

Małgorzata Uliasz

Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Właściwości smarne płuczki wiertniczej zawierającej szkło wodne

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, przeprowadzonych celem określenia właściwości smarnych płuczki wiertniczej zawierającej szkło wodne oraz wpływu wybranych środków chemicznych na obniżenie wartości jej współczynnika tarcia.

Lubricating properties of silicate drilling mud

This publication presents laboratory test results, that were conducted with the purpose to determine lubricating properties of drilling muds containing silicates, and the effect of chosen chemicals on friction reduction in these muds.

Wprowadzenie

Płuczki wiertnicze zawierające szkło wodne, czyli płuczki krzemianowe, przeznaczone są głównie do przewiercania reaktywnych, czułych na wodę warstw ilastolupkowych, skał kruchych, które pod wpływem wody wykazują uszkodzenie struktury w postaci szczelin i mikroszczelin, jak również skał o zwiększonej zawartości minerałów ilastych ulegających dyspersji. Stabilność tego typu warstw zapewniają: produkty reakcji chemicznych powstające w wyniku kontaktu szkła wodnego ze skałą, zjawiska jonowymienne oraz proces osmozy, które stanowią o efektywności inhibitującego mechanizmu działania szkła wodnego wspomaganego solą.

W większości płuczek krzemianowych wykorzystywano głównie szkło wodne sodowe (krzemian sodu), którego ilość w pierwszych ich recepturach wynosiła nawet 30-70%. Rozwój technologii płuczek krzemianowych spowodował, że obecne ich składy zawierają prawie 10-cio krotnie mniejsze ilości szkła sodowego, które w połączeniu z różną ilością NaCl lub KCl zapewniają odpowiednie właściwości inhibitacyjne oraz kontrolę osmotycznego przepływu wody z płuczki do skały. Przykładem są opracowane dla warunków krajowych płuczki krzemianowe zawierające 3 i 7% szkła sodowego.

Konsekwencją rozwoju technologii płuczek krzemianowych jest również zastępowanie w ich składzie szkła sodowego szkłem potasowym. Wspomagający efekt inhibitowania hydratacji minerałów ilastych przez jon K^+ , podwyższa tym samym skuteczność działania płuczki krzemianowej; co wykazały przeprowadzone badania laboratoryjne i próby przemysłowe. Na podstawie

uzyskanych wyników stwierdzono, że na efektywność działania płuczki zawierającej szkło wodne potasowe wpływają zarówno procesy fizykochemiczne zachodzące w układzie skała-szkło wodne, jak i właściwości jonowymienne kationu K^+ , których źródłem są krzemian potasu i KCl.

W Instytucie Nafty i Gazu opracowana została beziłowa płuczka krzemianowo-potasowa, którą, po przeprowadzeniu kompleksowych badań laboratoryjnych, po raz pierwszy zastosowano do przewiercania utworów nasunięcia karpacko-stebnickiego (iłowce, łupki, mułowce, piaskowce, margle, anhydryty) oraz miocenu autochtonicznego (iłowce, łupki, piaskowce, mułowce) [10, 12].

Próby przemysłowe opracowanej płuczki krzemianowo-potasowej wykazały, że spośród dotychczas stosowanych w krajowej technologii płuczek inhibitowanych (powszechnie stosowana płuczka potasowo-polimerowa oraz w małym zakresie glikolowo-potasowa), jest jedną z najlepszych płuczek wiertniczych posiadającą bardzo wysoki stopień inhibitowania hydratacji skał ilastolupkowych. Przeprowadzona próba przemysłowa tej płuczki potwierdziła także łatwość regulacji jej parametrów reologicznych, filtracji i pH, które, pomimo wzrostu zanieczyszczeń bezużyteczną fazą stałą, utrzymywały się w zakresie niskich wartości – co ułatwiało szybki postęp wiercenia i dobre oczyszczenie otworu ze zwiercin. Zjawiskiem negatywnym, które wystąpiło podczas stosowania płuczki krzemianowo-potasowej, było (w porównaniu do powszechnie używanej płuczki potasowo-polimerowej) większe

zaciąganie i tokowanie przewodu, obserwowane podczas ciągnięcia. Bieżące badania płuczki otworowej wskazywały, że przyczyną tego zjawiska może być wysoki współczynnik tarcia.

