

Sławomir Błaż

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Analiza właściwości technologicznych płuczki inwersyjnej w warunkach HTHP

Wiercenie otworów w warunkach występowania wysokich ciśnień i temperatury najczęściej realizowane jest przy zastosowaniu płuczek olejowodispersyjnych, które – z uwagi na swoje właściwości – kwalifikują je do celów HTHP. Jednym z ważniejszych zagadnień występujących podczas wiercenia głębokich otworów jest dostosowanie właściwości płuczki do panujących warunków otworowych. Płuczka musi charakteryzować się wysoką odpornością temperaturową, zapobiegać uszkodzeniu złoża i innym zagrożeniom związanym z wierceniem otworów w warunkach HTHP. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych odporności opracowanej płuczki inwersyjnej na działanie wysokiego ciśnienia i temperatury. Przeprowadzone badania umożliwiły także ocenę oddziaływania płuczki na skały ilasto-lupkowe oraz określenie jej wpływu na przepuszczalność skał zbiornikowych dla ropy i gazu.

Słowa kluczowe: płuczka inwersyjna, faza olejowa, stabilność emulsji, warunki HTHP.

### Analysis of the technological properties of invert emulsion drilling mud in HTHP conditions

Drilling holes in conditions of high pressure and high temperature (HTHP) is often realized by using invert emulsion drilling muds, due to their properties. One of the major tasks that occur during drilling deep holes is to adjust mud properties to borehole conditions, that can lead to safe and efficient exploitation. The drilling mud must have high temperature resistance, must prevent formation damage and other threats related to drilling under HTHP conditions. The article presents the results of laboratory tests on the developed invert emulsion mud resistant to high pressure and temperature. The studies also enabled the evaluation of drilling mud impact on clay-shale rocks and its effect on the permeability of reservoir rocks.

Key words: invert emulsion drilling mud, the oil phase, emulsion stability, HTHP conditions.

### Wprowadzenie

Zmniejszające się zasoby ropy i gazu ziemnego zmuszają firmy wiertnicze do poszukiwania nowych złóż, często na obszarach niezbadanych i zalegających na dużych głębokościach. Według amerykańskiego rozporządzenia Minerals Management Service (MMS), ponad 50% udokumentowanych zasobów ropy naftowej i gazu w Stanach Zjednoczonych leży poniżej 4267 m. W Zatoce Meksykańskiej niektóre złoże ropy naftowej i gazu ziemnego znajdują się na głębokości 8230 m, o temperaturze przekraczającej 200°C i ciśnieniu złożowym 169 MPa. Poprzez warunki HTHP rozumiemy występowanie w otworach wiertniczych wysokich temperatur i ciśnień. O warunkach HTHP możemy mówić

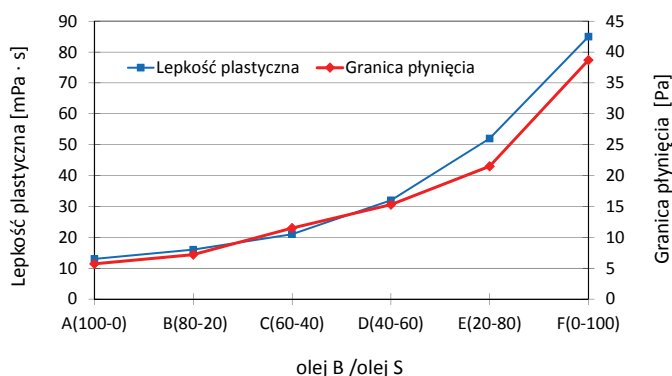
wtedy, gdy temperatura wynosi minimum 150°C, a ciśnienie przekracza wartość 69 MPa [1, 2, 3, 10, 11].

Do wiercenia otworów w takich warunkach najczęściej stosowane są płuczki olejowodispersyjne, które – z uwagi na swoje właściwości – kwalifikują je do celów HTHP. Jednym z ważniejszych zadań występujących podczas wiercenia głębokich otworów jest dostosowanie właściwości płuczki do panujących warunków otworowych. Płuczka musi się charakteryzować wysoką odpornością temperaturową, zapobiegać uszkodzeniu strefy przyodwiertowej i innym zagrożeniom związanym z wierceniem otworów w warunkach HTHP [16, 17].

## Badania nad modyfikacją parametrów reologiczno-strukturalnych płuczek inwersyjnych

Do podwyższenia parametrów reologiczno-strukturalnych fazy olejowej płuczki inwersyjnej stosowane są głównie olejofilne bentonity, ewentualnie inne środki, takie jak: polimery rozpuszczalne w oleju, żywice poliamidowe, kwasy polikarboksyłowe i mydła kwasów tłuszczowych [4, 5, 8, 9]. Innym sposobem poprawy parametrów reologiczno-strukturalnych płuczek inwersyjnych jest możliwość modyfikacji składu ośrodka dyspersyjnego za pomocą odpowiednio dobranych środków.

Podstawowym zadaniem modyfikowania ośrodka dyspersyjnego płuczki inwersyjnej jest możliwość dostosowania parametrów reologiczno-strukturalnych do panujących warunków temperaturowych. W toku prowadzenia badań laboratoryjnych nad doбором środków regulujących parametry reologiczno-strukturalne wytypowano olej S, który może spełniać powyższą rolę. Modyfikację ośrodka dyspersyjnego płuczki inwersyjnej przeprowadzano poprzez zmieszanie olejów B i S w różnych proporcjach objętościowych, uzyskując fazę olejową o zmienionych właściwościach reologiczno-strukturalnych. W wyniku modyfikacji fazy olejowej płuczki inwersyjnej uzyskaliśmy zwiększenie zakresu możliwości regulowania parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki inwersyjnej. Zmiany właściwości reologicznych płuczki inwersyjnej w wyniku modyfikacji jej ośrodka dyspersyjnego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wpływ składu fazy olejowej na właściwości reologiczne płuczki inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20

Modyfikacja ośrodka dyspersyjnego płuczki umożliwiła regulację jej granicy płynięcia w zakresie od 5,7 do 37,8 Pa oraz lepkości plastycznej od 13 do 86 mPa·s, co jest niezmiernie istotne podczas projektowania właściwości płuczek inwersyjnych do wiercenia otworów w warunkach HTHP. W wyniku modyfikacji fazy olejowej płuczki inwersyjnej można także uzyskać zwiększenie elektrycznej stabilności płuczki inwersyjnej ES. Przeprowadzone badania wykazały, że przy odpowiednim stosunku mieszania oleju B z olejem S stabilność elektryczna ES płuczki inwersyjnej zmieniała się w zakresie od 720 do 1500 V.

