

Płuczka wiertnicza na osnowie polimerów syntetycznych z dodatkiem nanomateriałów dostosowana do warunków otworowych

Drilling mud based on synthetic polymers with the addition of nanomaterials adapted to borehole conditions

Grzegorz Zima, Bartłomiej Jasiński, Małgorzata Uliasz, Sławomir Błaż

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem polimerów syntetycznych zbudowanych z merów winyloamidowych, winylosulfonowych, akrylosulfonowych lub bezwodnika maleinowego do regulowania filtracji płuczek wiertniczych. Płuczki te zawierały w swoim składzie koloid ochronny typu skrobiowego, biopolimer, nanokrzemionkę hydrofobową dyspergowaną za pomocą sonifikatora w wodnym roztworze środków powierzchniowo czynnych oraz jonowy inhibitor hydratacji skał (KCl) i blokator węglanowy celem wytworzenia osadu filtracyjnego. Na podstawie przeprowadzonych badań z wykorzystaniem nowych środków syntetycznych dokonano ich doboru do regulowania filtracji oraz parametrów reologicznych płuczek wiertniczych w różnych warunkach geologicznych. Badania przeprowadzono dla płuczek o różnym stopniu zmineralizowania, przy różnej zawartości fazy stałej. Wykonano również badania właściwości smarnych i inhibicyjnych płuczek. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano składy płuczek charakteryzujące się niską filtracją w warunkach HPHT. Przeprowadzono pomiary statycznej filtracji HPHT na standardowych sączkach do pomiaru filtracji oraz w temperaturach 60°C i 120°C. Filtrację przy użyciu aparatu Grace M2200 HPHT wykonano na rdzeniach o porowatości 20 µm. W celu odtworzenia warunków otworowych do płuczek dodawano zwierciny (zmielony lupek mioceński) i skażenia chemiczne w postaci chlorków wapnia i magnezu. Wyniki pomiarów na aparacie Grace M2200 HPHT podane w artykule zostały przeliczone na podstawie stosunku powierzchni filtracji w celu porównania ze statyczną filtracją HPHT. Uzyskane wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie w warunkach przemysłowych podczas głębokich wierceń oraz pozyskiwania energii geotermalnej.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, nanokrzemionka, nanomateriały, filtracja, polimery syntetyczne.

ABSTRACT: The article presents the results of research on the use of synthetic polymers made of vinylamide, vinylsulfonic, acryl-sulfonic or maleic anhydride to regulate the filtration of drilling fluids. These muds contained a starch-type colloid, a biopolymer, hydrophobic nanosilica dispersed using a sonificator in an aqueous solution of surfactants, as well as an ionic rock hydration inhibitor (KCl) and a carbonate blocker to produce a filter cake. Based on the research carried out with the use of new synthetic agents, their selection was made for regulating the filtration and rheological parameters of drilling fluids under various geological conditions. The tests were carried out for muds of various mineralization levels, with different solids content. The lubricating and inhibitory properties of the muds were also tested. On the basis of the obtained results, the drilling fluids compositions with low HPHT filtration were proposed. Static HPHT filtration measurements were performed on standard filters for filtration measurement and at a temperature of 60 and 120°C. Filtration using a Grace M2200 HPHT apparatus was performed on cores with a porosity of 20 µm. In order to restore the borehole conditions, drill cuttings (ground Miocene shale) and chemical contamination in the form of calcium and magnesium chlorides were added to the muds. The results of the measurements made using the Grace M2200 HPHT apparatus given in the article were converted from the filtration area ratio for comparison with the static HPHT filtration. The obtained research results can be used in industrial conditions during deep drilling and the acquisition of geothermal energy.

Key words: mud, nanosilica, nanomaterials, filtration, synthetic polymers.

Wstęp

W wyniku kontaktu skały z filtrem płuczki może nastąpić zmniejszenie wytrzymałości skały ilastej, zwiększenie jej objętości i przyspieszenie erozji ściany otworu. W celu

zapobiegania tym zjawiskom stosuje się głównie wodnodyspersyjne płuczki zawierające inhibitory hydratacji skał. W wyniku użycia takich płuczek na ścianie otworu powstaje osad filtracyjny składający się na ogół z karboksymetylocelulozy, skrobi, innych polimerów, np. PHPA, barytu i zwiercin. Ograniczanie

Autor do korespondencji: Grzegorz Zima, e-mail: grzegorz.zima@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 29.12.2022 r. Zatwierdzono do druku: 10.03.2023 r.

filtracji fazy wodnej z płuczki poprzez tworzenie osadu filtracyjnego nie zapewnia jednak pełnej ochrony ścian otworu. Powszechnie dodawane materiały do płuczek wiertniczych w porównaniu ze średnią wielkością porów przewiercanych skał łupkowych, tj. od 0,01 mikrona do 0,03 mikrona, charakteryzują się zbyt dużymi rozmiarami, przez co nie zawsze jest możliwe utworzenie szczelnego osadu filtracyjnego. Zgodnie z dostępnymi danymi literaturowymi zmniejszenie promienia inwazji płuczki w przewiercane skały łupkowe może być osiągnięte poprzez zastosowanie w składach płuczek wiertniczych nanomateriałów (np. nanocząstek krzemionki) o odpowiednio dobranej wielkości. Średnie rozmiary nanocząstek powinny być dobrane w taki sposób, aby mogły doszczelniać osad filtracyjny. Zmniejszanie zasięgu wnikania płuczki poprzez zastosowanie cząsteczek nanokrzemionki może stanowić skuteczne rozwiązanie problemów z utrzymywaniem stabilności otworu. W regulowaniu filtracji płuczek wiertniczych znajdują zastosowanie polimery akrylowe o średniej masie cząsteczkowej oraz polimery (kopolimery) produkowane na drodze polimeryzacji monomerów winyloamidowych, winylosulfonowych, akrylosulfonowych lub bezwodnika maleinowego. Odporność termiczna tych środków często przekracza według danych literaturowych 200°C. Przeprowadzenie badań polimerów syntetycznych w połączeniu z nanokrzemionką hydrofobową umożliwiło ich dobór do regulowania filtracji płuczek wiertniczych w różnych warunkach geologicznych. Wyniki uzyskane w pracy wskazują na korzystny wpływ hydrofobowej nanokrzemionki w połączeniu ze środkami powierzchniowo czynnymi na właściwości wodnodispersyjnych płuczek wiertniczych. W artykule zaproponowano składy płuczek charakteryzujące się niską filtracją zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w warunkach HPHT. Zastosowanie nanokrzemionki i polimerów syntetycznych jest skutecznym sposobem regulowania filtracji i ograniczania zasięgu wnikania płuczki wiertniczej.

Zastosowanie nanomateriałów do regulowania filtracji płuczek wiertniczych

W warunkach podwyższonej temperatury dochodzi do obniżenia wartości parametrów reologicznych i wzrostu filtracji płuczki wiertniczej. Jest to skutkiem zmian fizycznych zachodzących w płuczce pod wpływem temperatury lub degradacji polimerów regulujących parametry reologiczne i filtrację (Bielewicz i Bortel, 2000; Janota et al., 2002; Bielewicz et al., 2003a, 2003b; Bortel et al., 2003).

Rozwój nanotechnologii przyniósł wiele innowacji w wielu aspektach przemysłu naftowego i gazowego. Nanomateriały mogą być materiałami naturalnymi lub syntetycznymi, których co najmniej jeden wymiar wynosi 1–100 nm (Zamora-Ledezma

et al., 2021, 2022). Materiały te charakteryzują się często dużą powierzchnią właściwą przy małej objętości. Nanomateriały uzyskują wyjątkowe właściwości mechaniczne, chemiczne, termiczne i magnetyczne, dzięki czemu mają lepszą wydajność niż konwencjonalne mikro- i makromateriały. Nanomateriały można również sfunkcjonalizować „na zamówienie” poprzez modyfikacje chemiczne w celu spełnienia określonych wymagań technicznych.

