

Mikro- i nanomateriały w technologii płuczek wiertniczych na bazie olejowej, stosowanych do wiercenia otworów w warunkach wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury (HPHT)

Aleksandra Jamrozik¹ , Andrzej Szczygieł²

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiernictwa, Nafty i Gazu, Kraków

² Chemfor Poland Sp. z o.o.

Streszczenie: Płuczki na bazie olejowej stosowane są głównie podczas wiercenia otworów w trudnych warunkach geologiczno-złożowych, takich jak np.: wysoka temperatura, wysokie ciśnienia złożowe, występowanie reaktywnych formacji skalnych czy też dopływ zmineralizowanych wód złożowych. W publikacji przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań parametrów reologicznych oraz stabilności płuczki wiertniczej na bazie olejowej, gdzie jako materiał obciążający zastosowano mikronizowany baryt. W celu poprawy stabilności tych płuczek stosowano organofilny nanomateriał, jakim był amino-atapulgit.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że zastosowanie mikronizowanego barytu w połączeniu z amino-atapulgitem w płuczkach na bazie olejowej pozwala na modyfikację ich właściwości technologicznych w szerokich zakresach ciężaru właściwego i niskich wartościach właściwości reologicznych. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że włączenie organofilnych atapulgitów do płuczek wiertniczych na bazie olejowej oraz zastosowanie mikronizowanego barytu jako materiału obciążającego ogranicza sedymentację barytu, a także poprawia stabilność takich płuczek.

Słowa kluczowe: płuczki wiertnicze na bazie olejowej, wiercenie otworów, sedymentacja barytu

MICRO- AND NANOMATERIALS IN OIL-BASED DRILLING FLUIDS TECHNOLOGY USED FOR HIGH-PRESSURE, HIGH-TEMPERATURE (HPHT) DRILLING

Abstract: Oil-based drilling fluids are primarily used in challenging geological and reservoir conditions, such as high temperatures, high pressures, reactive rock formations, or the influx of mineralized formation water.

This publication presents the results of laboratory tests on the rheological properties and stability of oil-based drilling fluid, with micronized barite as the weighting material. To enhance the stability of these drilling fluids, an organophilic nanomaterial – amino-attapulgitite, was used.

The research demonstrated that the combination of micronized barite and amino-attapulgitite in oil-based fluids allows for the modification of their properties across a wide range of densities and low rheological values. The results showed that incorporating organophilic attapulgitite and using micronized barite as the weighting agent reduces sedimentation conditions and improving stability drilling fluids.

Keywords: oil-based drilling fluids, well drilling, barite sagging

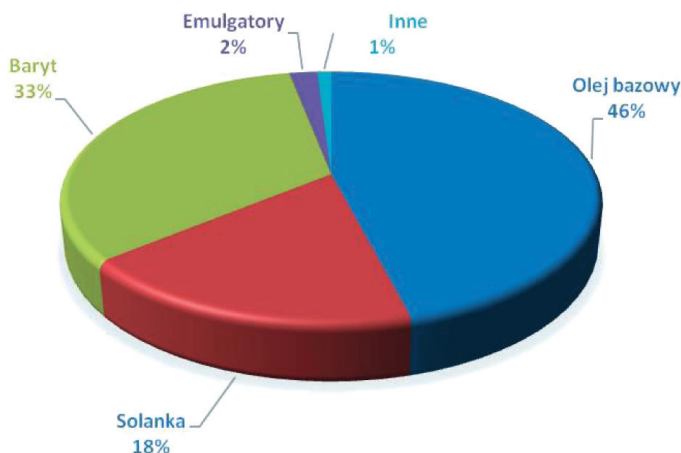
1. Wstęp

Nieustanny rozwój gospodarczy skutkuje wzrostem globalnego zapotrzebowania na energię. Pomimo postępu w rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) transformacja energetyczna przebiegała wolniej, niż oczekiwano, a kluczowe dzwignie tej transformacji nie są jeszcze wystarczająco zaawansowane technologicznie ani opłacalne. Czynniki te w połączeniu z rosnącym zapotrzebowaniem na energię oznaczają, że same odnawialne źródła energii nie są obecnie prognozowane jako wystarczające do zaspokojenia przyszłych potrzeb energetycznych świata. Według McKinsey & Company (2024) paliwa kopalne, w tym ropa naftowa, gaz ziemny i węgiel, będą nadal pełnić istotną rolę (choć nieco mniejszą niż do tej pory) w globalnym miksie energetycznym do 2050 r., zaspokajając, w zależności od przyjętego scenariusza, od 40 procent do 60 procent światowego zapotrzebowania na energię.