### Właściwości płuczek inwersyjnych w warunkach HTHP

Występowanie wysokich temperatur i ciśnień jest bezpośrednio związane z głębokością wiercenia otworu. W celu wyboru najbardziej odpowiedniego typu płuczki do wiercenia w warunkach HTHP niezbędne jest przeanalizowanie zachodzących zmian we właściwościach reologicznych płuczek w wyniku działania temperatury i ciśnienia. Odporność temperaturowa większości płuczek wodnodispersyjnych wynosi maksymalnie 140÷150°C [6, 7, 11]. Płuczki inwersyjne z uwagi na główny składnik, czyli olej, charakteryzują się znacznie większą odpornością na działanie temperatury. Odporność płuczki w tym zakresie sprawdzano w warunkach statycznych poprzez kilkukrotne jej wygrzewanie przez okres 24 godzin w temperaturach: 120, 140, 160, 180 i 200°C. Natomiast badania płuczek w warunkach dynamicznych przeprowadzono za pomocą wiskozymetru Ofite 77 w cyklu podgrzewania w temperaturach od 20 do 120, 140 lub 160°C (w zależności od składu płuczki), a następnie ponownego ich schładzania do temperatury otoczenia.

Przeprowadzone badania nad modyfikacją ośrodka dyspersyjnego płuczki inwersyjnej pozwoliły na wytypowa-

nie składów płuczek o określonych parametrach reologiczno-strukturalnych do danej temperatury. Płuczki zostały obciążone blokatorem M25 do gęstości 940 kg/m<sup>3</sup>, a następnie barytem do gęstości 1200 kg/m<sup>3</sup> i skażone 5% ilitu miodońskiego symulującego zwierconą fazę stałą. W tablicy 1 i na rysunku 2 przedstawiono właściwości płuczki inwersyjnej, na podstawie mieszaniny olejów B i S (w stosunku 40:60) poddanej działaniu temperatury w warunkach statycznych od 120 do 200°C.

Płuczka inwersyjna na podstawie mieszaniny olejów B i S (w stosunku 40:60) w temperaturze 20°C charakteryzowała się lepkością plastyczną 54 mPa·s i granicą płynięcia 20,5 Pa. W wyniku wygrzewania w temperaturze 120°C nie zmieniła ona znacząco swoich właściwości: lepkość plastyczna wzrosła o 2 mPa·s, granica płynięcia o 0,5 Pa, natomiast elektryczna stabilność płuczki ES w wyniku działania temperatury zmniejszyła się z 860 do 740 V (tablica 1, rysunek 2). Niepewność uzyskanych wyników pomiarów oznaczono na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych na poziomie: dla pomiarów reologicznych – 0,2%, dla pomiaru

Tablica 1. Badania laboratoryjne odporności płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S (w stosunku 40:60) poddanej działaniu temperatury w warunkach statycznych od 120 do 200°C

Nr płuczki	Rodzaj płuczki	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> ]	ES [V]
		$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II		
1	Płuczka inwersyjna + baryt do gęstości 1200 kg/m <sup>3</sup> + 5% miocen (zwierciny)	1230	54	75,5	20,5	8,6/9,1	1,0	860
2	Płuczka 2 po wygrzaniu w temp. 120°C	1230	56	78,0	21,0	9,1/9,6	1,2	740
3	Płuczka 2 po wygrzaniu w temp. 140°C	1230	58	81,5	22,5	9,6/10,0	1,6	680
4	Płuczka 2 + PSPH2 0,3 po wygrzaniu w temp. 160°C	1230	61	86,0	24,0	10,0/10,5	2,4	860
5	Płuczka 2 po wygrzaniu w temp. 180°C	1230	64	90,0	24,8	10,0/11,0	4,0	820
6	Płuczka 2 po wygrzaniu w temp. 200°C	1230	68	94,5	25,3	11,0/11,5	7,4	800
7	Płuczka 6 + 2% SX	1230	69	95,5	25,3	11,5/12,0	2,4	780

przepuszczalności – 0,5%, dla pomiaru gęstości – 0,5% oraz dla pomiarów elektrycznej stabilności emulsji ES – 0,1%.

Ponowne wygrzanie płuczki w temperaturze 140°C przekłada się na znacznie większy wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych: lepkość plastyczna zwiększa się o 2 mPa·s, granica płynięcia o 1,5 Pa. Wzrostowi ulega także filtracja płuczek: z 1,2 do 1,6 cm<sup>3</sup>/30 min. Po dwukrotnym wygrzaniu płuczki w 120°C, a następnie 140°C, jej stabilność elektryczna ES obniżyła się do 680 V (tablica 1).

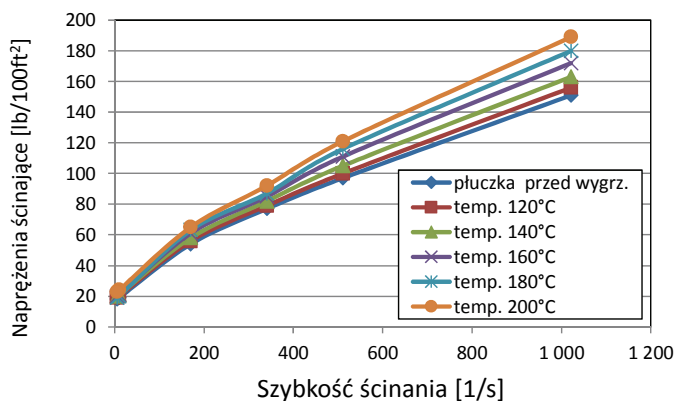
W celu zwiększenia elektrycznej stabilności płuczki inwersyjnej dodano do niej środek zwilżający PSPH2 w ilości 0,3%, a następnie ponownie poddano ją wygrzewaniu w temperaturze 160°C.

Zmiany zachodzące we właściwości płuczek w wyniku wygrzania ich w temperaturze 160°C to głównie dalszy wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych i zwiększenie filtracji (tablica 1, rysunek 2). Trzykrotne wygrzanie płuczek w temperaturach 120, 140 i 160°C nie spowodowało rozkładu płuczki inwersyjnej na fazę wodną i olejową. Płuczki zachowały wysoką stabilność elektryczną ES, wynoszącą 860 V (tablica 1).

Wpływ wysokiej temperatury w warunkach statycznych przy dużej zawartości fazy stałej może prowadzić do nadmiernego żelowania płuczki. Zbyt wysokie wartości wytrzymałości strukturalnej mogą powodować trudności podczas przeprowadzania pomiarów geofizycznych lub przy oczyszczaniu płuczki ze zwierconej fazy stałej. Po wygrzaniu

płuczki w temperaturze 180°C zauważalny jest wzrost jej wytrzymałości strukturalnej do wartości 10/11 Pa. Należy również zaznaczyć, że wartości wytrzymałości strukturalnej po 10 min są niewiele większe od wytrzymałości po 10 s, co może mieć znaczenie podczas cyrkulacji płuczki po dłuższym okresie przestoju. Czterokrotne wygrzanie płuczki w temperaturach 120, 140, 160 i 180°C nie spowodowało gwałtownego obniżenia stabilności elektrycznej ES płuczki inwersyjnej, która wyniosła 820 V (tablica 1). Dalszy wzrost temperatury do 200°C nie doprowadził do znaczącego wzrostu parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki: lepkość plastyczna zwiększyła się z 64 do 68 mPa·s, granica płynięcia z 24,8 do 25,3 Pa, pięciokrotne wygrzanie płuczki w temperaturach: 120, 140, 160, 180 i 200°C wpłynęło na obniżenie elektrycznej stabilności ES (do wartości 800 V) i znaczny wzrost filtracji (do 7,4 cm<sup>3</sup>/30 min) – tablica 1. Wzrost filtracji może być spowodowany częściowym rozpuszczeniem w temperaturze 200°C środka do obniżania filtracji GM-P. W celu zmniejszenia filtracji do płuczek dodano 2% środka asfaltowego SX, który wpłynął na obniżenie filtracji do około 2,4 cm<sup>3</sup>/30 min.