Wiele prac opisanych w literaturze dotyczy regulowania właściwości reologicznych, filtracyjnych i cieplnych płuczek wiertniczych przy użyciu nanocząstek jako dodatków (Agarwal et al., 2011; Friedheim et al., 2012; Jasiński, 2017, 2018; Vryzas i Kelessidis, 2017; Rafati et al., 2018; Hemmat et al., 2020; Cheraghian, 2021; Cheraghian i Afrand, 2021; Farahbod, 2021; Novara et al., 2021; Al-Shargabi et al., 2022). Spreparowanie materiałów w skali nano nadaje im zupełnie inne właściwości fizykochemiczne w porównaniu z ich makroskopowym odpowiednikiem. Nanomateriały wykazują zwiększone przewodnictwo cieplne i elektryczne, lepsze właściwości mechaniczne, dużą powierzchnię właściwą i aktywność przeciwdrobnoustrojową (Torres-Canas et al., 2015; Rafati et al., 2018; Kolahalam et al., 2019; Hemmat et al., 2020; Cheraghian i Afrand, 2021; Magne et al., 2021; Suppan et al., 2021; Zamora-Ledezma et al., 2021). Cechy te często nie występują w materiałach w ich postaci makroskopowej i są ściśle związane z ich rozmiarami i kształtem. Nanocząstki mają zazwyczaj dokładnie określoną geometrię (kule, trójkąty, kwadraty, romby i płytki) i przyjmują postać nanoprętów, nanorurek, nanoarkuszy itp. (González et al., 2014; Kolahalam et al., 2019; Baig et al., 2021). Typowe nanocząstki stosowane do tej pory w składach płuczek wiertniczych obejmują między innymi: nanostruktury węglowe (fulereny, nanorurki węglowe i grafen) (Samsuri i Hamzah, 2011; Kosynkin et al., 2012; Taha i Lee, 2015; Ismail et al., 2016; Liu et al., 2017; Torres-Canas et al., 2017; Ikram et al., 2021; Rafieefar et al., 2021), tlenek miedzi (CuO), tlenek cynku (ZnO), dwutlenek tytanu (TiO₂), tlenek żelaza (Fe₂O₃), dwutlenek krzemu (SiO₂), tlenek glinu (Al₂O₃) (William et al., 2014; Gallardo et al., 2018; Perween et al., 2019; Beg et al., 2020) lub nanocelulozę (Borisov et al., 2015; Xiao i Liu, 2017; Rafati et al., 2018; Hong et al., 2019; Hemmat et al., 2020; Cheraghian, 2021; Cheraghian i Afrand, 2021; Wan et al., 2021; Zhou et al., 2021).

Jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów w nanotechnologii jest dwutlenek krzemu (krzemionka – SiO₂). Jego dostępność oraz specyficzne właściwości przyczyniły się do szerokiego zastosowania. Jest on trwały w wodzie i w podwyższonych temperaturach, a dodatkowo jest dobrym izolatorem. Krzemionka jest chemicznie inerta i ulega reakcjom jedynie z wrzącymi, stężonymi roztworami wodnymi KOH i NaOH, stopionymi Na₂CO₃ i K₂CO₃ oraz fluorowodorem

lub jego wodnymi roztworami. Średnica nanocząstek ditlenku krzemu produkowanego w przemyśle najczęściej zawiera się w przedziale od 5 nm do 1000 nm, a ich powierzchnia właściwa mieści się w przedziale od 545 m²/g do 2,73 m²/g. Głównymi formami nanocząstek krzemionkowych są: strącana amorficzna krzemionka, żele, zole, koloidy oraz krzemionki – płomieniowa i pirogeniczna (Beall et al., 1996; Bielewicz i Bortel, 2000; Cai et al., 2012; Dębińska, 2014, 2015). Częsteczka krzemionki ma postać tetraedru, w którego centrum znajduje się atom krzemu, otoczony czterema atomami tlenu, znajdującymi się w rogach tej struktury geometrycznej (Jankiewicz et al., 2010). Struktury krzemowe charakteryzują się nieregularnym rozłożeniem tetraedrów, co jest przyczyną ich amorficznego charakteru. Powierzchnia nanosfery pokryta jest grupami –OH.

Opracowano kilka złożonych płuczek wiertniczych z dodatkami nanomateriałów mających na celu zapewnienie stabilności otworu w warunkach podwyższonej temperatury, smarowanie świdra oraz ograniczających hydratację łupków. Gallardo et al. (2018) opracowali wodnodispersyjne płuczki wiertnicze przy użyciu nanocząstek krzemionki o rozmiarach 12 nm. Właściwości reologiczne i filtracyjne takich płuczek były porównywalne z ich odpowiednikami sporządzonymi na osnowie oleju. Dodanie nanocząstek krzemionki do składu ich płuczki wpływało na zminimalizowanie przepuszczalności łupków, ograniczenie filtracji oraz poprawiło stabilność ścian otworu. Podobnie Beg et al. (2020) wykazali, że dodanie nanocząstek TiO₂ o rozmiarach 250 nm do wodnodispersyjnych płuczek wiertniczych znacznie poprawia ich stabilność termiczną i właściwości reologiczne. Saffari et al. (2018) opisali płuczki wiertnicze z dodatkiem nanostrukturalnych preparatów na bazie boranów magnezu, cynku, glinu i tytanu, o różnych rozmiarach i kształtach (nanocząstki i nanopęty). Płuczki te charakteryzowały się podwyższoną stabilnością w warunkach HPHT i wykazywały się bardzo dobrymi właściwościami smarnymi. Podobnie Kazemi-Beydokhti i Hajiabadi (2018) wykazali, że dodatek wielościennych nanorurek węglowych w połączeniu z poli(glikolem etylenowym) znacznie poprawił stabilność właściwości reologicznych w badanych wodnodispersyjnych płuczkach wiertniczych oraz przyczynił się do lepszego wynoszenia zwiercin, ograniczenia filtracji i zmniejszenia szkodliwego wpływu płuczek na przepuszczalność skał zbiornikowych.

Hong et al. (2019) opracowali płuczkę wiertniczą z dodatkami płatków MoS₂ o grubości 1–2 nm i różnych średnicach w zakresie od 300 nm do 650 nm. Płuczki te charakteryzowały się zwiększoną przewodnością cieplną i lepszym wynoszeniem zwiercin podczas wiercenia.

Agarwal et al. (2011) oraz Ragab i Noah (2014) za podstawowy cel swojej pracy przyjęli zmniejszenie uszkodzenia naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych poprzez ograniczenie filtracji płuczki wiertniczej z dodatkiem nanomateriałów.

W badaniach zastosowali trzy różne wielkości nanocząstek krzemionki w celu określenia zakresu wielkości nanocząstek, które w największym stopniu przyczyniają się do ograniczenia filtracji płuczki. Do właściwych badań wykorzystali nanocząstki o najlepszych rozmiarach i ustalili zależność między wielkością filtracji i stężenia nanocząstek celem ustalenia stężenia, które zapewnia ograniczenie objętości filtratu przy najniższym koszcie. Okazało się, że optymalna wielkość nanocząstek mieściła się w zakresie 5–15 nm. Optymalne stężenie nanocząstek pod względem ekonomicznym – a jednocześnie skuteczne – wynosiło od 20% do 30% wag.

Sensoy et al. (2009) pokazali w swojej pracy, że nanomateriały zmniejszają przepuszczalność łupku Atoka o 5% do 50%. Nanomateriały przyczyniają się do ograniczenia zaników cieczy wiertniczych, do poprawy stabilności ścian otworu oraz zwiększają przyczepność zaczynu cementowego do rury.

Abdo i Haneef (2010, 2012, 2013) stwierdzili, że zapobieganie utracie obiegu przez płuczki zawierające mikro- i makromateriały LCM (materiały zapobiegające zanikom płuczek) często nie przynosi oczekiwanych rezultatów. Skuteczne uszczelnienie porowatych i przepuszczalnych stref spękanych jest możliwe po zastosowaniu materiałów LCM o rozmiarach mikro i makro w połączeniu z materiałami o rozmiarach nano. Nanocząstki wielofunkcyjne przyczyniają się ponadto do zmniejszenia uszkodzenia formacji.