Obecnie surowce mineralne w postaci ropy naftowej, gazu ziemnego czy też wód geotermalnych eksplorowane są z coraz to większych głębokości, co skutkuje prowadzeniem prac wiertniczych w warunkach wysokich ciśnień i wysokiej temperatury (HPHT). Prowadzenie prac wiertniczych w warunkach HPHT stawia przed firmami i operatorami wiertniczymi wiele wyzwań związanych z doborem technologii wiercenia i sprzętu czy też związanych z rodzajem i jakością stosowanych płuczek wiertniczych (Gautam 2022). Płuczki wiertnicze odgrywają kluczową rolę w procesie wiercenia w trudnych warunkach, ponieważ wykonują wiele zadań, w tym: chłodzenie narzędzi wiertniczych, transportowanie wydobytego urobku na powierzchnię, stabilizacja otworu wiertniczego oraz redukcja tarcia między narzędziami a otoczeniem geologicznym. Płuczki wiertnicze, aby mogły spełniać swoje funkcje w otworze, w warunkach HPHT, powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką gęstością, warunkowaną równoważeniem ciśnienia złożowego i niepowodującą szczelinowania złoża, odpowiednimi parametrami reologicznymi, stabilnością oraz zdolnością do utrzymania materiału obciążającego w stanie zawieszenia zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych (Bielewicz i in. 2015). Z tego powodu są one złożonymi mikro- i nanokompozytami polimerowo-mineralnymi o zróżnicowanym składzie chemicznym i mineralogicznym, a także zmiennym udziale fazy stałej, zdyspergowanej w środowisku wodnym (WBM – *water based mud*) lub niewodnym (*oil based mud synthetic based mud*) (Jamrozik i in. 2014).

W przypadku wierceń w warunkach HPHT przeważnie stosowane są płuczki wiertnicze na bazie olejowej. Są to zwykle inwersyjne emulsje, w których fazą rozproszoną jest woda, a fazą ciągłą oleje mineralne, syntetyczne bądź parafinowe. Obok fazy ciągłej i rozproszonej w technologii płuczek wiertniczych szczególnie znaczenie dla prawidłowego postępu prac wiertniczych ma dobór odpowiedniego rodzaju fazy stałej.

Rodzaj i ilość fazy stałej zawartej w płuczce przekłada się na proces wiercenia i wpływa na takie parametry, jak: szybkość wiercenia (ROP), parametry hydrauliczne, współczynnik strat technologicznych (rozcieńczanie), moment obrotowy, udary ciśnienia, przyklejenia przewodu wiertniczego, utrata cyrkulacji, stabilność otworu oraz wibracje przewodu wiertniczego. Te z kolei wpływają na żywotność świrdrów, pomp i innych urządzeń mechanicznych oraz na koszt płuczki i systemów oczyszczania, co w konsekwencji decyduje o kosztach wiercenia otworu (Szczygieł i Jamrozik 2024). Typowy skład płuczki na bazie olejowej przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Typowy skład płuczek wiertniczych na bazie olejowej
Źródło: opracowanie własne na podstawie: DACC (2014), Sanzone i in. (2016)

Rodzaj i ilość fazy stałej obecnej w płuczkiach wiertniczych dobierana jest w zależności od rodzaju płuczki, właściwości reologicznych, jakości osadu filtracyjnego i kontroli filtracji, właściwości chemicznych i mechanicznych wiercenia. Jeśli wymagają tego warunki geologiczno-technologiczne wiercenia, gęstość płuczek na bazie olejowej jest zwiększana w wyniku zastosowania materiałów obciążających. Najczęściej stosowanym materiałem do regulacji ciężaru właściwego płuczek stosowanych do wierceń w warunkach HPHT jest baryt, który pozwala na osiągnięcie maksymalnej gęstości płuczki wynoszącej nawet 2516 kg/m^3 .

