczki obciążone Mn_3O_4 w zakresie gęstości od 1600 kg/m³ do 2000 kg/m³ nie wykazują tendencji do sedymentacji w warunkach statycznych.

Niezależnie od problemów występujących z osiadaniami statycznym materiału obciążającego w płuczках może również zachodzić sedymentacja w warunkach płynięcia.

Na rysunku 3 przedstawiono wartości współczynnika sedymentacji dynamicznej VSST dla płuczek o gęstościach 1600 kg/m³, 1800 kg/m³ i 2000 kg/m³ obciążonych Mn_3O_4 oraz dla porównania – barytem.



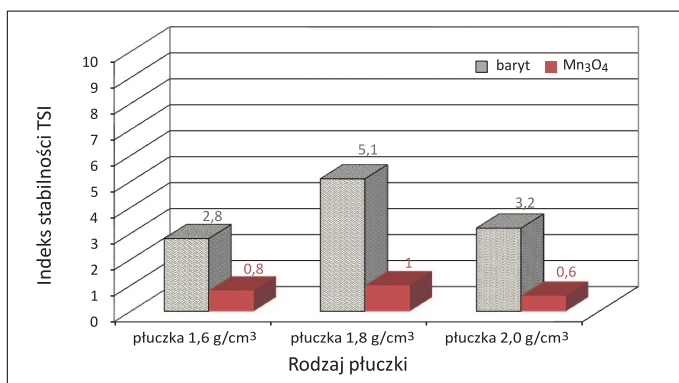
Rysunek 3. Wartości współczynnika sedymentacji VSST materiału obciążającego (baryt, Mn_3O_4) w płuczce potasowo-polimerowej o różnej gęstości w warunkach płynięcia

Figure 3. Values of the sedimentation sag factor VSST of the weighting material (barite, Mn_3O_4) in potassium-polymer muds of various densities under dynamic conditions

Wartości współczynnika VSST dla płuczek obciążonych barytem kształtują się w granicach od 0,4 g/cm³ do 1,8 g/cm³ (rysunek 3). Otrzymane wyniki wskazują, że w płuczках obciążonych barytem może zachodzić sedymentacja w warunkach płynięcia. Zauważalna jest tendencja obniżenia wartości VSST wraz ze wzrostem gęstości płuczek obciążonych barytem – ma to związek głównie ze wzrostem lepkości plastycznej i granicy

plynięcia na skutek wzrostu zawartości fazy stałej. Płuczka obciążona barytem do gęstości 2000 kg/m^3 charakteryzuje się współczynnikiem VSST wynoszącym $0,4 \text{ g/cm}^3$ (rysunek 3). W płuczках obciążonych Mn_3O_4 w warunkach dynamicznych można uznać, że materiał obciążający nie sedimentuje. Wartości VSST wynoszą w zależności od gęstości od $0,05 \text{ g/cm}^3$ do $0,01 \text{ g/cm}^3$ (rysunek 3).

Dodatkowo stabilność płuczek sprawdzono za pomocą indeksu TSI. Otrzymane wartości indeksu TSI wykazują również różnice pomiędzy płuczками obciążonymi barytem i Mn_3O_4 . Wartości indeksu TSI dla płuczek obciążonych Mn_3O_4 wynoszą od 0,8 przy gęstości 1600 kg/m^3 do wartości 0,6 przy gęstości płuczki wynoszącej 2000 kg/m^3 (rysunek 4). W przypadku płuczek obciążonych barytem największą wartość indeksu TSI, wynoszącą 5,1, stwierdzono dla płuczki o gęstości 1800 kg/m^3 . Po zwiększeniu gęstości do 2000 kg/m^3 wartość indeksu TSI spadła do 3,2 (rysunek 4).