Badania przeprowadzone przez licznych autorów (Srivatsa i Ziaja, 2011; Sharma et al., 2012; Ragab i Noah, 2014; Contreras et al., 2014a, 2014b; Mahmoud et al., 2016; Ponmani et al., 2016) potwierdzają wysoką skuteczność nanomateriałów w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych oraz zmniejszaniu uszkodzenia naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych. W swoich badaniach zastosowali oni nanokrzemionki o rozmiarach: 5–15 nm, 10–25 nm i 70–95 nm. Płuczki do badań sporządzane były na osnowie biopolimeru XCD z dodatkiem KCl i obciążane barytem. Na podstawie uzyskanych wyników za optymalny rozmiar uznano nanokrzemionkę o rozmiarach 5–15 nm. Najmniejszy materiał (5–15 nm) skutecznie przechodzi pomiędzy większymi cząstkami fazy stałej i materiałów obciążających i blokuje pory w skale. Autorzy stwierdzili, że płuczka nano charakteryzuje się znacznie niższymi wartościami filtracji niż płuczka „non-nano”, a obniżenie filtracji po zastosowaniu dodatku nanokrzemionki wynosi 20–40%.

Zwiększanie stężenia nanocząstek w płuczce wiertniczej powoduje obniżanie filtracji płuczki. Dodatek 10% wag. nanokrzemionki prowadzi do obniżenia filtracji o około 25%, a przy wyższych dodatkach efektywność działania nanokrzemionki się zmniejsza. Przy 40-proc. dodatku nanokrzemionki wartość filtracji stabilizuje się, przy czym za optymalny dodatek ze względów ekonomicznych uznano 20%, ponieważ przy wyższym stężeniu koszt przewyższa korzyści.

W literaturze zagranicznej (Sensoy et al., 2009; Agarwal et al., 2011; Abdo i Haneef, 2012, 2013; El-Diasty i Aly, 2015) jako główne zalety płuczek zawierających nanomateriały wymienia się: zmniejszenie uszkodzenia złoża, korzystny wpływ na zapewnienie płynnej pracy w czasie wiercenia, skuteczność w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych znacznie lepsza niż stosowanych do tego celu polimerów celulozowych, skuteczność przy likwidowaniu zaników płuczki.

Nanoglinki i nanokrzemionka były wykorzystywane również do stabilizowania inwersyjnej emulsji w warunkach HPHT. Chociaż zarówno jeden, jak i drugi nanomateriał może stabilizować emulsję sam w sobie, najlepsze właściwości uzyskuje się, wykorzystując oba te nanomateriały. Granica płynięcia i lepkość emulsji były zależne od składu i hydrofobowego lub hydrofilowego charakteru nanocząstek. Testy w autoklawach w 225°C przez 96 godzin wykazały, że nanocząstki skutecznie stabilizują emulsje, obserwuje się jedynie małe zmiany właściwości reologicznych. Dodatki nanokrzemionki wynosiły w sumie 2–3% (Agarwal et al., 2011).

Często w celu dodatkowego obniżenia filtracji stosuje się oprócz polimerów syntetycznych dodatki nanomateriałów. Celowość połączenia działania polimerów syntetycznych i nanomateriałów potwierdzają liczne dane literaturowe (Arambulo et al., 2015; Akhtarmanesh et al., 2017; Fakoya i Shah, 2018; Elkatanty, 2019). Badania, jakie przeprowadził Elkatanty (2019), dotyczyły wpływu zastosowania skrobi mikronizowanej (1 µm) na właściwości reologiczne i filtrację wodnej płuczki wiertniczej. Stwierdzono, że mikronizowana skrobia miała istotny wpływ na właściwości reologiczne i filtrację płuczek. Wartość lepkości plastycznej płuczki ze skrobią mikronizowaną wzrosła o 158%, podczas gdy granica płynięcia wzrosła o 125% w porównaniu ze skrobią o konwencjonalnej wielkości (60 µm). Lepkość pozorna zwiększyła się o 137% po zastosowaniu skrobi mikronizowanej. Grubość osadu filtracyjnego zmniejszyła się o 63%, podczas gdy filtracja uległa obniżeniu o 52% przy zastosowaniu skrobi 1 µm.

Filtracja statyczna płuczek wiertniczych od dawna jest uznawana za ważny parametr w operacjach wiertniczych. Ponieważ standardowe procedury badań laboratoryjnych uwzględniają tylko warunki statyczne, to właściwości filtracji i osadu w warunkach ciągłej cyrkulacji i dynamicznych warunkach otworu wiertniczego zwykle nie są dobrze określone. Dlatego pomiar filtracji dynamicznej jest szczególnie ważny w celu naśladowania rzeczywistych warunków w otworze.

Badania laboratoryjne

Zastosowane w badaniach polimery PS1, PS2, PS3 według informacji producenta są polimerami zbudowanymi z merów

winyloamidowych, winylosulfonowych, akrylowosulfonowych lub bezwodnika maleinowego. Ich podstawową funkcją w płuczkach wiertniczych jest ograniczanie filtracji w warunkach HPHT. Przy formowaniu osadu filtracyjnego z płuczki środki te przyczepiają się do dodatnio naładowanych krawędzi płytek ilu i zatykają przestrzenie porów w strukturze bentonitu oraz wykazują zdolność wiązania wody i zmniejszania przepuszczalności osadu filtracyjnego. Polimery te stabilizują właściwości reologiczne płuczek i chronią je przed negatywnym wpływem temperatury i skażeń chemicznych. Środki te całkowicie dyspergują w solankach nasyconych i zapewniają bardzo niskie wartości filtracji w temperaturach przekraczających 230°C. Nadają się do zastosowań w płuczkach z dużą zawartością fazy stałej i obciążonych nawet do 2,4 g/ml oraz są odporne na fermentację bakteryjną.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań płuczek wiertniczych sporządzonych na podstawie koloidu typu skrobiowego i biopolimeru zawierających w swoim składzie nanokrzemionkę hydrofobową z dodatkiem poliglikolu. W celu umożliwienia dyspergowania nanokrzemionki hydrofobowej w wodzie zastosowano dwa rodzaje dodatku: 3% poliglikolu i 1% emulgatora lub 1% poliglikolu. Nanokrzemionkę przed dodaniem do płuczki dyspergowano wstępnie przy użyciu sonifikatora w mieszaninie wody i poliglikolu przez 20 minut, a następnie tak przygotowaną zawiesinę wprowadzano do płuczek. W składach płuczek zastosowano również dodatek wybranych do badań trzech polimerów syntetycznych celem regulowania filtracji w warunkach HPHT. Badane środki dodawano do płuczek wiertniczych w ilości 0,5%. Płuczki te zawierały dodatkowo 7% inhibitora jonowego KCl i 7% blokatora węglanowego w celu utworzenia osadu filtracyjnego. Dla badanych płuczek przeprowadzono pomiary ich podstawowych właściwości oraz wykonano pomiary statycznej i dynamicznej filtracji HPHT na standardowych sączkach do pomiaru filtracji. Filtrację HPHT zmierzono na prasie filtracyjnej Fann HPHT w temperaturze 60°C i 120°C, natomiast dynamiczną – w temperaturze 120°C na aparacie Grace M2200 na rdzeniach o porowatości 20 µm. Dla porównania wykonano badania dla płuczek bez dodatku polimerów syntetycznych z dodatkiem nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w poliglikolu. Na tak sporządzonych płuczkach wykonano cykl badań, w którym dodawano do nich zwierzynę (zmielony łupek mioceński) w ilości 10% oraz skażenia chemiczne: 5% CaCl₂ i 1% MgCl₂. Wartość filtracji na rdzeniu umieszczona na wykresie (rysunek 2) została podzielona przez współczynnik równy 0,87, który wynika ze stosunku powierzchni filtracji w obu metodach.

Na płuczkach na podstawie koloidów skrobiowych z dodatkiem wybranych trzech polimerów syntetycznych (PS1, PS2, PS3) i płuczce bez ich dodatku przeprowadzono badania dyspersji skały ilastej w celu określenia i porównania ich

właściwości inhibicyjnych oraz badania właściwości smarnych przez pomiar współczynnika tarcia na kontakcie metal–metal w środowisku płuczek.

Badania laboratoryjne płuczek wiertniczych z dodatkiem nanomateriałów i polimerów syntetycznych do regulowania filtracji

Zebrane w formie tabel wyniki pomiarów właściwości płuczek oraz przedstawione w formie wykresów wyniki pomiarów filtracji wykazały, że zarówno dodatek nanokrzemionki hydrofobowej, jak i polimerów syntetycznych PS1, PS2 i PS3

korzystnie wpływa na ograniczenie filtracji płuczek. Wyniki badań płuczek z dodatkiem 10% zwiercin i chlorków wapnia i magnezu, opisanych w metodyce, zebrano w tabelach 1–8. Wyniki przeprowadzonych pomiarów filtracji (rysunki 1 i 2) oraz pomiary właściwości smarnych (rysunek 3) i dyspersji łupku mioceńskiego (rysunek 4) w środowisku badanych płuczek zestawiono w tabelach i przedstawiono na wykresach słupkowych.