Niestety głównym problemem związanym ze stosowaniem materiałów obciążających jest to, że mają tendencję do sedymentacji grawitacyjnej zarówno w otworach pionowych, jak i odchylonych, co powoduje wahania gęstości, które ostatecznie wpływają na przechwycenia przewodu wiertniczego, utratę cyrkulacji, problemy związane z kontrolą ciśnienia w otworze, a w skrajnych przypadkach nawet zagrożenie erupcyjne (Ofei i in. 2020). Zjawisko to nazywane jest sedymentacją barytu (ang. *barite sagging*)

i definiowane jako współczynnik sedymentacji (ang. *sag factor*). Występowaniu zjawiska sedymentacji barytu sprzyjają wysoka gęstość płuczki, statyczne warunki, niska lepkość płuczki, występowanie w otworze wysokiego ciśnienia i wysokiej temperatury, a także właściwości fizyczne barytu, takie jak np. rozmiar cząstek czy też obecność w składzie płuczki nanomateriałów (Ofei i in. 2020, Adjei i in. 2023).

Wagle i inni (2015) udowodnili w swoich badaniach, że płuczki wiertnicze w postaci emulsji inwersyjnych, w których zastosowano modyfikatory reologii będące nanocząsteczkami, nie wykazywały tendencji do sedymentacji materiału obciążającego.

Przeprowadzone przez autorów badania laboratoryjne wykazały, że zastosowanie mikronizowanego barytu w połączeniu z nanomateriałami, jakim jest amino-atapulgit, pozwala na modyfikowanie właściwości płuczek w niskich wartościach właściwości reologicznych i szerokich zakresach ciężaru właściwego, wynoszącego nawet 2350 kg/m^3 . Dodatkowo zredukowany do minimum zostaje efekt sedymentacji barytu, co pozwala na uniknięcie problemów związanych ze zmianą gęstości płuczki wiertniczej podczas wiercenia otworu.

2. Materiał badawczy

Materiał badawczy stanowiły płuczki na bazie olejowej, będące emulsjami inwersyjnymi typu woda w oleju. Stosunek oleju do wody wynosił 95 : 5, zaś gęstość płuczki była równa 2350 kg/m^3 . Komponenty do płuczek zostały dostarczone przez firmę Chemfor Poland. Jako fazę ciągłą w tej emulsji zastosowano olej mineralny Escaid 110, firmy ExxonMobil, o właściwościach fizykochemicznych zestawionych w tabeli 1. Olej ten zawiera węglowodory C_{11} – C_{14} , n-alkany, izoalkany, cykloalkany oraz <2% węglowodorów aromatycznych. Oprócz oleju bazowego głównymi składnikami użytymi do przygotowania płuczek były: solanka chlorku wapnia, emulgatory CHEMVERT PE i CHEMVERT SE, środek zwilżający CHEMVERT WE. Płuczka obciążona była dwoma rodzajami barytu: barytem API oraz mikronizowanym barytem. W celu poprawy właściwości reologicznych płuczki do jej składu dodawany był nanomateriał, jakim jest organofilny amino-atapulgit produkowany przez firmę Elementis Specialites. Gęstość nasypowa materiału wynosi 600 kg/m^3 , ciężar właściwy – 2000 kg/m^3 . Zaletą tego materiału jest to, że łatwo dysperguje w rozpuszczalnikach niskopolarnych już przy umiarkowanej agitacji mechanicznej.

Mieszadło jednowrzecionowe Hamilton Beach zostało użyte do mieszania składników płuczki wiertniczej. Składniki mieszano z prędkością 6000 obr./min. W tabeli 2 przedstawiono skład badanych płuczek.