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



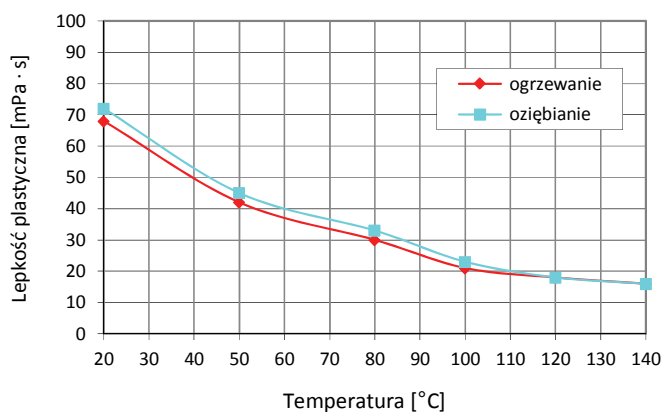
Rys. 2. Krzywe płynięcia płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S (w stosunku 40:60) poddanej działaniu temperatury w warunkach statycznych od 120 do 200°C

otworowej mogą doprowadzić do wysedymentowania materiału obciążającego z płuczki, powodując obniżenie jej gęstości, co w konsekwencji może doprowadzić do awarii związanych z przechwyceniem przewodu wiertniczego, obsypywaniem ścian otworu czy dopływem płynów złożowych. W celu wyboru najbardziej odpowiedniego typu płuczki do wiercenia w warunkach HTHP niezbędne jest przeanalizowanie zachodzących zmian we właściwościach reologicznych płuczek w wyniku działania temperatury i ciśnienia [2, 7, 11].

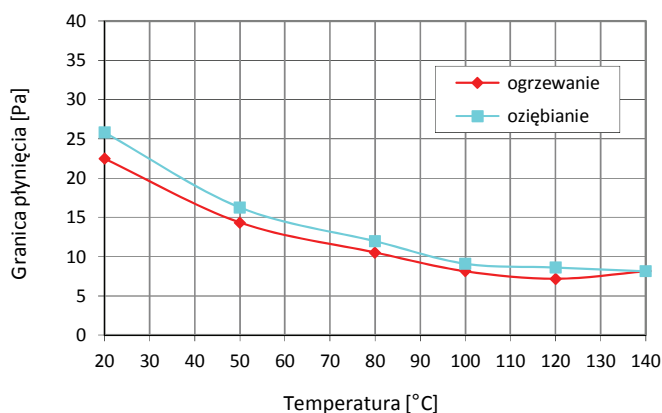
Badania właściwości reologiczno-strukturalnych płuczek w warunkach dynamicznych przeprowadzono za pomocą viskozymetru Ofite 77 w cyklu podgrzewania ich w temperaturze od 20 do 120, 140, 160°C (w zależności od składu płuczki), a następnie ponownego schładzania do temperatury otoczenia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 3, 4, 6 i 7, w formie wykresu zmian lepkości plastycznej i granicy płynięcia w zależności od temperatury.

Do analizy właściwości reologicznych płuczki w temperaturze dynamicznej 140°C wytypowano płuczkę inwersyjną na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 60:40. Poprzez zastosowanie w składzie płuczki oleju S płuczka inwersyjna w temperaturze 20°C i przy ciśnieniu atmosferycznym charakteryzowała się lepkością plastyczną 50 mPa·s i granicą płynięcia 20,5 Pa. W wyniku wzrostu ciśnienia do 1,4 MPa lepkość plastyczna płuczki zwiększyła się do 68 mPa·s, a granica płynięcia do 22,5 Pa (rysunki 3 i 4). Płuczkę inwersyjną o przedstawionych właściwościach poddano wygrzewaniu do temperatury 140°C. Właściwości reologiczne płuczki w cyklu podgrzewania ulegają obniżeniu. Lepkość plastyczna w temperaturze 50°C obniża się do 42 mPa·s, w 80°C do 30 mPa·s, by w temperaturze 140°C osiągnąć wartość 16 mPa·s (rysunek 3). Zmiany granicy płynięcia w wyniku działania temperatury przebiegają podobnie do temperatury 120°C, tzn. wraz ze wzrostem temperatury następu-

je systematyczny spadek granicy płynięcia do 7,2 Pa. Natomiast przy wzroście temperatury do 140°C następuje odwrócenie tendencji spadkowej, powodując niewielki wzrost granicy płynięcia do 8,1 Pa (rysunek 4). Następnie w cyklu schładzania płuczka odbudowuje swoje parametry, które są wyższe w porównaniu z płuczką przed wygrzaniem (lepkość plastyczna o około 2÷3 mPa·s, a granica płynięcia o maksymalnie 2,4 Pa) – rysunki 3 i 4.



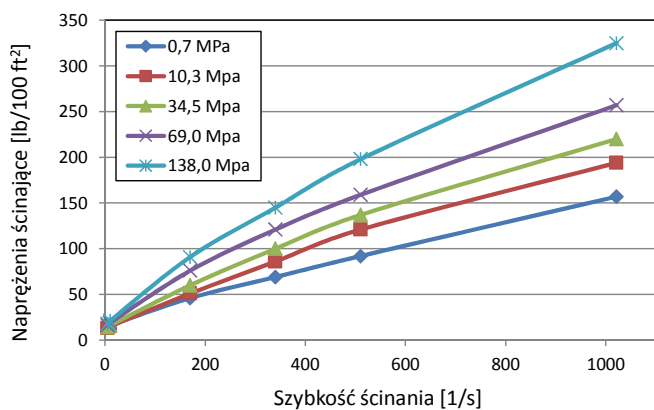
Rys. 3. Zmiany lepkości plastycznej płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 60:40, w zależności od zmian temperatury



Rys. 4. Zmiany granicy płynięcia płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 60:40, w zależności od zmian temperatury

Porównanie właściwości reologicznych płuczki w temperaturze 20°C przy ciśnieniu atmosferycznym i ciśnieniu 1,4 MPa wykazało, że płuczka inwersyjna w wyniku wzrostu ciśnienia do 1,4 MPa zmieniała swoje właściwości reologiczne (rysunki 3, 4). W związku z powyższym przeprowadzono dodatkowe badanie określenia wpływu działania zmiennego ciśnienia (0,7; 10,3; 34,5; 69 i 138 MPa) na właściwości reologiczne płuczki przy stałej temperaturze 20°C. Analizując krzywe płynięcia płuczki w zależności od działającego ciśnienia, na rysunku 5 można zauważyć, że każdorazowy wzrost ciśnienia wpływa na zmianę parametrów reolo-