Pomiary współczynnika tarcia na kontakcie metal–metal (tabela 8) wykazały wpływ dodatku nanokrzemionki dyspergowanej w poliglikolu na obniżenie współczynnika tarcia. Najwyższe wartości współczynnika tarcia uzyskano dla płuczki bez dodatku nanokrzemionki.

Tabela 1. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego bez dodatku polimeru do regulowania filtracji z dodatkiem nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 3% poliglikolu i 1% emulgatora

Table 1. Properties of starch colloid-based muds without the addition of a polymer to regulate filtration with the addition of hydrophobic nanosilica dispersed in 3% polyglycol and 1% emulsifier

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
1	Biocyd	0,1	1080	25	46,0	17,7	4,0	6,1	5,0	8,7
	Środek skrobiowy	3,0								
	XCD	0,3								
	Poliglikol	3,0								
	Emulgator	1,0								
	Krzemionka hydrofobowa	1,0								
	KCl	7,0								
	Blokator węglanowy	7,0								
2	Płuczka 1 + zwierciny + NaOH	10,0	1140	28	46,5	14,4	3,1	4,9	2,8	9,2
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	36	60,0	23,0	1,8	3,3	2,2	9,0
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	40	63,0	22,1	1,6	3,0	2,0	8,9

Tabela 2. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS1 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 3% poliglikolu i 1% emulgatora

Table 2. Properties starch colloid-based muds with the addition of a PS1 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 3% polyglycol and 1% emulsifier

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
1	Biocyd	0,1	1080	27	48,0	20,1	4,4	7,4	3,8	8,7
	Środek skrobiowy	3,0								
	XCD	0,3								
	PS1	0,5								
	Poliglikol	3,0								
	Emulgator	1,0								
	Krzemionka hydrofobowa	1,0								
	KCl	7,0								
Blokator węglanowy	7,0									

cd. Tabela 2/cont. Table 2

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s		I	II		
2	Płuczka 1 + zwierzyny + NaOH 10,0	1140	34	54,0	19,2	4,4	6,7	1,6	9,0
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH 5,0	1190	39	56,5	16,8	2,4	3,4	1,0	9,0
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH 1,0	1190	40	57,0	16,3	2,2	4,1	1,2	8,9

Tabela 3. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS2 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 3% poliglikolu i 1% emulgatora

Table 3. Properties of starch colloid-based muds with the addition of a PS2 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 3% polyglycol and 1% emulsifier

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s		I	II		
1	Biocyd	0,1	1080	27	18,7	4,4	6,7	5,8	8,5
	Środek skrobiowy	3,0							
	XCD	0,3							
	PS2	0,5							
	Poliglikol	3,0							
	Emulgator	1,0							
	Krzemionka hydrofobowa	1,0							
	KCl	7,0							
Blokator węglanowy	7,0								
2	Płuczka 1 + zwierzyny + NaOH 10,0	1140	31	52,5	20,6	4,9	6,4	2,0	9,1
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH 5,0	1190	38	56,5	17,8	2,8	4,5	1,6	9,0
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH 1,0	1190	40	59,0	18,2	2,9	3,7	1,2	9,0

Tabela 4. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS3 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 3% poliglikolu i 1% emulgatora

Table 4. Properties of starch colloid-based muds with the addition of a PS3 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 3% polyglycol and 1% emulsifier

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s		I	II		
1	Biocyd	0,1	1080	25	15,4	3,3	5,3	6,2	8,4
	Środek skrobiowy	3,0							
	XCD	0,3							
	PS3	0,5							
	Poliglikol	3,0							
	Emulgator	1,0							
	Krzemionka hydrofobowa	1,0							
	KCl	7,0							
Blokator węglanowy	7,0								

cd. Tabela 4/cont. Table 4

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
2	Płuczka 1 + zwierzyny + NaOH	10,0	1140	29	44	14,4	3,1	4,6	2,2	8,9
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	30	41	10,5	1,3	2,5	1,4	8,9
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	29	40	10,6	1,4	2,1	1,6	9,0

Tabela 5. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego bez dodatku polimeru do regulowania filtracji z dodatkiem nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 1% poliglikolu**Table 5.** Properties of starch colloid-based muds without the addition of a polymer to regulate filtration with the addition of hydrophobic nanosilica dispersed in 1% polyglycol

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
1	Biocyd	0,1	1080	27	47,5	19,7	4,2	4,9	4,8	8,7
	Środek skrobiowy	3,0								
	XCD	0,3								
	Poliglikol	1,0								
	Krzemionka hydrofobowa	1,0								
	KCl	7,0								
Blokator węglanowy	7,0									
2	Płuczka 1 + zwierzyny + NaOH	10,0	1140	32	54,5	21,6	5,0	7,3	3,0	9,1
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	33	51,0	17,3	2,6	5,5	2,6	9,0
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	28	43,0	14,4	2,8	4,5	2,2	9,3

Tabela 6. Właściwości płuczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS1 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 1% poliglikolu**Table 6.** Properties of starch colloid-based muds with the addition of a PS1 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 1% polyglycol

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
1	Biocyd	0,1	1080	33	58,0	24,0	5,4	5,8	3,2	8,7
	Środek skrobiowy	3,0								
	XCD	0,3								
	PS1	0,5								
	Poliglikol	1,0								
	Krzemionka hydrofobowa	1,0								
KCl	7,0									
Blokator węglanowy	7,0									
2	Płuczka 1 + zwierzyny + NaOH	10,0	1140	35	62,5	26,4	5,6	7,8	2,2	9,1

cd. Tabela 6/cont. Table 6

Nr pluczki	Skład pluczki [%]		Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
				η_{pl}	η_s		I	II		
3	Pluczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	36	55,5	18,7	3,1	6,5	2,0	9,0
4	Pluczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	36	54,5	17,8	3,0	5,4	1,8	9,1

Tabela 7. Właściwości pluczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS2 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 1% poliglikolu

Table 7. Properties of starch colloid-based muds with the addition of a PS2 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 1% polyglycol

Nr pluczki	Skład pluczki [%]		Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
				η_{pl}	η_s		I	II		
1	Biocyd Środek skrobiowy XCD PS2 Poliglikol Krzemionka hydrofobowa KCl Blokator węglanowy	0,1 3,0 0,3 0,5 1,0 1,0 7,0 7,0	1080	32	54,0	21,1	4,6	5,4	3,0	8,7
2	Pluczka 1 + zwierciny + NaOH	10,0	1140	32	54,0	21,1	4,6	6,2	1,6	9,1
3	Pluczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	30	47,5	16,8	3,0	5,4	1,8	9,0
4	Pluczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	27	40,5	12,9	2,8	3,8	1,6	9,0

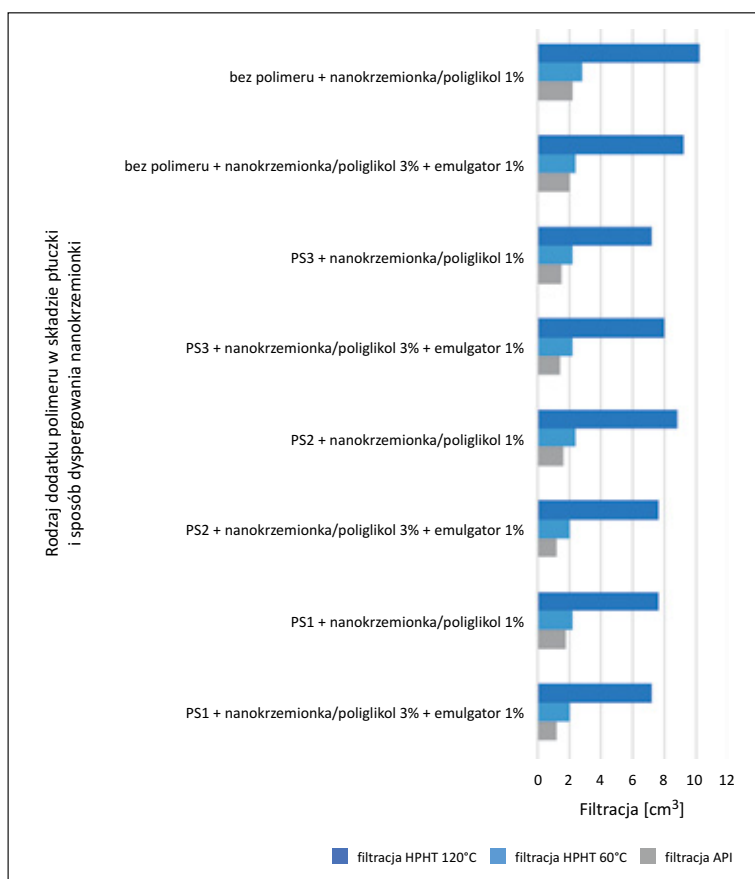
Tabela 8. Właściwości pluczek sporządzonych na osnowie koloidu skrobiowego z dodatkiem polimeru PS3 i nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w 1% poliglikolu