Tabela 1
Właściwości fizykochemiczne oleju Escaid 110
(ExxonMobil 2024)

Parametr	Jednostka	Wartość
Barwa	–	Bezbarwny
Zakres temperatury wrzenia	[°C]	180–270
Temperatura zapłonu	[°C]	74
Temperatura samozapłonu	[°C]	>200
Zakres destylacji	[°C]	192–248
Punkt anilinowy	[°C]	77
Szybkość parowania	–	0,01
Granica palności – górna/dolna	[% obj.] – procent objętościowy w powietrzu	7,0/0,6
Prężność par	[kPa] (0,75 mmHg) w 25°C	<0,1
Gęstość par	(pomiar w 101 kPa)	>1
Gęstość względna	[kg/m ³] (w 15°C)	771–871
Lepkość kinematyczna w (20°C/40°C)	[cSt] (mm ² /s)	2,0 /1,68
Ciężar cząsteczkowy	[G/Mol]	178

Tabela 2
Skład badanych płuczek będących emulsjami inwersyjnymi

Produkt	OBDF API	OBDF Mikro
Olej bazowy Escaid 110	+	+
Emulgator CHEMVERT PE	+	+
Organofilny amino-atapulgit	+	+
Modyfikator reologii CHEMVERT RM	+	+
Wapno	+	+
Emulgator CHEMVERT SE	+	+
Środek zwilżający CHEMVERT WE	+	+
Baryt API	+	–
Mikrobaryt	–	+

Metodyka badań

Kluczowym elementem prowadzonych badań było wykonanie testów laboratoryjnych parametrów reologicznych oraz stabilność płuczki na bazie olejowej z dodatkiem mikronizowanego barytu oraz organofilnego atapulgitu.

Analizę rozkładu wielkości cząstek mikronizowanego barytu stosowanego do obciążania płuczki na bazie olejowej wykonano z zastosowaniem metody dyfrakcji światła laserowego (LD) aparatem Mastersizer 2000 firmy Malvern Instr. Urządzenie wykorzystuje światło laserowe o długości fali 750 nm do pomiaru wielkości cząstek o średnicach od 0,04 μm do 2000 μm za pomocą dyfrakcji światła.

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych płuczki wiertniczej przeprowadzono zgodnie z normami: PN-EN ISO 10414-2:2011, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Badania polowe płynów wiertniczych – Część 2. Płyny na bazie oleju* oraz PN-EN ISO 10416:2020, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyny wiertnicze – Badania laboratoryjne*.

Podatność płuczki na sedymentację barytu w pierwszej kolejności badano podczas pomiaru parametrów reologicznych. W tym celu mierzono lepkość plastyczną, granicę płynięcia i wytrzymałość strukturalną oraz dobrano model reologiczny. Doboru modelu reologicznego dokonano z wykorzystaniem autorskiego programu komputerowego Rheosolution, opracowanego w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, który umożliwia automatyzację procesu wyznaczania optymalnego modelu reologicznego płuczki wiertniczej (Wiśniowski 2020). Współczynnik korelacji Pearsona (R) został użyty do doboru optymalnego modelu reologicznego. Jak zauważyli Adjei i inni (2023), równanie Herschela–Bulkleya (1) zapewnia lepszy model dla charakterystyki mechanizmu sedymentacji barytu. Testy lepkościomierzem obrotowym, wykonane przez Ofei i innych (2019), wykazały, że dynamiczna sedymentacja barytu jest ściśle skorelowana z szybkością ścinania przy krytycznej szybkości powyżej 0,1 s^{-1} , zgodnie ze wzorem Herschela–Bulkleya:

$$\tau = \tau_y + k(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

gdzie:

- τ – naprężenie ścinające,
- τ_y – granica plastyczności,
- k – współczynnik spójności,
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania,
- n – wskaźnik przepływu.

Stabilność emulsji inwersyjnych z dodatkiem barytu klasy API oraz mikrobarytu oceniono w warunkach statycznych za pomocą testu obliczającego współczynnik sedy-

mentacji barytu (ang. *sag factor*) oraz przy użyciu optycznego analizatora Turbiscan Lab., Formulacion.

Badanie sedymentacji barytu w statycznych warunkach przeprowadza się, sezonując płuczkę w celi pomiarowej w temperaturze 140°C przez 16 h. Następnie wylicza się współczynnik sedymentacji barytu, korzystając ze wzoru:

$$Sag\ factor = \frac{\delta_{dół}}{\delta_{dół} + \delta_{górn}} \quad (2)$$

gdzie:

$\delta_{dół}$ – gęstość płuczki na dnie naczynia pomiarowego,

$\delta_{górn}$ – gęstość płuczki w górnej części naczynia pomiarowego.