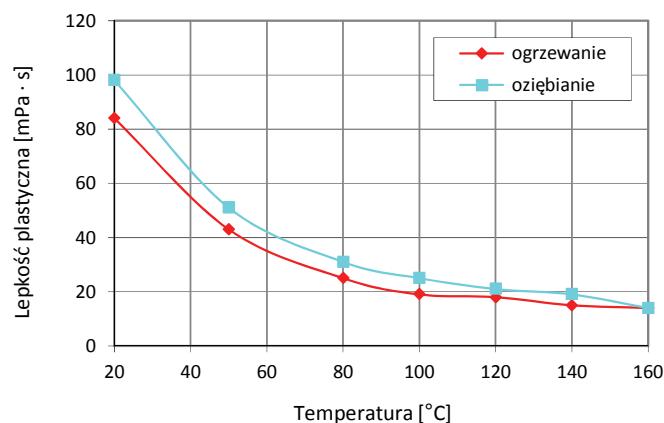
gicznych płuczki inwersyjnej. Przy ciśnieniu 34,5 MPa lepkość plastyczna wzrasta do 83 mPa · s, a granica płynięcia do 25,8 Pa. Następny wzrost ciśnienia do 138 MPa przekłada się na zwiększenie lepkości plastycznej płuczki do 127 mPa · s i granicy płynięcia do 34 Pa (rysunek 5). Wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki inwersyjnej przy działaniu podwyższonego ciśnienia może mieć związek z większą ściśliwością podstawowego składnika płuczki inwersyjnej, czyli oleju. Płuczki na osnowie oleju są bardziej ściśliwe niż płuczki wodnodispersyjne, a zatem gęstość w warunkach otworowych może się różnić od ich gęstości zmierzonej na powierzchni. Należy również zaznaczyć, że przy działaniu wysokiej temperatury wpływ ciśnienia na parametry reologiczno-strukturalne płuczki jest znacznie mniejszy.



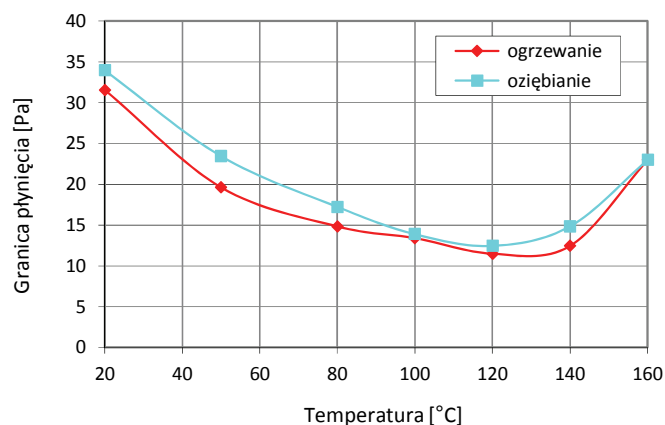
Rys. 5. Krzywe płynięcia płuczki na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 60:40, w zależności od zmian ciśnienia

Zastosowanie płuczki do wiercenia otworu, w którym mogą występować temperatury dochodzące do 160°C, wymaga podwyższenia parametrów reologiczno-strukturalnych. Poprawę parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki inwersyjnej uzyskaliśmy poprzez zastosowanie jako fazy olejowej mieszaniny składającej się z 40% oleju B i 60% oleju S. Z przebiegu wykresu lepkości plastycznej płuczki w zależności od temperatury wynika, że wraz ze wzrostem temperatury od 20 do 160°C lepkość plastyczna ulega obniżeniu z wartości 84 do 14 mPa · s. Natomiast po całym cyklu pomiarowym i obniżeniu temperatury do warunków otoczenia następuje odbudowa lepkości plastycznej do wartości 98 mPa · s (rysunek 6). Analizując wykres zmian granicy płynięcia płuczki w zależności od temperatury, można stwierdzić, iż obniżanie granicy płynięcia zachodzi do temperatury 120°C. W temperaturze 120°C granica płynięcia osiąga najniższą wartość 11,5 Pa. Dalszy wzrost temperatury powoduje zwiększenie granicy płynięcia: do 12,4 Pa – w temperaturze 140°C, do 22,9 Pa – w temperaturze 160°C. W cyklu schładzania płuczki do temperatury 120°C granica płynięcia najpierw ulega

obniżeniu do 12,4 Pa, a następnie w temperaturze otoczenia następuje odbudowa jej wartości do 33,9 Pa (rysunek 7). Po ochłodzeniu płuczki do temperatury otoczenia stwierdzono, że wytrzymała ona działanie temperatury 160°C i nie uległa rozkładowi na fazę wodną i olejową, a wartość elektrycznej stabilności płuczki inwersyjnej ES wynosiła 520 V.



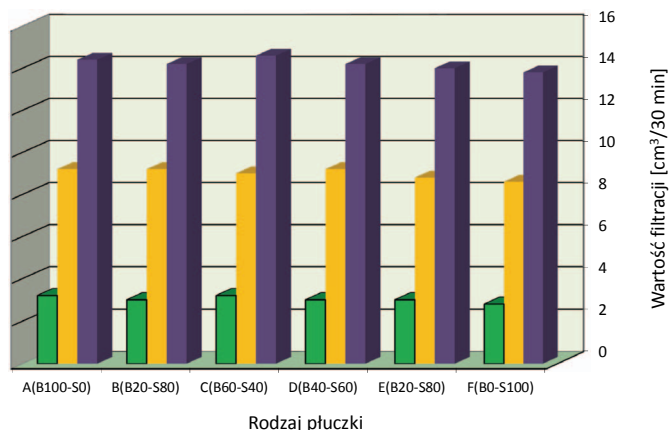
Rys. 6. Zmiany lepkości plastycznej płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 40:60, w zależności od zmian temperatury



Rys. 7. Zmiany granicy płynięcia płuczki inwersyjnej na osnowie mieszaniny olejów B i S w stosunku 40:60, w zależności od zmian temperatury

Działanie wysokiej temperatury i ciśnienia wpływa również na zmianę wielkości filtracji płuczek inwersyjnych. W związku z powyższym przeprowadzono badania określenia wpływu działania wysokiej temperatury i ciśnienia na filtrację płuczek inwersyjnych różniących się między sobą składem fazy olejowej. Filtrację płuczek badano na prasie filtracyjnej HTHP (PN-EN ISO 10414-2) w temperaturach 120, 140 i 160°C, przy ciśnieniu różnicowym 3,44 MPa (rysunek 8).