Table 8. Properties of starch colloid-based muds with the addition of a PS3 polymer and hydrophobic nanosilica dispersed in 1% polyglycol

Nr pluczki	Skład pluczki [%]		Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica plynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH
				η_{pl}	η_s		I	II		
1	Biocyd Środek skrobiowy XCD PS3 Poliglikol Krzemionka hydrofobowa KCl Blokator węglanowy	0,1 3,0 0,3 0,5 1,0 1,0 7,0 7,0	1080	30	51,5	20,6	4,1	4,8	3,4	8,7
2	Pluczka 1 + zwierciny + NaOH	10,0	1140	31	49,5	17,7	3,4	4,3	1,8	8,9

cd. Tabela 8/cont. Table 8

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja [cm ³]	pH	
			η_{pl}	η_s		I	II			
3	Płuczka 2 + CaCl ₂ + NaOH	5,0	1190	28	43,0	14,4	3,0	4,3	1,5	9,0
4	Płuczka 3 + MgCl ₂ + NaOH	1,0	1190	25	40,0	13,9	3,0	4,3	1,5	8,9

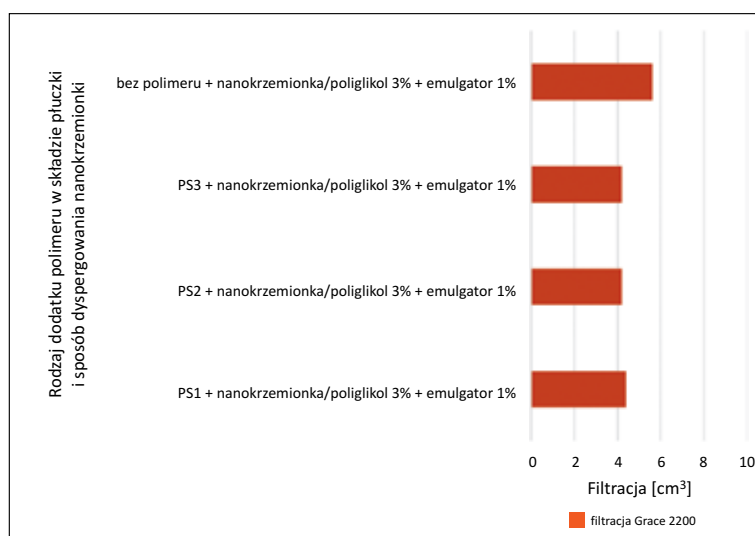


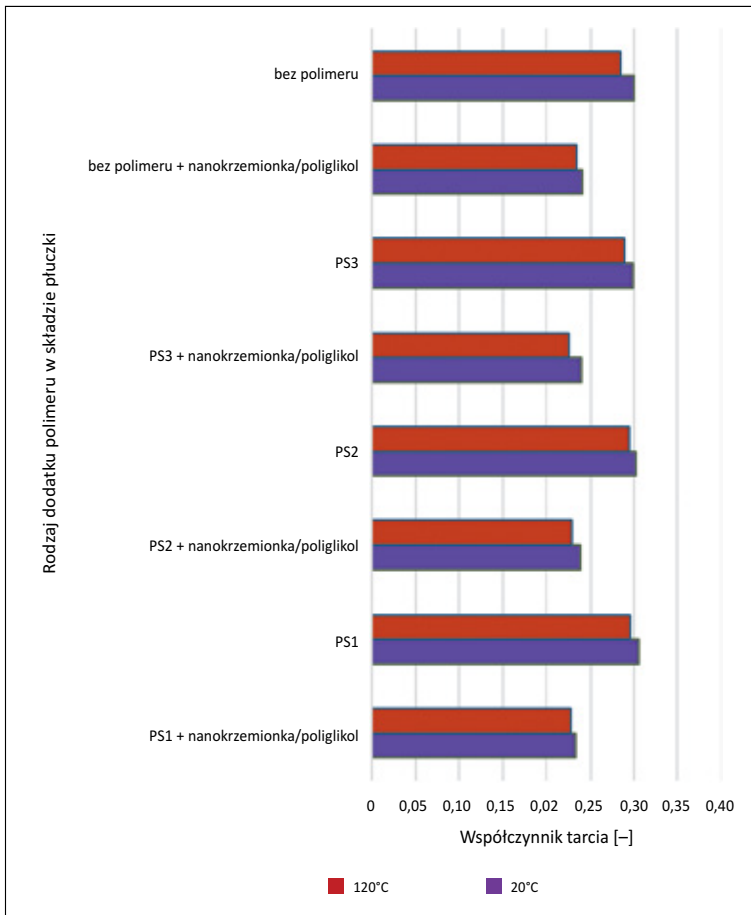
Rysunek 1. Wyniki pomiarów filtracji na bibule filtracyjnej płuczek z dodatkiem nanokrzemionki hydrofobowej i polimerów syntetycznych zawierających 10% zwiercin i skażonych jonami wapnia i magnezu

Figure 1. The filtration measurement results on the filter paper of muds with the addition of hydrophobic nanosilica and synthetic polymers containing 10% of drill cuttings and contaminated with calcium and magnesium ions

Rysunek 2. Wyniki pomiarów filtracji HPHT w temperaturze 120°C na aparacie Grace 2200

Figure 2. Results of HPHT filtration measurements at 120°C on the Grace 2200 apparatus

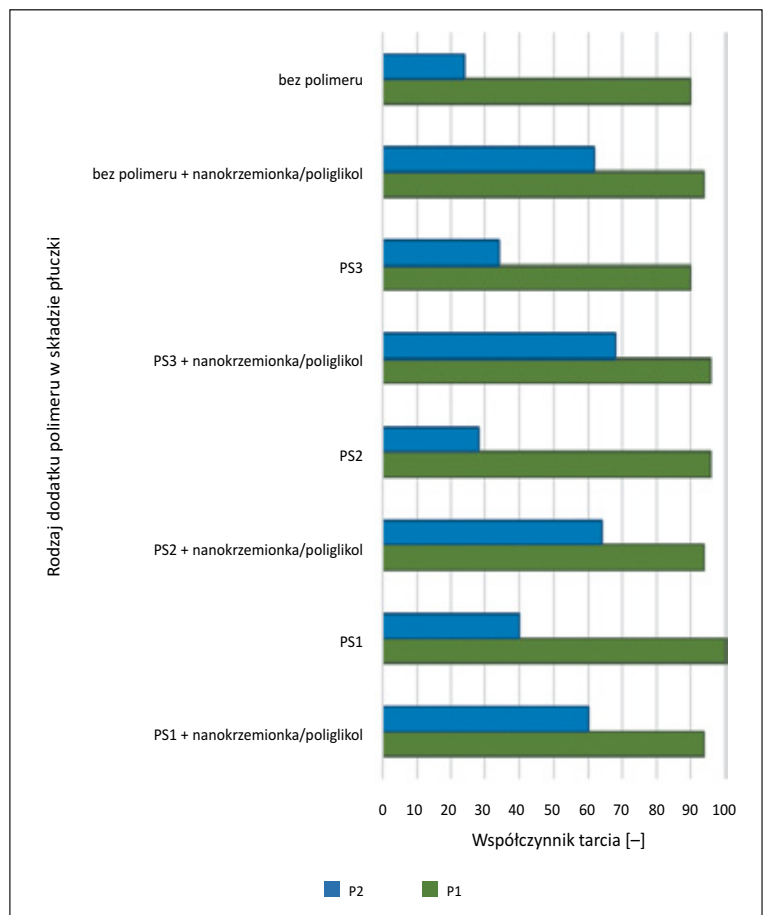




Rysunek 3. Wartości współczynnika tarcia na kontakcie metal–metal w środowisku płuczek zawierających nanokrzemionkę hydrofobową i polimery syntetyczne
Figure 3. Values of the coefficient of friction on the metal–metal contact in the environment of muds containing hydrophobic nanosilica and synthetic polymers

Rysunek 4. Wyniki dyspersji łupku miocenińskiego w środowisku płuczek z dodatkiem 0,5% polimerów syntetycznych w porównaniu z płuczką bez dodatku polimerów

Figure 4. Dispersion results of the Miocene shale in the environment of muds with the addition of 0.5% of synthetic polymers compared to the mud without the addition of polymers



Korzystny wpływ dodatku nanokrzemionki jest najprawdopodobniej spowodowany zastosowaniem poliglikolu, który wykazuje właściwości smarne, a małe rozmiary nanokrzemionki umożliwiają dodatkowo tworzenie bardzo cienkiej błonki na powierzchni metalu.