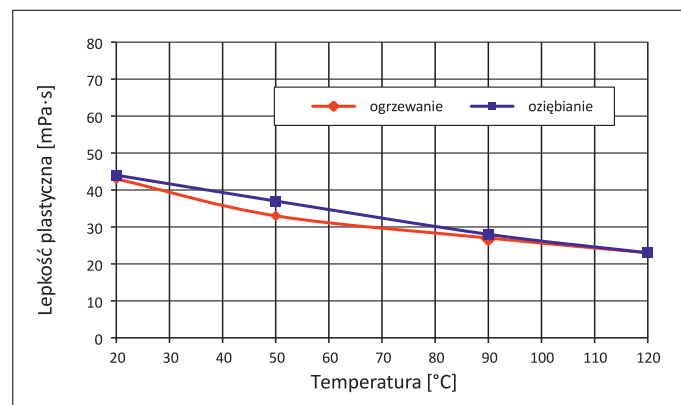
Rysunek 4. Wartości indeksu TSI dla płuczek o różnej gęstości obciążonych Mn_3O_4 i płuczek obciążonych barytem

Figure 4. TSI stability index values of drilling muds of various densities weighted with Mn_3O_4 and muds weighted with barite

Określenie wpływu podwyższonej temperatury na właściwości reologiczno-strukturalne i filtrację płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu

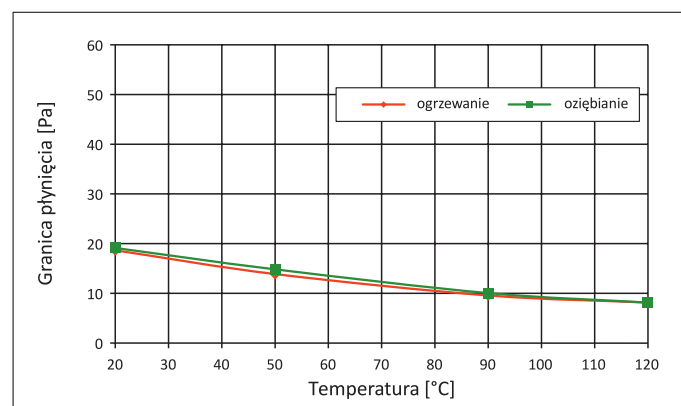
Niezmiernie ważną kwestią podczas projektowania składu płuczki do warunków występowania wysokich temperatur i ciśnień jest określenie wartości parametrów reologicznych, które umożliwiają utrzymanie w stanie zawieszenia materiałów obciążających zawartych w płuczce. Zbyt niskie wartości parametrów reologiczno-strukturalnych w temperaturze otworowej mogą doprowadzić do wysedimentowania materiału obciążającego z płuczki, powodując obniżenie jej gęstości, co w konsekwencji może wywołać awarie związane z przechwyceniem przewodu wiertniczego, z obsypywaniem ścian otworu czy z dopływem wód złożowych. W celu określenia zachodzących zmian parametrów reologiczno-strukturalnych obciążonych płuczek potasowo-polimerowych przeprowadzono badania właściwości reologicznych płuczek na wiskozymetrze Ofite 77.

Badania przeprowadzono w warunkach dynamicznych za pomocą wiskozymetru Ofite 77 w cyklu podgrzewania w temperaturach od 20°C do 120°C i ponownego ich schładzania do temperatury otoczenia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 5–10 w formie wykresu zmian lepkości plastycznej i granicy płynięcia od temperatury.



Rysunek 5. Zmiany lepkości plastycznej płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 1600 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

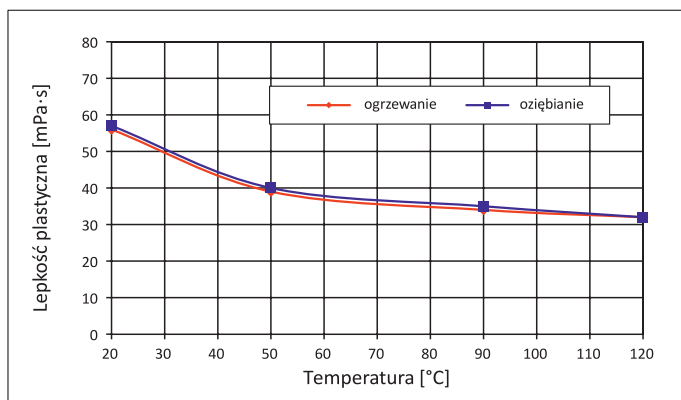
Figure 5. Changes in the plastic viscosity of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 1600 kg/m^3 depending on temperature changes



Rysunek 6. Zmiany granicy płynięcia płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 1600 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