Przeprowadzone badania filtracji w temperaturze 120°C wykazały, że najmniejszą filtracją charakteryzowała się płuczka na osnowie oleju S, która wynosiła 2,8 cm<sup>3</sup>/30 min. Natomiast największą filtrację określono dla płuczki inwersyjnej na osnowie oleju B, która wynosiła 3,2 cm<sup>3</sup>/30 min



Rys. 8. Wielkość filtracji płuczek inwersyjnych w zależności od składu fazy olejowej w temperaturach 120, 140 i 160°C i przy ciśnieniu różnicowym 3,44 MPa

(rysunek 8, płuczka A). Wraz z podwyższeniem temperatury do 140°C wzrasta filtracja płuczek: w przypadku płuczki na osnowie oleju S do wartości 8,6 cm³/30 min (płuczka F), natomiast w płuczce na bazie oleju B – do wartości 9,2 cm³/30 min (rysunek 8, płuczka A). W temperaturze 160°C i przy ciśnieniu różnicowym 3,44 MPa w płuczce zachodzą procesy, które prowadzą do zwiększenia filtracji przekraczającej wartość 14 cm³/30 min. Najniższą filtra-

cję w temperaturze 160°C stwierdzono w płuczce inwersyjnej na osnowie oleju S, wynosiła ona 13,8 cm³/30 min (rysunek 8). Natomiast płuczka inwersyjna na osnowie oleju B i oleju S, o stosunku 60:40, charakteryzowała się najwyższą filtracją, która wynosiła 14,6 cm³/30 min (rysunek 8, płuczka C). Należy zaznaczyć, że filtratem z płuczki inwersyjnej jest olej, który – wnikając w przestrzeń porową skał – nie będzie powodował pęcznienia i hydratacji przewiercanych skał ilasto-łupkowych. W celu obniżenia wartości filtracji płuczek w temperaturze powyżej 160°C, należy przeprowadzić dodatkowe badania nad doбором nowych rodzajów środków do regulacji filtracji charakteryzujących się wysoką odpornością temperaturową.

Wiercenie otworów w formacjach o podwyższonym ciśnieniu i temperaturze wymaga stosowania płuczek o stabilnych właściwościach reologicznych. Przeprowadzone badania wykazały, że opracowane płuczki inwersyjne są odporne na działanie wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia. Odporność temperaturową badanych płuczek w warunkach statycznych określono na około 200°C. Natomiast w warunkach dynamicznych płuczki inwersyjne zachowały stabilne parametry reologiczne do temperatury 160°C. Płuczki inwersyjne mogą stanowić właściwy wybór dla większości zastosowań HTHP pod warunkiem nienaruszania przepisów ochrony środowiska.

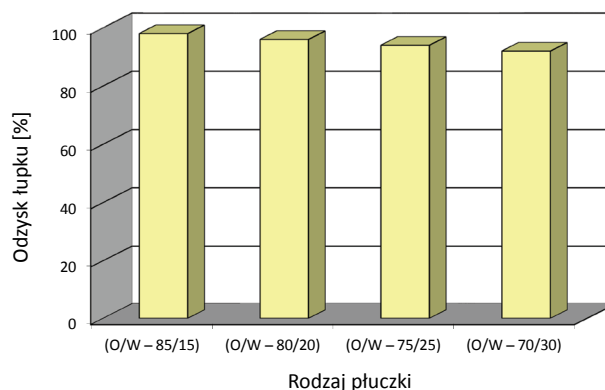
### Określenie oddziaływania opracowanej płuczki na właściwości skał ilasto-łupkowych

Badanie dyspersji skał ilasto-łupkowych to jedna z podstawowych metod oceny skuteczności inhibitującego działania płuczek wiertniczych na skały ilasto-łupkowe. Otrzymane na podstawie tej metody wyniki badań w postaci odzyskiwanych próbek skał pozwalają dokonać oceny właściwości inhibitacyjnych danej płuczki wyrażonej wielkością uszkodzenia skały po jej oddziaływaniu [12, 17].

Płuczki inwersyjne charakteryzują się wysoką odpornością temperaturową i mogą być stosowane do wiercenia otworów w warunkach HTHP, w związku z czym sprawdzono także ich właściwości inhibitacyjne w stosunku do skał ilasto-łupkowych reprezentowanych przez łupkę miocenijską. Badania dyspersji prowadzono, poddając próbki skał ilasto-łupkowych dyspergowaniu w środowisku płuczek inwersyjnych w temperaturze 120°C przez 16 godzin.

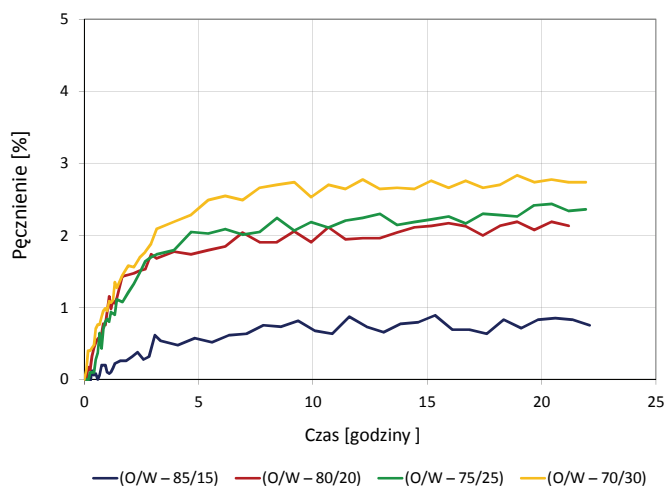
Przeprowadzona analiza dyspersyjna opracowanych płuczek wykazała ich bardzo dobre właściwości inhibitacyjne w stosunku do łupki miocenijskiej pochodzącej z Przedgórze Karpat. Otrzymane wyniki odzysku dyspergowanego łupki miocenijskiej w temperaturze 120°C wynosiły od 92 do 98% (rysunek 9). W płuczce o stosunku fazy olejowej do wodnej 85:15 odzysk łupki miocenijskiej był najwyższy i osiągnął około 98%. Zwiększenie udziału fazy wodnej

w płuczce do 20% spowodowało niewielkie obniżenie odzysku łupki miocenijskiej – do 96%. Natomiast najmniejsze ilości łupki miocenijskiej odzyskano po dyspergowaniu go w płuczce inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 70:30, wynosiły one około 92% (rysunek 9).



Rys. 9. Wartości odzysku łupki miocenijskiej dyspergowanego w płuczce inwersyjnej w zależności od stosunku fazy olejowej do wodnej w temperaturze 120°C

Kolejnym testem, za pomocą którego możemy określić wpływ opracowanej płuczki inwersyjnej na przewiercane skały ilasto-łupkowe, jest badanie pęcznienia.



Rys. 10. Zmiany objętości liniowej próbek łupku miocenińskiego pod wpływem płuczek inwersyjnych w zależności od stosunku fazy olejowej do wodnej

Pęcznienie skał ilasto-łupkowych określane jest jako zdolność do adsorbowania wody z równoczesnym zwiększaniem ich objętości, wyrażone współczynnikiem pęcznienia  $\Delta V$ . Jest ono rezultatem złożonego oddziaływania między substancją ilastą a wodą, która tworzy warstwy monomolekularne na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach kryształów oraz wypełnia wolne przestrzenie między nimi. Przedstawione badania pęcznienia łupku miocenińskiego wykonane zostały w celu określenia zdolności ograniczania przyrostu jego objętości przez płuczki inwersyjne różniące się między sobą stosunkiem fazy olejowej do wodnej.