Analizator Turbiscan Lab., Formulacion jest urządzeniem wyposażonym w źródło światła podczerwonego o długości fali $\lambda = 880$ nm i dwa zsynchronizowane detektory. Detektor transmisji (umieszczony pod kątem 180°) odbiera światło, które przeszło przez próbkę, natomiast detektor rozpraszania wstecznego (umieszczony pod kątem 45°) odbiera światło odbite wstecznie od próbki. Wysoką rozdzielczość pomiaru zapewnia skanowanie próbki co 40 μm . Regulacja częstotliwości skanów pozwala uzyskać profile destabilizacji w funkcji czasu. Czas jednego skanu wynosi 20 s.

Do oceny stabilności badanych układów operowano współczynnikiem TSI (*turbiscan stability index*). Pomiar współczynnika TSI prowadzono w temperaturze: 20°C, 40°C i 80°C.

Im niższa wartość indeksu TSI, tym taki układ jest bardziej stabilny i odwrotnie. TSI oblicza się wzorem:

$$TSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{BS})^2}{n-1}} \quad (3)$$

gdzie:

n – liczba skanów,

x_i – intensywność światła rozpraszanego wstecznie w czasie skanowania i ,

x_{BS} – średnia intensywność światła rozpraszanego wstecznie.

3. Wyniki badań i ich dyskusja

O kondycji płuczek olejowych będących emulsjami inwersyjnymi typu woda w oleju decydują ich właściwości reologiczne oraz stabilność emulsji. Prawidłowo dobrana

stabilność emulsji gwarantuje brak rozdziału faz oraz utrzymanie materiałów obciążających w stanie zawieszenia. Stabilność emulsji analizowanej płuczki obciążanej barytem API wynosiła 1271 V. Właściwości reologiczne tej płuczki charakteryzowały się niską wartością granicy płynięcia – 2 Pa (por. tab. 3), pomimo że do składu płuczki dodany był modyfikator reologii – organofilny amino-atapulgit.

Tabela 3
Właściwości fizykochemiczne badanych płuczek

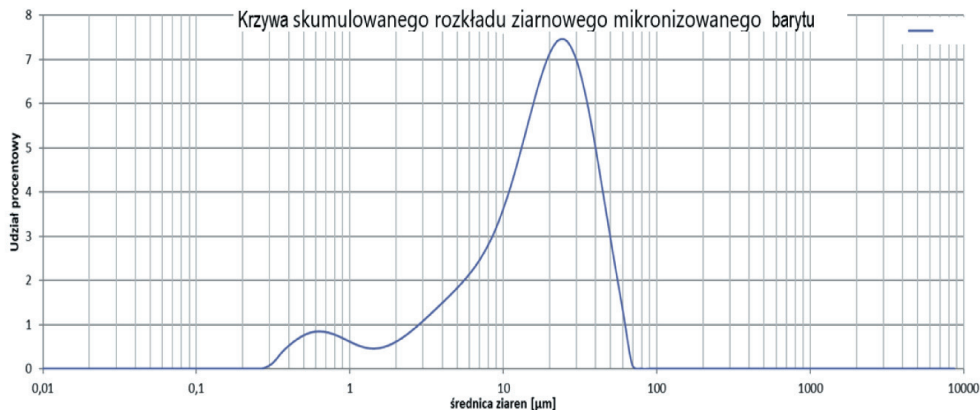
Parametry	Płuczka OBM API	Płuczka OBM Mikro	
Temperatura pomiaru [°C]	50	50	
Gęstość [kg/m ³]	2350	2350	
Lepkość plastyczna wg Bingham PV [mPa·s]	66	47	
Granica płynięcia YP [Pa]	2	18	
Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Gel 10 s	5	9
	Gel po 10 min	19	28
Granica płynięcia przy niskich prędkościach ścinania LSRYP [Pa]	1	3	
Zawartość fazy stałej [%]	40	40	
Zawartość oleju [%]	56,5	56,5	
Zawartość wody [%]	3,5	3,5	
Alkaliczność płuczki (Pom)	2,35	2,35	
Grubość osadu API [mm]	nie mierzono	nie mierzono	
Filtracja API [ml]	nie mierzono	nie mierzono	
Stabilność emulsji [V]	1271	1574	
<i>Sag factor</i>	0,545	0,527	

Uzyskane wartości stabilności oraz granicy płynięcia płuczki obciążanej barytem API były na niewystarczającym poziomie, ponieważ skutkowało to sedimentacją barytu już podczas pomiarów właściwości reologicznych płuczki lepkościomierzem obrotowym OFITE 900.