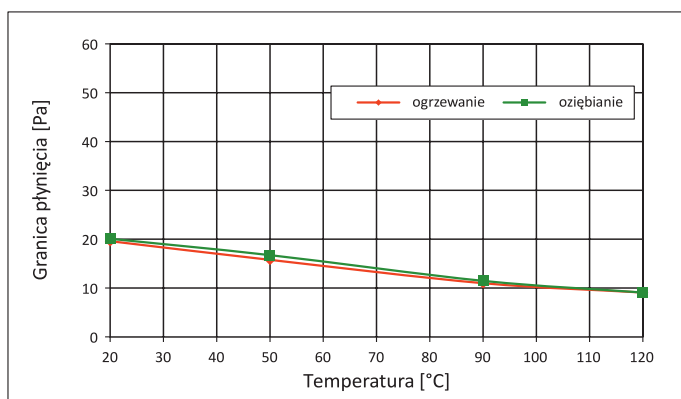
Figure 6. Changes in the yield point of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 1600 kg/m^3 depending on temperature changes

Z przebiegu krzywych wynika, że w miarę podwyższania temperatury do 120°C wszystkie badane płuczki ulegały upłynieniu. Natomiast w procesie oziębienia następowała odbudowa ich struktury wewnętrznej (rysunki 7–10). Przeprowadzone badania potwierdzają, że w warunkach dynamicznych przy zmiennym ciśnieniu i temperaturze płuczki obciążone tetratlenkiem trimanganu do gęstości $1600\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$ wykazują dobrą odporność temperaturową, zachowując wysoką stabilność sedimentacyjną.



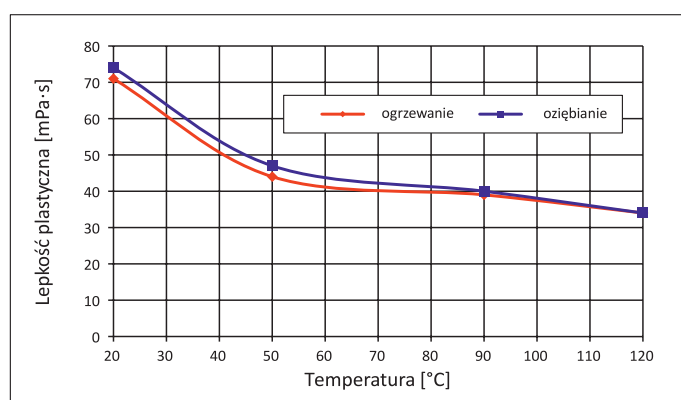
Rysunek 7. Zmiany lepkości plastycznej płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 1800 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

Figure 7. Changes in the plastic viscosity of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 1800 kg/m^3 depending on temperature changes



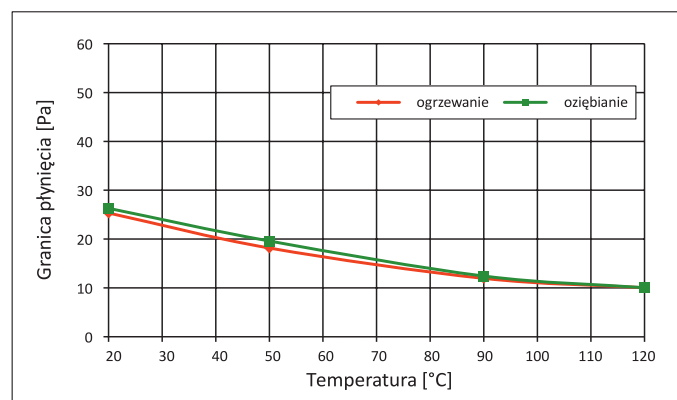
Rysunek 8. Zmiany granicy płynięcia płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 1800 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

Figure 8. Changes in the yield point of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 1800 kg/m^3 depending on temperature changes



Rysunek 9. Zmiany lepkości plastycznej płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 2000 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

Figure 9. Changes in the plastic viscosity of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 2000 kg/m^3 depending on temperature changes