Wystąpienie tych problemów przyczyniło się do podjęcia badań nad poprawą właściwości smarnych płuczki

krzemianowo-potasowej poprzez dobór odpowiedniego środka, celem obniżenia współczynnika tarcia. W artykule przedstawione zostały wyniki badań współczynnika tarcia płuczek zawierających zarówno szkło wodne potasowe, jak i sodowe oraz zmiany jego wartości w obecności zastosowanego danego środka smarnego.

Wpływ właściwości smarnych płuczki wiertniczej na proces wiercenia otworu

Tarcie występujące w różnych urządzeniach jest najczęściej zjawiskiem niepożądanym, ponieważ powoduje znaczne straty energii oraz niszczenie powierzchni trących. Natomiast jeżeli powierzchnie te są rozdzielone warstwą cieczy smarującej, opory tarcia ulegają znacznemu obniżeniu. Podstawowym celem smarowania jest zmniejszenie sił tarcia i zminimalizowanie zużycia powierzchni trących. Siłę tarcia określa zależność $T = \mu_t \cdot Fn$, pozwalająca na ustalenie współczynnika tarcia μ_t , który jest trudno mierzalny ze względu na niepowtarzalność zjawiska i brak możliwości potwierdzenia jego wartości. Współczynnik tarcia zależy nie tylko od mechanicznych i fizycznych właściwości powierzchni trących, ale także od dokładności obróbki, chropowatości powierzchni, wilgotności czy zanieczyszczenia elementów trących. Przykładowe wartości współczynników tarcia dla różnych powierzchni trących wybranych materiałów przedstawiono w tabelicy 1 [9].

W procesie wiercenia otworu, szczególnie otworu kierunkowego i na większych głębokościach, właści-

wości smarne płuczek odgrywają dużą rolę, ponieważ zapobiegają występowaniu komplikacji wiertniczych oraz wpływają na polepszenie zwiercalności skał, zmniejszenie oporów hydraulicznych przepływu płuczki i momentu skręcającego przewodu wiertniczego, a także zmniejszenie zużycia narzędzi wiertniczych.

Występujące w procesie wiercenia otworu tarcie pomiędzy: przewodem wiertniczym a ścianą otworu, świdrem a skałą oraz gryzem świdra a jego osią, powoduje wzrost oporów hydraulicznych w trakcie zapuszczania i wyciągania przewodu wiertniczego, wzrost momentu obrotowego oraz abrazyjne, cieplne i zmęczeniowe zużywanie się narzędzi wiertniczych. Dlatego dla polepszenia procesu wiercenia otworu tarcie powinno być utrzymane na jak najniższym poziomie. Dla warunków otworowych wartość współczynnika tarcia najczęściej zależy od składu płuczki, zawartości fazy stałej pochodzącej ze zwiercanej skały oraz jej kontaktu z różnymi ośrodkami [5, 8, 11].

Właściwości smarne płuczki powinny być dobierane zarówno dla orurowanego, jak i nieorurowanego odcinka otworu. Najczęstszą przyczyną zwiększania współczynnika tarcia w orurowanym odcinku otworu jest nieodpowiednie usuwanie zwiercin z przestrzeni międzyrurowej. Natomiast wielkości współczynnika tarcia w nieorurowanym odcinku otworu powinny być regulowane na podstawie stopniowego przyrostu momentu obrotowego wraz ze wzrostem głębokości [3]. Skutecznymi metodami obniżania współczynnika tarcia jest właściwe oczyszczenie otworu, zachowanie odpowiedniej cyrkulacji płuczki oraz obróbka płuczki środkami smarnymi.

Jednym z zadań płuczki jest smarowanie elementów świdra i przewodu wiertniczego. Każda płuczka wiertnicza powinna posiadać określoną zdolność

Tablica 1. Współczynniki tarcia wybranych zestawień materiałów

Rodzaj stykających się powierzchni	Współczynnik tarcia statycznego	Współczynnik tarcia dynamicznego
stal-stal	0,15-0,17	0,09-0,03
stal-żeliwo	0,30-0,32	0,18
stal-mosiądz	0,15-0,19	0,15
stal-grafit	0,12	0,08
stal-poliestry	0,20	0,11
stal-teflon	0,09	0,04
stal-szkło	0,19	0,08
stal-drewno	0,5	0,5-0,2
stal-lód	0,02-0,03	0,015
żeliwo-żeliwo	0,28	0,16
metal-metal	0,15-0,30	0,15-0,20
metal-skóra	0,3-0,5	0,25
guma-beton (suchy)	1	0,7
drewno-drewno	0,4-0,65	0,2-0,5
drewno-metal	0,5-0,6	0,3-0,6