Z powyższych względów przygotowano płuczkę, gdzie jako materiał obciążający zastosowano mikronizowany baryt, o rozkładzie ziarnowym przedstawionym na rysunku 2.

Analizując dane z wykresu umieszczonego na rysunku 2, można stwierdzić, że rozmiar cząstek mikronizowanego barytu zawiera się w przedziale od 3,0 μm (dolny decyl), średni rozmiar przypada na wielkość 19,0 μm (mediana) do 44 μm (górny decyl).

W świetle powyższego mikronizowany baryt w ponad 90% składa się z cząstek o rozmiarach 44 μm . Natomiast baryt API charakteryzuje się wielkością cząstek, gdzie górny decyl przypada na cząsteczki o rozmiarach 70 μm (Bielewicz 2015).



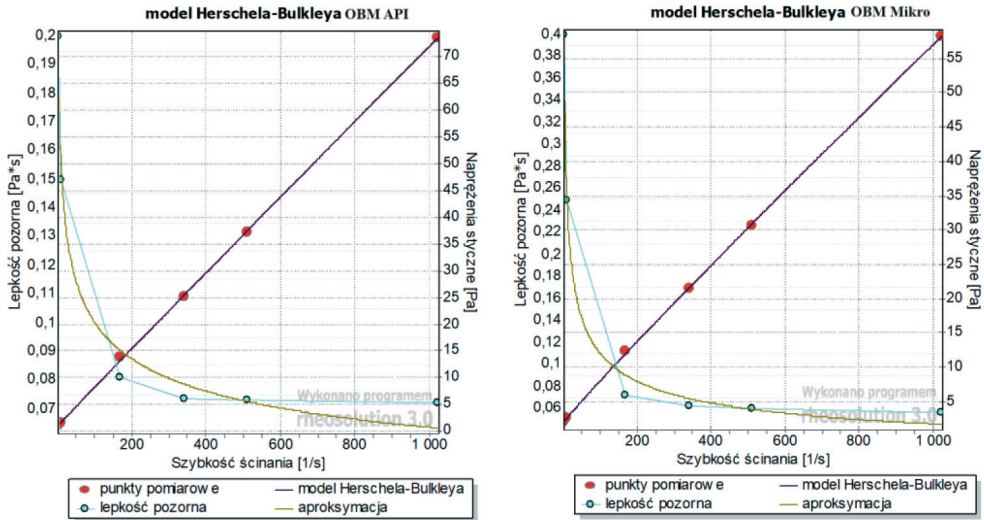
Rys. 2. Krzywa skumulowanego rozkładu ziarnowego mikrobarytu

Płuczka wiertnicza z mikronizowanym barytem charakteryzowała się znacznie mniejszą sedymentacją fazy stałej (*sag factor* dla tej płuczki wynosił 0,527) w porównaniu z płuczką obciążaną barytem API (*sag factor* miał wartość 0,545). *Sag factor* mierzony po kondycjonowaniu płuczki przez 16 h w 140°C definiowany jest jako bezpieczny, jeżeli jego wartość mieści się w granicach poniżej 0,530, co miało miejsce w przypadku płuczki obciążanej mikronizowanym barytem. Jeżeli *sag factor* jest powyżej 0,531, badanie to wskazuje na początek niestabilności w płuczce. Natomiast jeżeli wartość tego współczynnika jest wyższa niż 0,542, mamy wtedy do czynienia z niestabilnością płuczki inwersyjnej. Wówczas płuczka taka nie może zapewnić wystarczających warunków do zawieszenia barytu (Elkatatny 2018).