### Ocena właściwości smarnych płuczki inwersyjnej

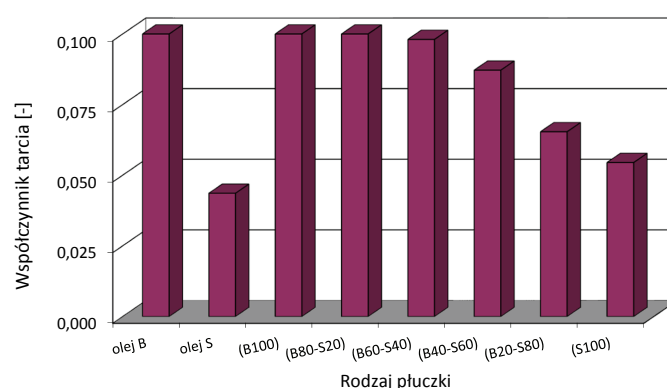
Jedną z wielu zalet płuczek inwersyjnych są ich doskonałe właściwości smarne, wynikające głównie z zastosowania oleju jako ośrodka dyspersyjnego. Płuczki inwersyjne mogą różnić się między sobą właściwościami smarnymi, w zależności od rodzaju zastosowanego oleju, emulgatorów, stosunku fazy olejowej do wodnej i rodzaju użytej solanki. Ośrodkiem dyspersyjnym płuczek inwersyjnych jest olej, który stanowi od 60 do 90% objętości płuczki, ponadto w składzie płuczek znajdują się również emulgatory, które mogą również spełniać zadania środków smarnych, a tym samym – mogą wpływać na zmniejszenie sił tarcia występujących podczas prac związanych z procesem głębinienia otworu [14]. Głównym celem badania było określenie właściwości smarnych płuczek inwersyjnych w zależności od składu fazy olejowej. Określano je poprzez pomiar współczynnika tarcia. Wyniki badań przedstawiono graficznie na rysunku 11.

Badania nad określeniem właściwości smarnych płuczek inwersyjnych rozpoczęto od sprawdzenia współczynnika tarcia dla podstawowego składnika płuczek stanowiących ośro-

dek dyspersyjny, czyli oleju B i oleju S. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono znaczne różnice w właściwościach smarnych zastosowanych olejów. Określony współczynnik tarcia dla oleju B wyniósł 0,1, natomiast w przypadku oleju S był o ponad połowę niższy i osiągnął wartość 0,04 (rysunek 11). Bardzo dobre właściwości smarne oleju S

Badania przeprowadzono dla płuczki o stosunkach fazy olejowej do wodnej 85:15, 80:20, 75:25 i 70:30. Wyniki badań przedstawiono graficznie na rysunku 10. Spośród przebadanych płuczek największym stopniem spęcznienia (2,71%) wykazała się próbka łupku miocenińskiego poddana oddziaływaniu płuczki inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 70:30 (rysunek 10). W płuczce inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 75:25 hydrofilność łupku miocenińskiego uległa niewielkiemu obniżeniu, konsekwencją czego był mniejszy przyrost jego objętości – o 2,28%. Kolejna zmiana stosunku fazy olejowej do wodnej w płuczce inwersyjnej (z 75:25 do 80:20) spowodowała dalsze niewielkie obniżenie przyrostu objętości badanej próbki łupku miocenińskiego o 2,09% (rysunek 10). Natomiast w najmniejszym stopniu swoją objętość zwiększyła próbka łupku miocenińskiego w środowisku płuczki inwersyjnej zawierającej 15% fazy wodnej, dla której spęcznienie wynosiło około 0,76% (rysunek 10). Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, iż płuczki charakteryzujące się wyższą stabilnością elektryczną ES w mniejszym stopniu oddziałują na próbkę skały ilasto-łupkowej, jak również, że zwiększenie zawartości fazy wodnej w płuczce może powodować wzrost pęcznienia skał ilastych.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań dyspersji oraz przyrostu objętości skał ilasto-łupkowych należy stwierdzić, że opracowane płuczki inwersyjne charakteryzują się wysokim stopniem inhibitowania i mogą być stosowane do przewiercania skał ilasto-łupkowych.



Rys. 11. Wartość współczynnika tarcia płuczek inwersyjnych w zależności od składu fazy olejowej

dek dyspersyjny, czyli oleju B i oleju S. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono znaczne różnice w właściwościach smarnych zastosowanych olejów. Określony współczynnik tarcia dla oleju B wyniósł 0,1, natomiast w przypadku oleju S był o ponad połowę niższy i osiągnął wartość 0,04 (rysunek 11). Bardzo dobre właściwości smarne oleju S

wynikają głównie z jego składu i znacznie wyższych właściwości reologicznych. Grubość filmu olejowego wytworzonego na metalowych częściach jest zależna od lepkości oleju. Olej o większej lepkości może tworzyć lepszy efekt smarowania narzędzi wiertniczych. Z drugiej strony większa lepkość oleju przy wyższych siłach docisku może powodować znaczny wzrost energii cieplnej prowadzącej do podwyższenia temperatury na powierzchniach metalowych, które mogą prowadzić do uszkodzenia elementu.

Następnie przeprowadzono badania współczynnika tarcia dla płuczek inwersyjnych sporządzonych na osnowie oleju B i oleju S, o różnym stosunku mieszania. Płuczka inwersyjna, której ośrodek dyspersyjny stanowiła mieszanina

olejów B i S o stosunku mieszania 80 do 20, charakteryzowała się współczynnikiem tarcia 0,1. Zwiększenie udziału oleju S w składzie płuczki inwersyjnej do 60% spowodowało obniżenie współczynnika tarcia do 0,09. Natomiast płuczka zawierająca 80% oleju S w fazie olejowej płuczki inwersyjnej obniżyła współczynnik tarcia do 0,06. Najlepsze właściwości smarne dla płuczki inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 80 do 20 zanotowano dla płuczki sporządzonej na osnowie oleju S, współczynnik tarcia wyniósł 0,05 (rysunek 11).

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że opracowana płuczka inwersyjna charakteryzuje się dobrymi właściwościami smarnymi i nie wymaga dodatku środków smarnych.

### Badania wpływu wytypowanych płuczek inwersyjnych na przepuszczalność skał zbiornikowych

Obniżenie współczynnika przepuszczalności skał zbiornikowych może być zdefiniowane jako proces, który prowadzi do zmniejszenia przepływu ropy naftowej lub gazu ze złoża do otworu. Utrata przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyotworowej jest funkcją wielu czynników technologicznych i fizykochemicznych, które mogą występować w czasie dowiercania i udostępniania złoża, a także czynników geologiczno-złożowych – charakterystycznych dla określonego poziomu perspektywicznego. Pierwszym rodzajem prac, podczas których może dojść do uszkodzenia naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych jest etap wiercenia otworu, w trakcie którego dochodzi do kontaktu płuczki wiertniczej ze skałą zbiornikową. Z dotychczasowych badań wynika, że największy wpływ na zjawisko kolmatacji skał zbiornikowych mają właściwości płuczki wiertniczej, czas jej kontaktu ze skałą zbiornikową oraz właściwości samej skały zbiornikowej [13, 15].

Zmiany współczynnika przepuszczalności skał zbiornikowych wywołują wszystkie ciecze wiertnicze kontaktujące się zarówno w procesie dowiercania horyzontów produkcyjnych, jak i podczas prowadzonych prac przygotowujących odwierty do eksploatacji. Dzieje się to na skutek kolmatacji strefy przyodwiertowej, której zasięg zależy od głębokości wnikania filtratu i fazy stałej z płuczki oraz właściwości samej skały. Również po długotrwałym przepływie płynu złożowego z poziomu produktywnego może nastąpić samoczynne pogorszenie współczynnika przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej, które powodowane jest najczęściej wytrąceniem się parafiny, asfaltów, powstawaniem emulsji i procesem kolmatacji w środowisku porowatym. Przyczyniają się do tego zjawiska molekularno-powierzchniowe występujące na granicy rozdziału faz, które w dużej mierze oddziałują na warunki przepływu płynów złożowych w skale zbiornikowej [15].