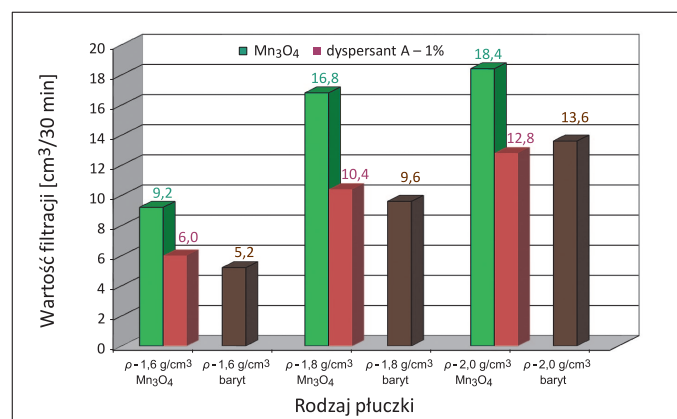


Rysunek 10. Zmiany granicy płynięcia płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 do gęstości 2000 kg/m^3 w zależności od zmian temperatury

Figure 10. Changes in the yield point of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to a density of 2000 kg/m^3 depending on temperature changes

Na rysunku 10 przedstawiono wartości filtracji płuczek obciążonych do gęstości od 1600 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 . Płuczki do określonej gęstości obciążono tetratlenkiem trimanganu oraz dla porównania – barytem. Filtracja płuczek w temperaturze 120°C w znacznej mierze zależy od zastosowanych polimerów odpornych na działanie temperatury oraz od użytego materiału obciążającego. Tetratlenek trimanganu z uwagi na stosunkowo jednorodny rozkład granulometryczny i kulisty kształt cząstek tworzy osad mniej szczelny. We wszystkich przypadkach filtracja była wyższa niż w płuczках obciążonych barytem.

Dla porównania filtracja płuczki o gęstości 1600 kg/m^3 w temperaturze 120°C wynosiła $6 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$, natomiast płuczki obciążonej Mn_3O_4 – $7,2 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$ (rysunek 11).



Rysunek 11. Zmiany wartości filtracji płuczki potasowo-polimerowej obciążonej do gęstości 1600 , 1800 i 2000 kg/m^3 Mn_3O_4 i dla porównania – barytem w temperaturze 120°C i pod ciśnieniem różnicowym $0,7 \text{ MPa}$

Figure 11. Filtration loss of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to the density of 1600 , 1800 and 2000 kg/m^3 and for comparison with barite at the temperature of 120°C and the differential pressure of 0.7 MPa

W przypadku płuczki o gęstości 1800 kg/m³ filtracja wynosiła 10,4 cm³/30 min, a płuczki obciążonej Mn₃O₄ – 12 cm³/30 min. Najwyższą wartość filtracji, wynoszącą 18,4 cm³/30 min (rysunek 11), stwierdzono dla płuczki obciążonej Mn₃O₄ do gęstości 2000 kg/m³. W dalszych badaniach do składu płuczki zawierającej tetratlenek trimanganu dodano dyspersant A w ilości 1%. Zastosowanie dyspersantu A pozwoliło na zmniejszenie filtracji płuczek o gęstości 1800 kg/m³ i 2000 kg/m³ do wartości zbliżonych do filtracji płuczek obciążanych barytem. Filtracja płuczki o gęstości 1800 kg/m³ po dodatku dyspersantu A zmniejszyła się do 10,4 cm³/30 min, a filtracja płuczki o gęstości 2000 kg/m³ zmniejszyła się z 18,4 cm³/30 min do 12,8 cm³/30 min (rysunek 11).

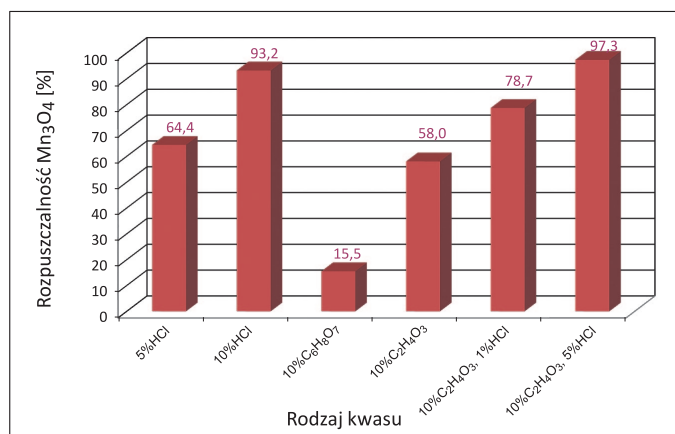
Badania laboratoryjne nad usuwaniem osadów filtracyjnych zawierających w swoim składzie Mn₃O₄

Przed przystąpieniem do badań usuwania osadów filtracyjnych powstałych z płuczki potasowo-polimerowej obciążonej do gęstości 2000 kg/m³ wykonano wstępne testy rozpuszczania tetratlenku trimanganu w kwasach.