do zmniejszania współczynnika tarcia. Często jednak, głównie w trakcie wiercenia odcinka poziomego, może wystąpić nagły wzrost momentu obrotowego, którego przyczyną może być stan techniczny otworu, a nie złe właściwości smarne płuczki. Dlatego przed przystąpieniem do obróbki płuczki pod kątem poprawy jej właściwości smarnych należy zwrócić uwagę na takie zjawiska jak: nieodpowiednie oczyszczanie otworu ze zwiercin, brak stateczności ścian otworu powodowanej sypaniem skał do otworu lub pęcznieniem ilów, wcinanie się przewodu w ścianę, niekontrolowane skrzywienia, przechycenia przewodu lub zużycie świda.

Płuczki olejowe oraz płuczki polimerowe zawierające polimer w postaci emulsji olejowej odznaczają się znacznie lepszymi właściwościami smarnymi w porównaniu do innych rodzajów płuczek wodnodispersyjnych. Dla poprawy właściwości smarnych tych płuczek wskazana jest ich obróbka specjalnymi środkami, które na powierzchni przewodu wiertniczego, narzędzi i na ścianie otworu tworzą trwałe, w sposób ciągły odnawiające się warstewki adsorpcyjne i chemisorpcyjne, zmniejszające siły tarcia i opory hydrauliczne przepływu oraz ułatwiają oczyszczanie roboczych powierzchni świda i urabianie skały [8].

Ze względu na funkcję jaką pełnią podczas wiercenia otworu, środki smarne stosowane w technologii płuczek wiertniczych można ogólnie podzielić na:

- niskociśnieniowe, których działanie związane jest ze zmniejszaniem sił adhezji pomiędzy powierzchniami trącymi oraz oporów tarcia i momentu obrotowego przewodu wiertniczego w wyniku utworzenia polimolekularnych, adsorpcyjnych warstewek smarnych,
- wysokociśnieniowe, których działanie związane jest ze zwiększaniem żywotności narzędzi wiertniczych w wyniku utworzenia na ich powierzchni warstewki chemisorpcyjnej.

Działanie niskociśnieniowych środków smarnych, stosowanych w warunkach nieznacznego zużywania się powierzchni trących, zanika przy wysokich ciśnieniach, ponieważ zachodzi rozkład adsorpcyjnych warstewek smarnych i następuje przejście od smarowania hydrodynamicznego do granicznego, a w wielu przypadkach nawet do bezpośredniego tarcia stykających się ze sobą powierzchni. Natomiast wysokociśnieniowe środki smarne, zastosowane w takich warunkach, spełniają jednocześnie funkcję środków niskociśnieniowych. Środki wysokociśnieniowe, które łączą się z powierzchnią tarcia nie tylko siłami adsorpcyjnymi, ale również

i chemisorpcyjnymi, tworzą warstewki smarne charakteryzujące się dużą wytrzymałością, pozwalającą na zwiększenie trwałości powierzchni, np. świdrow najbardziej narażonych na abrazyjne, cieplne oraz zmęczeniowe zużycie [8].

W warunkach wysokiego ciśnienia działaniem smarnym odznacza się wiele środków chemicznych lecz nie wszystkie mogą być stosowane jako dodatki do płuczek wiertniczych. Poprawę właściwości smarnych płuczek i zmniejszenie zużycia narzędzi wiertniczych można uzyskać stosując związki chemiczne zawierające dużą ilość węgla w łańcuchu węglowodorowym (8-12 atomów węgla), np. nienasycone kwasy tłuszczowe, jak: oleinowy, linolowy, rycynolowy oraz ich mieszaniny, mydła, etery i inne. W wyniku ich reakcji z warstwami tlenowymi na metalu powstają mydła, tworzące warstwę smarną, która modyfikuje powierzchnię metalu poprzez częściowe jej wyrównanie – powodując tym samym zmniejszenie sił tarcia. Spośród środków wysokociśnieniowych dużą efektywnością działania charakteryzują się również środki smarne zawierające w swoim składzie związki siarki, fosforu lub chloru, które wytwarzają na powierzchni metalu warstwę siarczku lub fosforanu, o niskim współczynniku tarcia i dużej twardości.