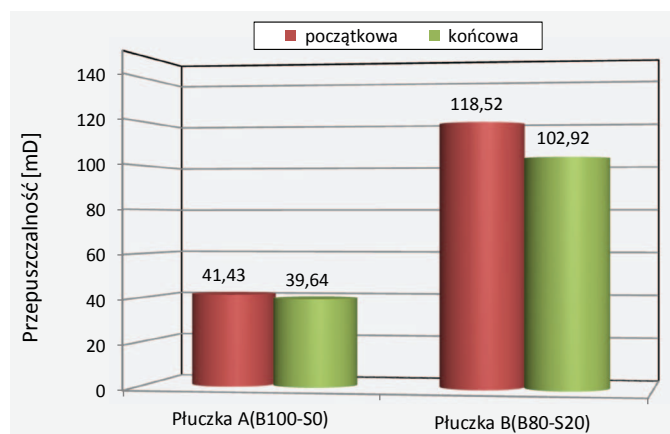
Badania współczynnika przepuszczalności skały zbiornikowej przeprowadzono na rdzeniach reprezentowanych przez piaskowiec szydlowiecki. Wyniki badań zmian przepuszczalności próbek skał zbiornikowych przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Do określenia wpływu opracowanych płuczek inwersyjnych na przepuszczalność skał zbiornikowych wytypowano płuczki o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20, różniące się między sobą składem ośrodka dyspersyjnego i parametrami reologiczno-strukturalnymi. Badania przeprowadzono na próbkach piaskowca szydlowieckiego o współczynniku przepuszczalności początkowej od 41,43 do 118,50 mD w temperaturze 120°C i przy ciśnieniu 0,7 MPa.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników (rysunek 12) można zauważyć, że badane płuczki, w zależności od dodatku oleju S do płuczki inwersyjnej, mogą w odmienny sposób wpływać na wielkość uszkodzenia przepuszczalności skał strefy przyodwiertowej. Największą wartość współczynnika przepuszczalności zwrotnej dla piaskowca szydlowieckiego uzyskano po oddziaływaniu płuczką na osnowie oleju B (płuczka A). Pomiar zmian przewodności hydraulicznej dla gazu wykazały, że badana płuczka przy ciśnieniu różnicowym 0,7 MPa spowodowała niewielkie uszkodzenie przepuszczalności skały zbiornikowej. Współczynnik przepuszczalności po oddziaływaniu płuczki zmniejszył się z 41,43 do 39,64 mD (rysunek 12). Obliczona utrata przewodności hydraulicznej piaskowca dla gazu wynosiła 4,32%. Niewielkie zmniejszenie przewodności próbki wskazuje, że filtrat z płuczki wnikały w pory skały zbiornikowej nie powoduje trwałego uszkodzenia przepuszczalności, a granulacja blokatora M25, obecnego w składzie płuczki w ilości 25%, jest odpowiednio dobrana do wielkości porów piaskowca.

Poprzez zastosowanie jako ośrodka dyspersyjnego płuczki inwersyjnej mieszaniny oleju B z olejem S w stosunku 80:20 uzyskano zwiększenie właściwości reologiczno-struk-



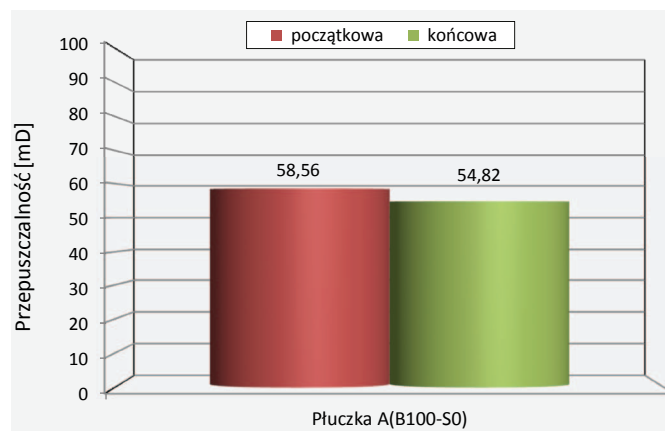
turalnych płuczki, zmniejszenie filtracji statycznej płuczki przez próbkę z 0,9 do 0,5 cm<sup>3</sup>/30 min oraz zwiększenie stabilności elektrycznej płuczki inwersyjnej do 720 V. Badanie przepuszczalności przeprowadzono na piaskowcu o współczynnika przepuszczalności początkowej 118,52 mD. W wyniku kontaktu płuczki ze skałą zbiornikową odnotowano zmniejszenie przewodności próbki skały zbiornikowej do 102,92 mD, co skutkowało utratą przepuszczalności próbki o 13,16% (rysunek 12).



Rys. 12. Wpływ rodzaju płuczki inwersyjnej na zmianę współczynnika przepuszczalności piaskowca szydłowieckiego dla gazu

Na rdzeniu piaskowca szydłowieckiego wykonano dodatkowo badanie zmian przepuszczalności dla ropy po oddziaływaniu wybranej płuczki inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20. Przeprowadzone pomiary współczynnika przepuszczalności dla przepływu ropy przez rdzeń piaskowca szydłowieckiego o przepuszczalności początkowej 58,56 mD wykazały, że w wyniku oddziaływania płuczki inwersyjnej na osnowie oleju B (płuczka A) przewodność

próbki skały zbiornikowej zmniejszyła się do 54,82 mD (rysunek 13). Wskaźnik utraty przewodności hydraulicznej obniżył się o 6,4% w stosunku do przepuszczalności początkowej skały zbiornikowej.



Rys. 13. Wpływ płuczki inwersyjnej o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20 na zmiany współczynnika przepuszczalności piaskowca szydłowieckiego dla ropy

W oparciu o otrzymane wyniki badania współczynnika przepuszczalności dla gazu, przeprowadzone na próbkach piaskowca szydłowieckiego w temperaturze 120°C, można stwierdzić, że opracowana płuczka inwersyjna na osnowie oleju B o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20 może być stosowana do dowiercania złóż gazu ziemnego, gdyż w niewielkim stopniu wpływa na zmniejszenie przewodności skał zbiornikowych. Wskaźnik utraty przepuszczalności wynosił około 4%. Przeprowadzone pomiary współczynnika przepuszczalności dla ropy wykazały, że ten sam rodzaj płuczki może być również stosowany do dowiercania złóż ropy naftowej. Utrata przewodności dla ropy po oddziaływaniu płuczki wynosiła 6,4%.