Na podstawie przeprowadzonych badań wybrano roztwory kwasów (rysunek 12), dla których uzyskano najwyższy procent rozpuszczenia Mn₃O₄. Badania rozpuszczania Mn₃O₄ wykonano dla 10-proc. i 5-proc. roztworu kwasu solnego, 10-proc. kwasu cytrynowego, 10-proc. kwasu glikolowego i mieszanin kwasu solnego z glikolowym. Wyniki badań zestawiono na rysunku 12, który przedstawia procentowy udział rozpuszczenia tetratlenku trimanganu w danym roztworze kwasu.

Pierwsze próby rozpuszczania Mn₃O₄ w porównaniu z barytem wykazały, że w 10-proc. roztworze HCl tetratlenek trimanganu rozpuścił się w 93,2% (rysunek 12). Przy zastosowaniu 5-proc. roztworu HCl rozpuszczalność Mn₃O₄ zmniejszyła się do 64,4%. W wyniku dodania 5 g Mn₃O₄ do kwasu cytrynowego zauważono na dnie powstanie białego osadu. W 10-proc. roztworze kwasu cytrynowego rozpuściło się około 15,5% Mn₃O₄. Natomiast w 10-proc. roztworze kwasu glikolowego rozpuszczeniu uległo 58,0% Mn₃O₄ (rysunek 12). Na podstawie otrzymanych wyników do dalszych badań wytypowano kwas solny i glikolowy. W roztworze 10-proc. kwasu glikolowego i 1-proc. kwasu solnego rozpuściło się 78,7% Mn₃O₄, a w roztworze 10-proc. kwasu glikolowego i 5-proc. roztworze kwasu solnego – około 97,3% (rysunek 12).

Badania skuteczności usuwania osadów filtracyjnych przeprowadzono na dynamicznej prasie filtracyjnej. Badanie przebiegało według założonego schematu, który polegał na pomiarze filtracji płuczki z wytworzeniem osadu filtracyjnego na dysku ceramicznym o przepuszczalności 3 mD i o średniej średnicy porów 10 μm, następnie na pomiarze filtracji solanki



Rysunek 12. Wyniki badań laboratoryjnych rozpuszczania osadów filtracyjnych z płuczek obciążonych Mn₃O₄ do gęstości 2000 kg/m³

Figure 12. The results of laboratory tests for dissolution of filter cake from muds weighted with Mn₃O₄ to the density of 2000 kg/m³

przez dysk ceramiczny z uformowanym osadem płuczkowym, na poddaniu osadu płuczkowego statycznemu oddziaływaniu cieczy kwasującej i na ponownym pomiarze filtracji solanki. Osady filtracyjne wytwarzano z płuczki potasowo-polimerowej o gęstości 2000 kg/m³ obciążonej Mn₃O₄ oraz dla porównania – z płuczki obciążonej barytem. Badanie filtracji przeprowadzono w temperaturze 120°C i pod ciśnieniem różnicowym 0,7 MPa.

Skuteczność usuwania osadu filtracyjnego określono na podstawie pomiaru objętości wypływu solanki przez dysk ceramiczny w funkcji czasu (tabela 3).

Usuwanie osadu filtracyjnego przeprowadzono w warunkach statycznych, oddziałując na osad filtracyjny roztworem wytypowanych kwasów przez okres 1 godziny. Osad filtracyjny został wytworzony na dysku ceramicznym po 30 minutach filtracji płuczki wiertniczej w warunkach dynamicznych. Tryb dynamiczny w tym przypadku odnosi się do mieszania płuczki z prędkością 200 obr/min podczas pomiaru filtracji płuczki w temperaturze 120°C i pod ciśnieniem 0,7 MPa.

W tabeli 3 przedstawiono wartość filtracji płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn₃O₄ do gęstości 2000 kg/m³ i dla porównania – płuczki obciążonej do tej samej gęstości barytem. Wartość filtracji płuczki potasowo-polimerowej zawierającej jako materiał obciążający Mn₃O₄ w temperaturze 120°C wynosiła 14 cm³/30 min (tabela 3). Natomiast filtracja płuczki potasowo-polimerowej obciążonej barytem była nieznacznie większa i wynosiła 15,4 cm³/30 min.