Uwzględniając występowanie różnych warunków złożowych, środki smarne stosowane w technologii płuczek wiertniczych można podzielić na [5, 8]:

- środki zmniejszające tarcie przy małych naciskach, których zadaniem jest zmniejszanie tarcia przewodu wiertniczego o ściany w tych miejscach, gdzie przewód styka się ze ścianą poprzez osad ilowy lub tam, gdzie wielkość nacisku nie przekracza 35 MPa. Naciski nie przekraczające tej wielkości występują na 99% powierzchni rur płuczkowych,
- środki przeciwtarciowe zmniejszające tarcie przy ekstremalnie wysokich naciskach, zwane środkami EP, których zadaniem jest zmniejszanie tarcia i ochrona powierzchni metalu przed ścieraniem przy naciskach 35-700 MPa. Naciski takie występują w łożyskach świdrow, na zębach świdrow i w punktach stykających się bezpośrednio ze skałą. Należą do nich oleje z dodatkiem siarczku dwubenzylu, fosforanu trójkretylu lub innych środków reagujących ze stałą, tworzące na jej powierzchni twardą powłokę siarczkową lub fosforanową,
- środki pośredniczące w przenoszeniu nacisku, tj. ciała stałe, np. drobne kuleczki szklane lub plastikowe (środki twarde) oraz materiały włókniste

pochodzenia organicznego (miękkie), przez które przenoszony jest nacisk w taki sposób, aby przewód wiertniczy nie stykał się bezpośrednio (lub poprzez ziarna urobku) ze skałą. Stosowane są one tam, gdzie duża ilość materiału obciążającego i/lub ziaren urobku, uniemożliwia efektywne działanie płynnych środków smarnych.

Środki smarne stosowane w wodnodispersyjnych płuczkach wiertniczych, niezależnie od rodzaju, powinny charakteryzować następujące cechy:

- łatwa adsorpcja na powierzchni metalu i tworzenie warstewki smarnej o dużej wytrzymałości mechanicznej,
- zachowanie podstawowych właściwości w pełnym zakresie wartości temperatury, w jakiej stosowana jest płuczka wiertnicza,

- odporność na działanie soli rozpuszczonych w płucce wiertniczej,
- nie pogarszanie parametrów płuczki wiertniczej.

Doboru środków smarnych do płuczki wiertniczej, po uwzględnieniu warunków złożowych, należy dokonywać w oparciu o dwa kryteria, tj. efektywność działania oraz stopień zagrożenia dla środowiska. Kryterium toksyczności środków smarnych związane jest z wymaganiami ekologicznymi, które eliminują większość stosowanych wcześniej środków, opartych głównie o produkty naftowe w mieszaninie ze związkami chemicznymi na bazie kwasów tłuszczowych. Obecnie stosowane środki smarne stanowią najczęściej mieszaninę związków syntetycznych (spełniających rolę oleju) ze środkami powierzchniowo czynnymi, jako emulgatorami.

Właściwości smarne płuczki krzemianowej na podstawie danych literaturowych

Płuczka krzemianowa zaliczana do płuczek charakteryzujących się bardzo wysokim stopniem inhibitowania hydratacji skał ilasto-łupkowych, równocześnie uważana jest za płuczkę powodującą wzrost momentu obrotowego i sił ciągnięcia. Przeprowadzone liczne próby otworowe i laboratoryjne tej płuczki nie wskazują jednoznacznie, że przyczyną tych problemów mogą być wyłącznie właściwości smarne płuczki krzemianowej [1].

Podczas wiercenia otworu istnieje szereg czynników, które przyczyniają się do wzrostu momentu obrotowego i zaciągania, np.: profil otworu i skrętność, geometria otworu, konstrukcja przewodu i zestawu dolnej części przewodu, w tym typ świda. Dodatkowo na moment obrotowy i zaciąganie oddziałują także parametry wiercenia, jak: prędkość wiercenia i przepływu płuczki, nacisk na świder, wibracje przewodu i kontrola kierunkowości wiercenia otworu. Równie ważnymi czynnikami mającymi wpływ na moment obrotowy i zaciąganie są:

- rodzaj płuczki i stan otworu wiertniczego, wynikający z nieodpowiedniego oczyszczania (tworzenie się ławic zwiercin),
- zmiany średnicy otworu, spowodowane rozmyciem i skawernowaniem jego ścian, obklejaniem świda, powstawaniem osadów na ścianie otworu lub szybkim wzrostem kąta wiercenia, jak również
- kontaktowego tarcia pomiędzy przewodem a ścianą otworu.