## Wnioski

- Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły wytypowanie substancji do modyfikacji parametrów reologiczno-strukturalnych płuczek inwersyjnych. Przy udziale tego środka możliwa jest regulacja granicy płynięcia płuczki w zakresie od 5,7 do 37,8 Pa oraz lepkości plastycznej płuczki od 13 do 86 mPa·s, co jest niezmiernie istotne podczas dostosowywania właściwości płuczek inwersyjnych do wiercenia otworów w warunkach HTHP.
- Na podstawie przeprowadzonych badań wytypowano środek hydrofobizujący PSPH2 do płuczek obciążonych, zawierających znaczne ilości fazy stałej, który przy odpowiednim dawkowaniu powinien zapewnić utrzymanie wysokiej stabilności elektrycznej płuczek inwersyjnych.
- Przeprowadzone badania płuczek inwersyjnych w warunkach HTHP wykazują, że opracowane płuczki są odporne na działanie wysokiej temperatury i wysokiego ciśnienia. Odporność temperaturową badanych płuczek w warunkach statycznych określono na około 200°C. Natomiast w warunkach dynamicznych płuczki inwersyjne zachowały stabilne parametry reologiczne w badanym zakresie temperaturowym do 160°C. Płuczki inwersyjne mogą stanowić właściwy wybór dla większości zastosowań HTHP pod warunkiem nienaruszania przepisów ochrony środowiska.
- Przeprowadzone badania współczynnika tarcia płuczek inwersyjnych wykazały, że olej S, stosowany w składzie płuczki inwersyjnej jako modyfikator parametrów reologiczno-strukturalnych, wpływa także na poprawę jej

- właściwości smarnych. Poprzez zastosowanie w składzie płuczek inwersyjnych oleju S możliwe jest obniżenie ich współczynnika tarcia nawet do 0,06.
5. Na podstawie pomiarów pęcznienia skał ilasto-łupkowych reprezentowanych przez łupek mioceński stwierdzono, że średnie wartości spęcznienia łupku mioceńskiego w wyniku oddziaływania płuczek inwersyjnych wynosiły  $0,76 \div 2,71\%$ , w zależności od stosunku fazy olejowej do wodnej płuczki inwersyjnej.
  6. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań dyspersji oraz przyrostu objętości skał ilasto-łupkowych należy stwierdzić, że opracowane płuczki inwersyjne charakteryzują się wysokim stopniem inhibitowania i mogą być stosowane do przewiercania skał ilasto-łupkowych.
  7. W oparciu o otrzymane wyniki badania współczynnika przepuszczalności dla gazu, przeprowadzone na próbkach piaskowca szydłowieckiego w temperaturze  $120^{\circ}\text{C}$ , można stwierdzić, że opracowana płuczka inwersyjna na osnowie oleju B, o stosunku fazy olejowej do wodnej 80:20, może być stosowana do dowiercania złóż gazu ziemnego, gdyż w niewielkim stopniu wpływa na zmniejszenie przewodności skał zbiornikowych (wskaźnik utraty przepuszczalności wynosił około 4%). Przeprowadzone pomiary współczynnika przepuszczalności dla ropy wykazały, że ten sam rodzaj płuczki może być również stosowany do dowiercania złóż ropy naftowej. Utrata przewodności dla ropy po oddziaływaniu płuczki wynosiła 6,4%.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2016, nr 6, s. 403–412, DOI: 10.18668/NG.2016.06.03

Artykuł nadesłano do Redakcji 20.11.2015 r. Zatwierdzono do druku 10.03.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza właściwości technologicznych płuczki inwersyjnej w warunkach HTHP* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0036/KW/15, nr archiwalny: DK-4100-36/15.

## Literatura

- [1] Alford P., Anderson D., Bishop M., Goldwood D., Stouffer C., Watson E., Karonka M., Moore R.: *Novel oil based mud additive decreases HTHP fluid loss and enhances stability*. AADE-14-FTCE-18, 2014.
- [2] Amani M., Al-Jubouri M., Shadravan A.: *Comparative study of using oil-based mud versus water-based mud in HPHT fields*. Advances in Petroleum Exploration and Development 2012, vol. 4, nr 2, s. 18–27.
- [3] Amani M.: *The rheological properties of oil-based mud under high pressure and high temperature conditions*. Advances in Petroleum Exploration and Development 2012, vol. 3, nr 2, s. 21–30.
- [4] Błaż S. i in.: *Badania laboratoryjne nad opracowaniem składu inwersyjnej płuczki wiertniczej odpornej na zmiany pH*. Praca statutowa INiG – PIB, Kraków 2014, nr zlecenia: 29/KW/14, nr archiwalny: DK-4100-29/14, s. 3–64.
- [5] Hermoso J., Martinez-Boza F., Gallegos C.: *Influence of aqueous phase volume fraction, organoclay concentration and pressure on invert-emulsion oil muds rheology*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 2015, vol. 22, s. 341–349.
- [6] Jasiński B.: *Badania nad zastosowaniem emulsji olejowo-wodnych jako cieczy roboczych o obniżonej gęstości*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 1155–1164.
- [7] Jha P. K., Mahto V., Saxena V. K.: *Emulsion based drilling fluids: an overview*. International Journal of ChemTech Research 2014, vol. 6, nr 4, s. 2306–2315.
- [8] Kulkarni S. D., Jamison D. E.: *Determining association of particles and emulsion in invert emulsion drilling fluids: experiments and modeling*. AADE-15-NTCE-16, 2015, s. 1–4.
- [9] Miller M., Kulkarni S. D., King D., Valenziano R.: *Gellant for oil-based drilling fluid behind casing*. AADE-14-FTCE-16, 2014.
- [10] Maghrabi S., Wagle V., Teke K., Kulkarni D., Kulkarni K.: *Low plastic viscosity invert emulsion fluid system for HPHT wells*. AADE-11-NTCE-15, 2011, s. 1–14.
- [11] Shadravan A., Amani M.: *HPHT 101-what petroleum engineers and geoscientists should know about high pressure high temperature wells environment*. Energy Science and Technology 2012, vol. 4, nr 2, s. 36–60.
- [12] Uliasz M. i in.: *Dobór środków chemicznych do sporządzania płuczek na osnowie oleju*. Dokumentacja INiG – PIB, Kraków–Krosno 2001, s. 3–28.
- [13] Uliasz M. i in.: *Opracowanie cieczy zabiegowej dla złoża Przemysł, horyzont I*. Dokumentacja INiG – PIB, Kraków 2013, nr zlecenia: 776/KW, nr archiwalny: DK 4100-116/13, s. 21–35.
- [14] Uliasz M. i zespół: *Badania laboratoryjne nad doбором środków poprawiających właściwości smarne płuczki wiertniczej krzemianowej*. Dokumentacja INiG – PIB, Kraków 2008, nr zlecenia: 24/KW, s. 3–35.
- [15] Uliasz M., Herman Z.: *Wymagane parametry cieczy roboczych dla ochrony pierwotnych właściwości skał zbiornikowych*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2008, s. 753–763.
- [16] Wenjuna S., Shixiana T., Fana F., Weimina Y., Zhitaoa Z.: *Research on the Drilling Fluid Technology for High Temperature over  $240^{\circ}\text{C}$* . Procedia Engineering 2014, vol. 73, s. 218–229.
- [17] Zima G.: *Nowy rodzaj płuczki wiertniczej do zastosowania w warunkach HTHP*. Nafta-Gaz 2015, nr 8, s. 556–564.



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](mailto:slawomir.blaz@inig.pl)