Wytworzenie osadu z płuczki obciążonej barytem na dysku ceramicznym ograniczyło filtrację solanki do wartości 18 cm³/30 min. Natomiast osad z płuczki obciążonej Mn₃O₄ ograniczył przepływ roztworu NaCl przez dysk ceramiczny do 24 cm³/30 min. Początkowa wartość filtracji roztworu NaCl bez wytworzonego osadu płuczkowego była całkowita, tzn. około 400 cm³ solanki przefiltrowano przez dysk ceramiczny

Tabela 3. Wartości filtracji płuczki potasowo-polimerowej obciążonej Mn_3O_4 i płuczki obciążonej barytem oraz roztworu NaCl przez dysk ceramiczny o przepuszczalności 3 mD i o średniej średnicy porów 10 μm

Table 3. The filtration values of potassium-polymer muds weighted with Mn_3O_4 to the density of 2000 kg/m^3 and for comparison with barite, and of a NaCl solution filtered through a ceramic disc with a permeability of 3 mD and a porosity of 10 μm

Rodzaj płuczki	Płuczka obciążona barytem do gęstości 2000 kg/m^3	Płuczka obciążona Mn_3O_4 do gęstości 2000 kg/m^3
Filtracja płuczki [$cm^3/30$ min]	15,4	14,0
Filtracja roztworu NaCl [$cm^3/30$ min]	18,0	24,0
Oddziaływanie na osad płuczkowy 5-proc. roztworu HCl		
Filtracja roztworu NaCl po oddziaływaniu 5-proc. roztworu HCl [$cm^3/30$ min]	26,0	280,0
Oddziaływanie na osad płuczkowy 10-proc. $C_2H_4O_3$ i 5-proc. HCl		
Filtracja roztworu NaCl po oddziaływaniu 10-proc. $C_2H_4O_3$ i 5-proc. HCl [$cm^3/30$ min]	24,0	330,0

o przepuszczalności 3 mD i porowatości 10 μm w czasie 30 s. Statyczne oddziaływanie 5-proc. roztworu kwasu solnego na wytworzony osad płuczkowy z płuczki obciążonej barytem zwiększyło przepuszczalność solanki do 26 $cm^3/30$ min. Natomiast w wyniku oddziaływania 5-proc. roztworu kwasu solnego na osad płuczkowy zawierający Mn_3O_4 przepływ solanki po czasie 30 min wyniósł 280 cm^3 (tabela 3). Zastosowanie mieszaniny roztworu kwasu glikolowego i solnego zwiększyło efektywność usuwania osadu filtracyjnego wytworzonego z płuczki obciążonej Mn_3O_4 . W wyniku oddziaływania 10-proc. roztworu kwasu glikolowego i 5-proc. roztworu kwasu solnego przepływ solanki przez dysk został zwiększony do wartości 330 $cm^3/30$ min (tabela 3).

Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne nad możliwością zastosowania nowego rodzaju materiału obciążającego – tetratlenku trimanganu do obciążania płuczek wodnodispersyjnych w warunkach HTHP pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

Przeprowadzone badania laboratoryjne obciążania płuczek wodnodispersyjnych tetratlenkiem trimanganu wykazały, że do zawieszenia materiału obciążającego w płuczce wymagane są znacznie niższe wartości parametrów reologiczno-strukturalnych w porównaniu z płuczkami obciążanymi barytem.

Płuczki obciążone tetratlenkiem trimanganu charakteryzują się niższą wartością lepkości plastycznej i pozornej oraz wyższą wartością granicy płynięcia przy niskich prędkościach ścinania w porównaniu z konwencjonalną płuczka wiertniczą obciążaną barytem.

Przeprowadzone pomiary sedymentacji płuczki potasowo-polimerowej obciążonej tetratlenkiem trimanganu do gęstości 1600–2000 kg/m^3 wykazały, że płuczki charakteryzowały się niskimi wartościami współczynnika sedymentacji statycznej,

wynoszącymi od 0,5 do 0,51, oraz niskimi wartościami współczynnika sedymentacji dynamicznej VSST, wynoszącymi od 0,05 g/cm^3 do 0,01 g/cm^3 .