Zjawisko to można tłumaczyć właściwościami lepkością płuczek wiertniczych, które są definiowane głównie ze względu na wytrzymałość strukturalną oraz granicę płynięcia i odnoszą się do zdolności płuczki do utrzymania w stanie zawieszenia cząstek barytu. Płuczka z dodatkiem mikrobarytu miała wyższe wartości granicy płynięcia i wytrzymałości strukturalnej. Na uwagę zasługuje również znacznie niższa wartość lepkości plastycznej i lepkości pozornej w płuczce z mikrobarytem, zwłaszcza przy wysokich prędkościach ścinania (tab. 3, rys. 3), w porównaniu z płuczką z tradycyjnym materiałem obciążającym.

Niższa lepkość plastyczna przy tej samej wartości gęstości płuczki będzie skutecznie wpływać na zmniejszenie równoważnej gęstości cyrkulacji. Równoważna gęstość cyrkulacji ma bezpośrednie przełożenie nie tylko na przebieg wiercenia, ale również prawidłowy proces rurowania i cementowania otworu wiertniczego.

Należy również podkreślić, że mikronizowany baryt nie wpływał na zmianę modelu reologicznego analizowanych płuczek. Najlepiej dopasowanym modelem reologicznym, zarówno dla płuczek OBM API, jak i OBM Mikro, był model cieczy Herschela–Bulkleya (rys. 3). Współczynnik korelacji Pearsona dla tych płuczek wykazywał korelację pełną.



Rys. 3. Wykres zależności wartości lepkości pozornej od szybkości ścinania dla modelu Herschela–Bulkleya dla płuczki OBM z dodatkiem barytu API oraz mikronizowanego

Rozpatrując globalną stabilność statyczną badanych płuczek na podstawie współczynnika TSI, obliczonego zgodnie z równaniem (3), można zauważyć, w przypadku płuczek z dodatkiem barytu API, w zakresie temperatur do 40°C, emulsja nie wykazuje wzrostu dynamiki destabilizacji układu (tab. 4). Kiedy temperatura skanowania osiągnie 80°C, powoduje to znaczny (ponad czterokrotny) wzrost niestabilności układu. Natomiast w przypadku płuczek z dodatkiem mikrobarytu podwyższenie temperatury wpływa tylko w nieznaczny sposób na wzrost współczynnika TSI z poziomu 0,6 przy temperaturze 20°C do poziomu 1,4 w temperaturze 80°C.

Tabela 4

Zmiana wartości współczynnika TSI w temperaturze dla próbki płuczki na bazie olejowej obciążanej barytem API i mikronizowanym barytem

Temperatura pomiaru [°C]	20	40	8,0
Współczynnik TSI, płuczka OBM API	1,2	1,2	4,4
Współczynnik TSI, płuczka OBM Mikro	0,6	bp	1,4

Należy podkreślić, że im wyższa wartość TSI, tym szybciej cząstki barytu osiedlają się w próbce płuczki, a tym samym mniej stabilna jest próbka emulsji w funkcji czasu. Badania współczynnika TSI potwierdzają, że próbka płuczki z mikrobarytem jest bardziej stabilna niż płuczka OBM API.

4. Wnioski

1. Płuczki olejowe zawierające w swym składzie mikronizowany baryt oraz organofilne nanomateriały w postaci amino-atapulgitu wykazują unikalny profil reologiczny w porównaniu z płuczkami obciążanymi barytem API.
2. Zastosowanie mikronizowanego barytu w technologii płuczek na bazie olejowej korzystnie wpływa na parametry reologiczne tych płuczek, jednocześnie nie powodując znacznej sedimentacji barytu.
3. W przypadku płuczki z dodatkiem barytu API współczynniki sedimentacji barytu oraz TSI były na wysokim poziomie, dyskwalifikującym tę płuczkę do zastosowania w otworze.
4. Szczególnie wysoka wartość lepkości przy niskich prędkościach ścinania sugeruje, aby stosować mikrobaryt oraz amino-atapulgit jako materiały wpływające na prawidłowe wynoszenie przez płuczkę zwiercin z dna otworu, a przede wszystkim zapobiegające sedimentacji barytu w obciążonych płuczkach na bazie olejowej.