Przeprowadzone badania właściwości smarnych wykazały, że płuczki zawierające różne polimery syntetyczne (PS1, PS2, PS3) nie różnią się znacząco wartością współczynnika tarcia. Uzyskane dla płuczek wartości współczynnika tarcia mieszczą się w zakresie 0,226–0,306, przy czym wartości współczynnika tarcia dla płuczek bez dodatku nanokrzemionki dyspergowanej w poliglikolu są wyższe i wynoszą około 0,3.

Badania właściwości inhibicyjnych płuczek przeprowadzono według metodyki opracowanej w INiG – PIB. Do badań wybrano płuczki z dodatkiem 0,5% polimeru obniżającego filtrację bez dodatku zwiercin i skażeń chemicznych oraz bez dodatku polimeru. Badania przeprowadzono również dla porównania na płuczках bez dodatku nanokrzemionki. Uzyskane wartości odzysku skały po dyspersji w płuczce (P1) oraz po dyspersji w płuczce i następnie w wodzie (P2) wyrażone w procentach wagowych przedstawiono w tabeli 9 i na rysunku 4.

Dyskusja wyników i wnioski

Przeprowadzono badania wybranych polimerów syntetycznych (PS1, PS2, PS3) w składach płuczek na osnowie koloidu skrobiowego. Wykonano badania zmian ich właściwości pod wpływem skażenia fazą stałą (zmielony łupek mioceński – 10%) i soli wapnia i magnezu (5% CaCl₂ i 1% MgCl₂). Na płuczках zawierających skażenia wykonano pomiary filtracji API oraz HPHT statycznej w temperaturze 60°C i 120°C oraz dynamicznej na aparacie Grace 2200 w temperaturze 120°C.

Na płuczках zawierających jeden z trzech polimerów syntetycznych (PS1, PS2 i PS3) oraz dla porównania bez dodatku polimeru przeprowadzono badania dyspersji łupku mioceńskiego oraz badania właściwości smarnych. Płuczki do badań dyspersji i właściwości smarnych nie zawierały skażeń w postaci fazy stałej ani soli. Wyniki płuczek z dodatkiem nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w roztworze poliglikolu porównano z wynikami płuczek o takim składzie niezawierających tego dodatku.

Przeprowadzone badania potwierdziły w przypadku większości użytych w składach płuczek polimerów syntetycznych ich zdolność do obniżania filtracji w warunkach HPHT. Ich działanie jest szczególnie widoczne w płuczках zawierających zwierciny. Potwierdza to określone w zaleceniach producenta warunki stosowania tych polimerów. Do efektywnego ograniczenia filtracji środki te wymagają odpowiedniej ilości fazy

Tabela 9. Wyniki analizy dyspersyjnej łupku mioceńskiego w środowisku płuczek z dodatkiem polimerów syntetycznych i nanokrzemionki hydrofobowej

Table 9. Results of the dispersion analysis of the Miocene shale in the environment of muds with the addition of synthetic polymers and hydrophobic nanosilica

Nr płuczki	Skład płuczki [%]		P ₁ [%]	P ₂ [%]
1	Biocyd	0,1	94	62
	Środek skrobiowy	3,0		
	XCD	0,3		
	Poliglikol	3,0		
	Emulgator	1,0		
	Krzemionka hydrofobowa	1,0		
	KCl	7,0		
	Blokator węglanowy	7,0		
2	Płuczka 1 + PS1	0,5	94	60
3	Płuczka 1 + PS2	0,5	94	64
4	Płuczka 1 + PS3	0,5	96	68
5	Biocyd	0,1	90	24
	Środek skrobiowy	3,0		
	XCD	0,3		
	KCl	7,0		
	Blokator węglanowy	7,0		
6	Płuczka 5 + PS1	0,5	100	40
7	Płuczka 5 + PS2	0,5	96	28
8	Płuczka 5 + PS3	0,5	90	34

stałej, zapewniającej powstanie osadu filtracyjnego, który następnie może być doszczelniony przez badane polimery. Uzyskane wyniki wykazały, że badane polimery syntetyczne cechuje wysoka efektywność obniżania filtracji w płuczках zawierających dodatek nanokrzemionki hydrofobowej dyspergowanej w poliglikolu. Efektywność działania tych polimerów w połączeniu z nanokrzemionką jest szczególnie widoczna w warunkach HPHT. Wartości filtracji zarówno API, jak i w warunkach HPHT płuczek zawierających PS1, PS2 lub PS3 są zbliżone i znacząco niższe niż w przypadku płuczki bez dodatku polimeru.

Przeprowadzone badania zmian parametrów reologicznych i filtracji wszystkich płuczek z dodatkiem krzemionki hydrofobowej pod wpływem skażeń fazą stałą i chemicznych potwierdziły stabilność tych parametrów. Wartości filtracji po wprowadzeniu 10% zwiercin dodatkowo ulegały obniżeniu i utrzymywały się na niskim poziomie po wprowadzeniu chlorków wapnia i magnezu. Parametry reologiczne ulegały

obniżeniu przy rosnącej zawartości jonów metali dwuwartościowych (Ca^{2+} i Mg^{2+}). W przypadku polimerów syntetycznych użycie ich w ilości 0,5% wystarcza do skutecznego obniżenia filtracji. Najlepszą efektywność obniżania filtracji w warunkach HPHT uzyskano w przypadku PS3. Porównanie metod pomiaru filtracji dla tych samych płuczek użytych w badaniu wskazuje na występowanie zależności pomiędzy ich wartościami. Wartości filtracji uzyskane na rdzeniu ceramicznym z użyciem aparatu Grace są zdecydowanie niższe niż uzyskane przy użyciu prasy filtracyjnej. Analiza wyników potwierdziła, że wartości filtracji z aparatu Grace 2200 stanowią około 55–60% wartości uzyskanych na prasie statycznej HPHT.

Wykonane badania dyspersji łupku miocenińskiego w środowisku płuczek potwierdziły niewielki korzystny wpływ badanych polimerów (PS1, PS2, PS3) na ograniczenie hydratacji skał wrażliwych na działanie wody. Największą skuteczność inhibowania hydratacji skał wykazała płuczka z dodatkiem nanokrzemionki i polimeru PS3, w przypadku której wartości odzysku skały po płuczce i po wodzie wynosiły odpowiednio 96% i 68%. Analiza wyników potwierdza natomiast wyraźny wpływ dodatku nanokrzemionki hydrofobowej na wartości dyspersji łupku miocenińskiego. Wzrost właściwości inhibicyjnych płuczek jest w tym przypadku przede wszystkim wynikiem zastosowania dodatku poliglikolu wprowadzanego razem z nanokrzemionką, a nie samej nanokrzemionki.

Przeprowadzone badania właściwości smarnych wykazały, że płuczki zawierające różne polimery syntetyczne cechują podobne wartości współczynnika tarcia. Wartości uzyskane dla wszystkich płuczek nieznacznie przekraczają 0,3, przy czym w przypadku płuczek zawierających poliglikol wynoszą one około 0,25, a w przypadku płuczek bez poliglikolu – około 0,3. Dodatek poliglikolu, który wykazuje właściwości smarne, korzystnie wpływa na wartości współczynnika tarcia, a jego efektywność jest wzmocniona przez oddziaływanie nanokrzemionki, która dodatkowo stabilizuje film powstający na powierzchni metalu. Dzięki uzyskanym wynikom potwierdzono dane literaturowe wskazujące, że polimery syntetyczne zastosowane w składach badanych płuczek w połączeniu z nanomateriałami wykazują znacznie większą efektywność działania jako środki do ograniczania filtracji podczas wierceń otworów o podwyższonej temperaturze.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Płuczka wiertnicza na osnowie polimerów syntetycznych z dodatkiem nanomateriałów dostosowana do warunków otworowych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0024/KW/2022, nr archiwalny: DK-4100-0012/2022.