Analiza natężenia światła przechodzącego T i wstecznie odbitego BS przez próbki płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu wskazała, że płuczki charakteryzują się dobrą stabilnością sedymentacyjną. Indeks stabilności TSI dla płuczek potasowo-polimerowych o gęstościach od 1600 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 wynosił od 0,6 do 1.

Przeprowadzone badania parametrów reologiczno-strukturalnych płuczek obciążonych tetratlenkiem trimanganu w warunkach HTHP wykazują, że opracowane płuczki są odporne na działanie wysokiej temperatury i ciśnienia oraz charakteryzują się w tych warunkach wysoką stabilnością sedymentacyjną.

Płuczki wodnodispersyjne obciążane do wysokich gęstości za pomocą tetratlenku trimanganu cechują się wysokimi wartościami pH. W związku z powyższym wymagają również stosowania w składach płuczek środków do obniżenia wartości pH.

Badania doboru środków celem obniżenia filtracji płuczek doprowadziły do wyboru środka oznaczonego jako dyspersant A. Zastosowanie tego środka umożliwiło obniżenie filtracji płuczek do wartości zbliżonych do płuczek obciążonych barytem. Dodatek dyspersantu wpłynął także na niewielkie obniżenie parametrów reologiczno-strukturalnych i obniżenie wysokiej wartości pH.

Przeprowadzone badania laboratoryjne usuwania osadów filtracyjnych wykazały, że tetratlenek trimanganu w odróżnieniu od barytu rozpuszcza się w kwasach, a stopień jego rozpuszczenia zależy od rodzaju zastosowanej cieczy kwasującej.

Na podstawie badań rozpuszczania tetratlenku trimanganu w kwasach wybrano ciecz kwasującą składającą się z 10-proc. kwasu glikolowego i 5-proc. roztworu kwasu solnego. Zastosowanie cieczy kwasującej pozwoliło na rozpuszczenie około 97,3% Mn_3O_4 oraz przywrócenie przepuszczalności dysku ceramicznego do poziomu 82,5% przepuszczalności początkowej.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Tetralenek trójmanganu jako alternatywny materiał obciążający do płuczek wiertniczych w warunkach HTHP* – praca INIG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlec. 0023/KW/2021, nr archiwalny: DK-4101-0011/2021.