Praca powstała w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” dla Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Literatura

- Adjei S., Elkhatatny S., Adams Sokama-Neuyam Y., Sarkodie K., Atuquaye Quaye J., 2023, *Evaluation and remediation techniques for barite sagging: A review*, *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 225, art. 211731, <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211731>.
- Bielewicz D., Dudek A., Goc A., Herman Z., 2015, *Technologia płuczek wiertniczych*, [w:] Rychlicki S. (red. nac.), Stryczek S. (red. tomu), *Poradnik górnika naftowego: praca zbiorowa*, t. 2: *Wiertnictwo*, Stowarzyszenie Naukowo-Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków, s. 637–708.
- DACC – Drilling and Completion Committee, 2014, *An Industry Recommended practice (IRP) – IRP 14: Non-Water Based Drilling Fluid*, vol. 14, <https://www.energysafetycanada.com/Resource/DACC-IRP-Volumes/DACC-IRP-VOLUME-14-NON-WATER-BASED-DRILLING-FLUIDS> [dostęp: 18.03.2024].

- Elkhatatny S., 2018, *Enhancing the Stability of Invert Emulsion Drilling Fluid for Drilling in High-Pressure High-Temperature Conditions*, *Energies*, vol. 11, art. 2393, <https://doi.org/10.3390/en11092393>.
- ExxonMobil, 2024, *Escaid™ 110 Fluid Product Safety Summary*, https://www.exxonmobilchemical.com/en/resources/library/library-detail/2501/escaid_110_fluid_product_safety_summary [dostęp: 18.03.2024].
- Gautam S., 2022, *A state of the art review on the performance of high-pressure and high-temperature drilling fluids: Towards understanding the structure-property relationship of drilling fluid additives*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 213, art. 110318, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110318>.
- Jamrozik A., Gonet A., Fijał J., Terpiłowski K., Czekaj L., 2014, *Analysis of waste mud stability*, *AGH Drilling, Oil, Gas*, vol. 31, no. 1, s. 25–38, <https://doi.org/10.7494/drill.2014.31.1.25>.
- McKinsey & Company, 2024, *Global Energy Perspective 2024*, September 2024, <https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-materials/our-insights/global-energy-perspective#/> [dostęp: 9.11.2024].
- Ofei T.N., Lund B., Saasen A., Sangesland S., Linga H., Gyland K.R., Kawaji M., 2020, *Barite Sag Measurements*, [w:] *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition held in Galveston, Texas, 3–5 March 2020*, IADC/SPE-199567-MS.
- Ofei T.N., Saasen A., 2019, *A New Approach to Dynamic Barite Sag Analysis on Typical Field Oil-Based Drilling Fluid*, *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, vol. 27, s. 61–69.
- PN-EN ISO 10414-2:2011, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Badania polowe płynów wiertniczych. Część 2. Płyiny na bazie oleju*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 10416:2020, *Przemysł naftowy i gazowniczy – Płyiny wiertnicze – Badania laboratoryjne*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Sanzone D.M., Naff J., M, Vinhateiro N., 2016, *Environmental Fates and Effects of Ocean Discharge of Drill Cuttings and Associated Drilling Fluids From Offshore Oil and Gas Operations*, International Association of Oil & Gas Producers (IOGP) Report 543, AECOM, https://www.researchgate.net/publication/299285673_Environmental_Fates_and_Effects_of_Ocean_Discharge_of_Drill_Cuttings_and_Associated_Drilling_Fluids_From_Offshore_Oil_and_Gas_Operations.
- Szczygieł A., Jamrozik A., 2024, *Pluczki do wierceń geotermalnych – kluczowe kryteria doboru*, *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, nr 1 (299).
- Wagle V., Alyami A., AlAbdullatif Z., 2015, *Using Nanoparticles to Formulate Sag-Resistant Invert Emulsion Drilling Fluids*, [w:] *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, London, UK, 17–19 March, <http://doi.org/10.2118/173004-MS>.
- Wiśniowski R., 2020, *Selection of a Suitable Rheological Model for Drilling Fluid Using Applied Numerical Methods*, *Energies*, vol. 13, art. 3192, <http://doi.org/10.3390/en13123192>.