Literatura

Abdo J., Haneef M.D., 2010. Nanoparticles: Promising Solution to Overcome Stern Drilling Problems. *NSTI-Nanotech*. ISBN 978-1-4398-3415-2.

- Abdo J., Haneef M.D., 2012. Nano-Enhanced Drilling Fluids: Pioneering Approach to Overcome Uncompromising Drilling Problems. *Journal of Energy Resources Technology*, 134(1): 014501. DOI: 10.1115/1.4005244.
- Abdo J., Haneef M.D., 2013. Clay Nanoparticles Modified Drilling Fluids for Drilling of Deep Hydrocarbon Wells. *Applied Clay Science*, 86: 76–82. DOI: 10.1016/j.clay.2013.10.017.
- Agarwal S., Tran P., Soong Y., Martello D., Gupta R., 2011. Flow Behavior of Nanoparticle Stabilized Drilling Fluids and Effect of High Temperature Aging. *AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas*, AADE-11-NTCE-3: 1–6.
- Akhtarmanesh S., Atashnezhad A., Hareland G., Nygaard R., 2017. Application of Differential Evolution to Predict Wellbore Strengthening From Drilling Fluid Containing Nanoparticles HPHT Filtration Test Results. *51st U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA*.
- Al-Shargabi M., Davoodi S., Wood D.A., Al-Musai A., Rukavishnikov V.S., Minaev K.M., 2022. Nanoparticle Applications as Beneficial Oil and Gas Drilling Fluid Additives: A Review. *Journal of Molecular Liquids*, 352: 118725. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.118725.
- Arambulo S., Colque P., Alban E.D., Ahmed M., 2015. Case Studies Validate the Effectiveness of Aluminum-based HPWBM in Stabilizing Micro-Fractured Shale Formations: Field Experience in the Peruvian Amazon. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA*. DOI: 10.2118/174854-MS.
- Baig N., Kammakam I., Falath W., 2021. Nanomaterials: A Review of Synthesis Methods, Properties, Recent Progress, and Challenges. *Advanced Materials*, 2(6): 1821–1871. DOI: 10.1039/D0MA00807A.
- Beall B.B., Brannon H.D., Tjon-Joe-Pin R.M., Driscoll K., 1996. Evaluation of a new technique for removing horizontal wellbore damage attributable to Grill-In Filter Cake. *Society of Petroleum Engineers*, 36429.
- Beg M., Kumar P., Choudhary P., Sharma S., 2020. Effect of High Temperature Ageing on TiO_2 Nanoparticles Enhanced Drilling Fluids: A Rheological and Filtration Study. *Upstream Oil and Gas Technology*, 5: 100019. DOI: 10.1016/j.upstre.2020.100019.
- Bielewicz D., Bortel E., 2000. Polimery w technologii płuczek wiertniczych. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków*.
- Bielewicz D., Bortel E., Witek E., 2003a. Polimery amfoteryczne w zastosowaniu do płuczek wiertniczych. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków*.
- Bielewicz D., Wysocka M., Wysocki S., 2003b. Poli(amfolit) poli(KAMPS-co-VAm · HCl) – skuteczny inhibitor hydratacji łupków. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 20(1): 61–68.
- Borisov A.S., Husein M., Hareland G.A., 2015. Field Application of Nanoparticle-Based Invert Emulsion Drilling Fluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(8): 340. DOI: 10.1007/s11051-015-3143-x.
- Bortel E., Witek E., Kochanowski A., 2003. Polielektrolity z mrami winyloaminowymi i produkty ich modyfikacji. *Przemysł Chemiczny*, 82(8–9): 889–892.
- Cai J., Chenevert M.E., Sharma M.M., Friedheim J.E., 2012. Decreasing Water Invasion Into Atoka Shale Using Nonmodified Silica Nanoparticles. *SPE Drilling & Completion*, 27(1): 103–112. DOI: 10.2118/146979-PA.
- Cheraghian G., 2021. Nanoparticles in Drilling Fluid: A Review of the State-of-the-Art. *Journal of Materials Research Technology*, 13: 737–753. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.04.089.
- Cheraghian G.G., Afrand M., 2021. Nanotechnology for Drilling Operations. [W:] Ahmed W., Booth M., Nourafkan E. (eds.)

- Emergency Nanotechnologies for Renewable Energy*, 135–148. DOI: 10.1016/B978-0-12-821346-9.00008-0.
- Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Alsaba M., 2014a. Application of In-House Prepared Nanoparticles as Filtration Control Additive to Reduce Formation Damage. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/168116-MS.
- Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Alsaba M., 2014b. Experimental Investigation on Wellbore Strengthening In Shales by Means of Nanoparticle-Based Drilling Fluids. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands*. DOI: 10.2118/170589-MS.
- Dębińska E., 2014. Wpływ nanokrzemionki na parametry mechaniczne kamienia cementowego. *Nafta-Gaz*, 70(4): 229–235.
- Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 71(5): 290–300.
- El-Diasty A.I., Aly A.M., 2015. Understanding the Mechanism of Nanoparticles Applications in Enhanced Oil Recovery. *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt*. DOI: 10.2118/175806-MS.
- Elkatatny S., 2019. Assessing the Effect of Micronized Starch on Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluid. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain*. DOI: 10.2118/194965-MS.
- Fakoya M.F., Shah S.N., 2018. Effect of Silica Nanoparticles on the Rheological Properties and Filtration Performance of Surfactant-Based and Polymeric Fracturing Fluids and Their Blends. *SPE Drilling & Completion*, 33: 100–114. DOI: 10.2118/163921-PA.
- Farahbod F., 2021. Experimental Investigation of Thermo-Physical Properties of Drilling Fluid Integrated with Nanoparticles: Improvement of Drilling Operation Performance. *Powder Technology*, 384: 125–131. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.02.002.
- Friedheim J., Young S., De Stefano G., Lee J., Guo Q., 2012. Nanotechnology for Oilfield Applications – Hype or Reality? *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands*. DOI: 10.2118/157032-MS.
- Gallardo F.E., Erdmann E., Abalos R., 2018. Evaluación Reológica de Fluidos de Perforación Base Agua Con Nanosilice. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2). DOI: 10.1590/S1517-707620180002.0470.
- González A.L., Noguez C., Beránek J., Barnard A.S., 2014. Size, Shape, Stability, and Color of Plasmonic Silver Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*, 118(17): 9128–9136. DOI: 10.1021/jp5018168.
- Hemmat Esfe M., Bahiraei M., Mir A., 2020. Application of Conventional and Hybrid Nanofluids in Different Machining Processes: A Critical Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 282: 102199. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102199.
- Hong S.H., Jo H.J., Choi M.J., Jang H.W., Kim Y.J., Hwang W.R., Kim S.Y., 2019. Influence of MoS₂ Nanosheet Size on Performance of Drilling Mud. *Polymers (Basel)*, 11(2): 321. DOI: 10.3390/polym11020321.
- Ikram R., Jan B.M., Vejpravova J., 2021. Towards Recent Tendencies in Drilling Fluids: Application of Carbon-Based Nanomaterials. *Journal of Materials Research and Technology*, 15: 3733–3758. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.114.
- Ismail A.R., Aftab A., Ibupoto Z.H., Zolkifile N., 2016. The Novel Approach for the Enhancement of Rheological Properties of Water-Based Drilling Fluids by Using Multi-Walled Carbon Nanotube, Nanosilica and Glass Beads. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139: 264–275. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.01.036.
- Jankiewicz B.J., Choma J., Jamiola D., Jaroniec M., 2010. Nanostruktury krzemionkowo-metaliczne. I. Otrzymywanie i modyfikacja nanocząstek krzemionkowych. *Wiadomości Chemiczne*, 64: 913–942.
- Janota M., Bielewicz D., Witek E., 2002. Poliarnofolit poli(KAMPS-co-VAm) – nowy polimer do regulacji parametrów reologicznych i filtracji płuczek wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 19(1): 99–110.
- Jasiński B., 2017. Analiza skuteczności działania dodatków smarnych na podstawie badań przeprowadzonych z użyciem symulatora wiercenia Grace M2200. *Nafta-Gaz*, 73(4): 257–265. DOI: 10.18668/NG.2017.04.06.
- Jasiński B., 2018. Określenie dynamicznej filtracji płuczek wiertniczych w warunkach HPHT z użyciem nowatorskiej metody pomiarowej. *Nafta-Gaz*, 74(2): 85–95. DOI: 10.18668/NG.2018.02.02.
- Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H., 2018. Rheological Investigation of Smart Polymer/Carbon Nanotube Complex on Properties of Water-Based Drilling Fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 556: 23–29. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.058.
- Kolahalalam L.A., Kasi Viswanath I.V., Diwakar B.S., Govindh B., Reddy V., Murthy Y.L.N., 2019. Review on Nanomaterials: Synthesis and Applications. *Materials Today: Proceedings*, 18: 2182–2190. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.371.
- Kosynkin D.V., Ceriotti G., Wilson K.C., Lomeda J.R., Scorsone J.T., Patel A.D., Friedheim J.E., Tour J.M., 2012. Graphene Oxide as a High-Performance Fluid-Loss-Control Additive in Water-Based Drilling Fluids. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(1): 222–227. DOI: 10.1021/am2012799.
- Liu S., Yao F., Kang M., Zhao S., Huang Q., Fu G., 2017. Hierarchical Xanthan Gum/Graphene Oxide Nanocomposite Film Induced by Ferric Ions Coordination. *Materials & Design*, 113: 232–239. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.105.
- Magne T.M., de Oliveira Vieira T., Costa B., Alencar L.M.R., Ricci-Junior E., Hu R., Qu J., Zamora-Ledezma C., Alexis F., Santos-Oliveira R., 2021. Factors Affecting the Biological Response of Graphene. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*, 203: 111767. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2021.111767.
- Mahmoud O., Nasr-El-Din H.A., Vryzas Z., Kelessidis V.C., 2016. Nanoparticle-Based Drilling Fluids for Minimizing Formation Damage in HP/HT Applications. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/178949-MS.
- Novara R., Rafati R., Sharifi Haddad A., 2021. Rheological and Filtration Property Evaluations of the Nano-Based Muds for Drilling Applications in Low Temperature Environments. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 622: 126632. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126632.
- Perween S., Thakur N.K., Beg M., Sharma S., Ranjan A., 2019. Enhancing the Properties of Water Based Drilling Fluid Using Bismuth Ferrite Nanoparticles. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 561: 165–177. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.060.
- Ponmani S., Nagarajan R., Sangwai J.S., 2016. Effect of Nanofluids of CuO and ZnO in Polyethylene Glycol and Polyvinylpyrrolidone on the Thermal, Electrical, and Filtration-Loss Properties of Water-Based Drilling Fluids. *SPE Journal*, 21(2): 405–415. DOI: 10.2118/178919-PA.
- Rafati R., Smith S.R., Sharifi Haddad A., Novara R., Hamidi H., 2018. Effect of Nanoparticles on the Modifications of Drilling Fluids Properties: A Review of Recent Advances. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 161: 61–76. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.11.067.
- Rafieefar A., Sharif F., Hashemi A., Bazargan A.M., 2021. Rheological Behavior and Filtration of Water-Based Drilling Fluids Containing