Literatura

- Abdelmjeed M., Basfar S., Elkatatny S., Al-Majed A., 2019. Prevention of Barite Sag in Oil-Based Drilling Fluids Using a Mixture of Barite and Ilmenite as Weighting Material. *Sustainability*, 11(20): 5617. DOI: 10.3390/su11205617.
- Al Moajil A.M., Nasr-El-Din H.A., 2010. Reaction of Hydrochloric Acid with Filter Cake Created by Mn_3O_4 Water-Based Drilling Fluids. *SPE Trinidad and Tobago Energy Resources Conference, Port of Spain, Trinidad*. DOI: 10.2118/133467-MS.
- Al Moajil A.M., Nasr-El-Din H.A., 2013. Removal of Manganese Tetraoxide Filter Cake Using a Combination of HCl and Organic Acid. *SPE Heavy Oil Conference-Canada, Calgary, Alberta, Canada*. DOI: 10.2118/165551-MS.
- Al-Bagoury M., Steele Ch., 2012. A New, Alternative Weighting Material for Drilling Fluids. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California*. DOI: 10.2118/151331-MS.
- Al-Foudari S.J., Al-Muhailan M.S., Rajagopalan A., Al-Qadhi F.K., 2015. Alternate Weighting Material for High Pressured Jurassic Wells in Kuwait – Case Histories of Successful K-Formate Mn_3O_4 Drilling Fluids. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, England, UK*. DOI: 10.2118/173056-MS.
- Alrasheed A., Oqaili A.H., Aljbran M.J., Ezi P.C., 2018. Deployment of Fully Automated MPD and Manganese Tetraoxide Mud System to Drill Ultra-Narrow Mud Window in HPHT Gas Wells. *SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/190000-MS.
- Al-Yami A., Al-Jubran M., Wagle V., Al-Mulhim M., 2018. Development of a New Reservoir-Friendly Drilling Fluid for Higher Gas Production. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE*. DOI: 10.2118/192762-MS.
- Al-Yami A.S., Nasr-El-Din H.A., 2007. An Innovative Manganese Tetra-Oxide/KCl Water-Based Drill-in Fluids for HT/HP Wells. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, USA*. DOI: 10.2118/110638-MS.
- Amighi M.R., Shahbazi K., 2010. Effective Ways to Avoid Barite Sag and Technologies to Predict Sag in HPHT and Deviated Wells. *SPE Deep Gas Conference and Exhibition, Manama, Bahrain*. DOI: 10.2118/132015-MS.
- Elkatatny S., 2018. Enhancing the Stability of Invert Emulsion Drilling Fluid for Drilling in High-Pressure High-Temperature Conditions. *Energies*, 11(9), 2393. DOI: 10.3390/en11092393.
- Elkatatny S.M., Al Moajil A., Nasr-El-Din H.A., 2012. Evaluation of a New Environmentally Friendly Treatment to Remove Mn_3O_4 Filter Cake. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Tianjin, China*. DOI: 10.2118/156451-MS.
- Jasiński B., 2012. Wpływ oksydantów na wielkość sedymentacji fazy stałej w zasolonych płuczkach wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 68(9): 602–610.
- Li Q., Li S., 2020. Ultra-High Density Oil-Based Drilling Fluids and its Applications in Ultra-Deep Petroleum Systems. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Virtual*. DOI: 10.2118/198937-MS.
- Ofei T.N., Lund B., Saasen A., Sangesland S., Linga H., Gyland K.R., Kawaji M., 2020. Barite Sag Measurements. *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA*. DOI: 10.2118/199567-MS.
- Power D., Zamora M., 2003. Drilling Fluid Yield Stress: Measurement Techniques for Improved Understanding of Critical Drilling Fluid Parameters. *National Technology Conference „Practical Solutions for Drilling Challenges”, Houston, Texas*. AADE-03-NTCE-35.
- Sindi R., Pino R., Gadalla A., Sharma S., 2019. Achievement of Maximum Mud Weights in WBM with Micromax/Barite Blend and its Successful Implementation in Deep HPHT Challenging Environment. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE*. DOI: 10.2118/197594-MS.
- Tehrani A., Cliffe A., Hodder M.H., Young S., Lee J., Stark J., 2014. Alternative Drilling Fluid Weighting Agents: A Comprehensive Study on Ilmenite and Hematite. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Fort Worth, Texas, USA*. DOI: 10.2118/167937-MS.
- Wagle V., Al-Yami A.S., Al Abdullatif Z., Bubshait A.S., AlSafran A., 2015. Mitigation of Stuck Pipe Challenges in HTHP Conditions Using Acid Soluble Blend of Barite and Manganese Tetraoxide as Weighting Materials for Drilling Fluids. *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*. DOI: 10.2118/175844-MS.
- Wagle V., Al-Yami A.S., Al-Bahrani H., AlSafran A., 2017a. Acid Soluble Drilling Fluids: Development and Field Trial. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. DOI: 10.2118/188883-MS.
- Wagle V., Al-Yami A.S., Al-Bahrani H., Awadh A., 2017b. Development and Field Trial of New Acid Soluble Drilling Fluids. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference, Kuwait City, Kuwait*. DOI: 10.2118/187652-MS.
- Wagle V., Al-Yami A.S., Aljbran M., Al-Bahrani H., 2018. High Density Drilling Fluids for Managed Pressure Drilling. *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia*. DOI: 10.2118/192248-MS.
- Xiao J., Nasr-El-Din H.A., Al-Bagoury M., 2013. Evaluation of Micronized Ilmenite as a Weighting Material in Oil-based Drilling Fluids for HPHT Applications. *SPE European Formation Damage Conference & Exhibition, Noordwijk, The Netherlands*. DOI: 10.2118/165184-MS.
- Zamora M., Bell R., 2004. Improved Wellsite Test for Monitoring Barite Sag. *AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas*. AADE-04-DF-HO-19.
- Zima G., 2015. Nowy rodzaj płuczki wiertniczej do zastosowania w warunkach HTHP. *Nafta-Gaz*, 71(8): 556–564.



Dr inż. Grzegorz ZIMA
Adiunkt w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: grzegorz.zima@inig.pl



Mgr inż. Sławomir BŁAŻ
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: slawomir.blaz@inig.pl



Mgr inż. Bartłomiej JASIŃSKI
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bartlomiej.jasinski@inig.pl