W przypadku stosowania płuczki krzemianowej, ze względu na jej właściwości inhibitacyjne, w czasie

wiercenia istnieją znacznie większe możliwości utrzymania odpowiedniego stanu technicznego otworu, niż przy wykorzystaniu innych wodnodispersyjnych płuczek inhibitowanych. Jej działanie utwardzające przewiercane warstwy skał niestabilnych oraz zapobiegające pęcznieniu i dyspersji skał ilasto-łupkowych zapewnia stateczność ścian otworu, skuteczne oczyszczanie ze zwiercin i ograniczenie wzajemnego oddziaływania przewodu ze ścianą otworu.

Z powyższego wynika, że przy zachowaniu odpowiedniej technologii wiercenia płuczka krzemianowa nie powinna być przyczyną nadmiernego wzrostu momentu obrotowego przewodu i sił zaciągania, powodowanych momentem sił tarcia. Takie wnioski wysunęli autorzy artykułu [1] w oparciu o badania smarności płuczki krzemianowej, przeprowadzone na specjalnie zaprojektowanym przyrządzie do pomiaru współczynnika tarcia płuczek wiertniczych w warunkach otworopodobnych.

Na podstawie pomiaru sił tarcia pomiędzy zwornikiem o długości 38 mm i średnicy 30 mm, a rurą oraz piaskowcem, przy sile nacisku na zwornik do 30 kg (w warunkach otworowych 100-500 kg) i obrotach do 500 RPM (w warunkach otworowych obroty rury 40-150 RPM), określono współczynnik tarcia (μ_t) płuczki krzemianowej, który wynosił 0,36 na kontakcie metal-metal (rura N80) oraz 0,22 dla zestawu metal-piaskowiec (Berea). Po obróbce płuczki środkiem smarnym uzyskano poprawę jej właściwości smarnych, otrzymując niższe wartości współczynnika tarcia, w granicach

5-10% dla płuczki sporządzonej w warunkach laboratoryjnych, natomiast dla płuczki otworowej ok. 30%.

Jak wykazano, wartości μ_t płuczki krzemianowej mieszczą się w zakresie wartości μ_t płuczek polimerowych, tj. 0,30-0,35 dla rur i 0,22-0,28 dla ściany otworu, uwzględnianych do obliczeń momentu obrotowego przewodu i sił ciągnięcia.

Generalnie przyjmuje się, że współczynnik tarcia płuczek zawierających bentonit mieści się w zakresie wartości 0,30-0,45, płuczek polimerowych 0,22-0,35 oraz płuczek inwersyjnych 0,18-0,35. Stosując środki smarne można obniżyć wartość μ_t o ok. 5-25%. W celu określenia dokładności pomiarów współczynnika tar-

cia danej płuczki należy zwrócić uwagę na źródło jej pochodzenia, gdyż, jak wykazały badania, płuczka sporządzona w warunkach laboratoryjnych wykazuje niższą jego wartość [4].

Opierając się o zebrane informacje literaturowe oraz wnioski z przeprowadzonych prób przemysłowych wynika, że płuczka krzemianowa powinna być obrobiona środkiem smarnym w celu obniżenia sił tarcia, ale równocześnie z uwagi na jej właściwości inhibitujące powinny być prawidłowo wykonywane poszczególne operacje wiercenia otworu (szczególnie wynoszenie i usuwanie urobku), celem zminimalizowania przyczyn wzrostu momentu obrotowego i sił ciągnięcia.

Właściwości smarne płuczek zawierających krzemian potasu i sodu

Właściwości smarne użytych do badań cieczy, bez i z dodatkiem środków chemicznych ograniczających tarcie na kontakcie metal-metal, określone zostały na podstawie wielkości współczynnika tarcia – μ_t , do wyznaczenia którego wykorzystano powszechnie stosowany w wiertnictwie EP Tester, mierząc siłę tarcia (F_t) pomiędzy wirującym pierścieniem a dociskany blok oraz siłę dociskającą (F_n) blok.

Przeprowadzone próby przemysłowe opracowanej w INiG płuczki krzemianowo-potasowej potwierdziły, określony na podstawie badań laboratoryjnych, jej wysoki stopień inhibitowania hydratacji skał ilastych, a równocześnie wskazały potrzebę kontynuowania badań w kierunku poprawy jej właściwości smarnych, co przedstawiono w niniejszym artykule. Do badań laboratoryjnych wykorzystana została również opracowana w INiG, w latach 1998-2000, płuczka krzemianowo-polimerowa (patent nr 188174), której właściwości inhibitacyjne zapewniał układ: szkło sodowe SW40 – KCl – poliglikol.