- Graphene Oxide: Experimental Measurement, Mechanistic Understanding, and Modeling. *ACS Omega*, 6(44): 29905–29920. DOI: 10.1021/acsomega.1c04398.
- Ragab A.M., Noah, A.Z., 2014. Reduction of Formation Damage and Fluid Loss using Nano-sized Silica Drilling Fluids. *Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*, 2: 75–88.
- Saffari H.R.M., Soltani R., Alaei M., Soleymani M., 2018. Tribological Properties of Water-Based Drilling Fluids with Borate Nanoparticles as Lubricant Additives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171: 253–259. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.049.
- Samsuri A., Hamzah A., 2011. Water Based Mud Lifting Capacity Improvement by Multiwall Carbon Nanotubes Additive. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2(5): 99–107.
- Sensoy T., Chenevert M.E., Sharma M.M., 2009. Minimizing Water Invasion in Shales Using Nanoparticles. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana*. DOI: 10.2118/124429-MS.
- Sharma M.M., Chenevert M.E., Guo Q., Ji L., Friedheim J., Zhang R., 2012. A New Family of Nanoparticle Based Drilling Fluids. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA*. DOI: 10.2118/160045-MS.
- Srivatsa J.T., Ziaja M.B., 2011. An Experimental Investigation on Use of Nanoparticles as Fluid Loss Additives in a Surfactant – Polymer Based Drilling Fluids. *International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand*. DOI: 10.2523/IPTC-14952-MS.
- Suppan G., Briones-Macias M., Pazmiño-Arias E., Zamora-Ledezma C., 2021. Fabrication and Characterization of Metal-Free Composite Electrodes Based on Few-Layer-Graphene Nanoplatelets for Oxygen Reduction Reaction Applications. *Physica Status Solidi*, 258: 2000515. DOI: 10.1002/pssb.202000515.
- Taha N.M., Lee S., 2015. Nano Graphene Application Improving Drilling Fluids Performance. *International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar*. DOI: 10.2523/IPTC-18539-MS.
- Torres-Canas F., Blanc C., Mašlík J., Tahir S., Izard N., Karasahin S., Castellani M., Dammasch M., Zamora-Ledezma C., Anglaret E., 2017. Morphology and Anisotropy of Thin Conductive Inkjet Printed Lines of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Materials Research Express*, 4(3): 035037. DOI: 10.1088/2053-1591/aa5687.
- Torres-Canas F.J., Blanc C., Zamora-Ledezma C., Silva P., Anglaret E., 2015. Dispersion and Individualization of SWNT in Surfactant-Free Suspensions and Composites of Hydrosoluble Polymers. *Journal of Physical Chemistry C*, 119(1): 703–709. DOI: 10.1021/jp5092015.
- Vryzas Z., Kelessidis V.C., 2017. Nano-Based Drilling Fluids: A Review. *Energies*, 10(4): 540. DOI: 10.3390/en10040540.
- Wan K., Li Y., Wang Y., Wei G., 2021. Recent Advance in the Fabrication of 2D and 3D Metal Carbides-Based Nanomaterials for Energy and Environmental Applications. *Nanomaterials*, 11(1): 246. DOI: 10.3390/nano11010246.
- William J.K.M., Ponmani S., Samuel R., Nagarajan R., Sangwai J.S., 2014. Effect of CuO and ZnO Nanofluids in Xanthan Gum on Thermal, Electrical and High Pressure Rheology of Water-Based Drilling Fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 117: 15–27. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.03.005.
- Xiao H., Liu S., 2017. 2D Nanomaterials as Lubricant Additive: A Review. *Materials & Design*, 135: 319–332. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.09.029.
- Zamora-Ledezma C., Chicaiza-Zambrano A., Santiago Vispo N., Debut A., Vizuete K., Guerrero V.H., Almeida C.E., Alexis F., 2021. Frequency Based Control of Antifouling Properties Using Graphene Nanoplatelet/Poly(Lactic-Co-Glycolic Acid) Composite Films. *Composite Interfaces*, 28(11): 1137–1153. DOI: 10.1080/09276440.2020.1865088.
- Zamora-Ledezma C., Narváez-Muñoz C., Guerrero V.H., Medina E., Meseguer-Olmo L., 2022. Nanofluid Formulations Based on Two-Dimensional Nanoparticles, Their Performance, and Potential Application as Water-Based Drilling Fluids. *ACS Omega*, 7(24): 20457–20476. DOI: 10.1021/acsomega.2c02082.
- Zhou G., Qiu Z., Zhong H., Zhao X., Kong X., 2021. Study of Environmentally Friendly Wild Jujube Pit Powder as a Water-Based Drilling Fluid Additive. *ACS Omega*, 6(2): 1436–1444. DOI: 10.1021/acsomega.0c05108.



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



Dr inż. Małgorzata ULIASZ
Adiunkt w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl



Mgr inż. Grzegorz 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



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