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu określenie właściwości smarnych płuczek zawierających zarówno krzemian sodu, jak i potasu, a szczególnie wpływu ilości i rodzaju szkła wodnego na wielkość ich współczynnika tarcia, pod kątem doboru odpowiedniego środka smarnego, w oparciu o jego zdolność do obniżania sił tarcia na kontakcie metal-metal w środowisku badanej płuczki. W związku z tym do wykonania badań laboratoryjnych użyte zostały 3, 5 i 10% roztwory wodne szkła potasowego R40 i sodowego SW40 oraz płuczki wiertnicze zawierające 3 i 5% tych krzemianów, w składzie których zastosowano środki chemiczne posiadające właściwości smarne.

Były to:

- **GEM GP** – glikol polialkilowy firmy Baroid, którego podstawowym zadaniem jest ograniczanie hydratacji skał ilasto-lupkowych oraz dodatkowo poprawa właściwości smarnych płuczki wiertniczej i zapobieganie oblepieniu świdra,
- **olej wiertniczy** – środek opracowany w Zakładzie Olejów, Środków Smarnych i Asfaltów INiG,
- **Superlub** – znany środek smarny, stosowany powszechnie w technologii płuczek wiertniczych, będący mieszaniną oksyetylenowanych glicerydów i estrów kwasów tłuszczowych, służący do poprawy właściwości smarnych płuczek wiertniczych na bazie wodnej; w tym płuczek sporządzonych na roztworach solanek (do nasycenia włącznie),
- **ECF 313** – wieloskładnikowy wodny roztwór stanowiący mieszaninę oleju emulgującego, emulgatora i polioksyetylenowego estru oleju roślinnego, opracowany w warunkach laboratoryjnych w Zakładzie Technologii Wiercenia INiG, dla poprawy właściwości smarnych płuczek wiertniczych stosowanych głównie do wiercenia otworów kierunkowych.

Otrzymywane wartości współczynników tarcia roztworów szkła potasowego i sodowego oraz sporządzonych z ich udziałem płuczek wiertniczych (tablica 2) wskazywały, że na ich wielkość miała wpływ ilość szkła wodnego, jego rodzaj, temperatura pomiaru, składniki płuczki, a także materiały obciążające.

Jednak decydującym czynnikiem wpływającym na wielkość współczynnika tarcia cieczy sporządzonych na podstawie danego rodzaju szkła wodnego była ilość szkła wodnego. Wzrost ilości szkła powodował pod-

Tablica 2. Średnie wartości współczynnika tarcia roztworów szkła wodnego – potasowego i sodowego oraz płuczek krzemianowych o różnej gęstości

Lp.	Skład cieczy [%]		Współczynnik tarcia [μ]	
			20°C	40°C
1.	Roztwór R40	3,0	0,842	0,809
2.	Roztwór R40	5,0	0,858	0,800
3.	Roztwór R40	10,0	0,866	0,719
4.	Roztwór SW40	3,0	0,702	0,719
5.	Roztwór SW40	5,0	0,727	0,760
6.	Roztwór SW40	10,0	0,751	0,825
7.	Płuczka krzemianowo-potasowa, nieobciążona, zawierająca R40	3,0	0,817	0,809
8.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,15 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40	3,0	0,539	0,547
9.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40	3,0	0,490	0,498
10.	Płuczka krzemianowo-potasowa, nieobciążona, zawierająca: R40	5,0	0,833	0,874
11.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,15 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40	5,0	0,653	0,694
12.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40	5,0	0,621	0,694
13.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, nieobciążona, zawierająca: SW40	3,0	0,612	0,662
14.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,16 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40	3,0	0,310	0,253
15.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,23 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40	3,0	0,196	0,210
16.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, nieobciążona zawierająca: SW40	5,0	0,686	0,670
17.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,16 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40	5,0	0,588	0,604
18.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,23 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40	5,0	0,367	0,326

wyższenie wartości μ_t badanej cieczy, przy czym jego wysokość zależała od rodzaju szkła. Wyższe wartości μ_t posiadały cieczy zawierające szkło potasowe.

Analiza wyników badań smerności płuczek krzemianowych wykazała również, że wysokość μ_t zależała nie tylko od zawartości szkła w płuczce, ale także od rodzaju i właściwości jej składników, a głównie dodatku materiału obciążającego. Podwyższanie gęstości płuczek powodowało obniżanie wartości współczynnika tarcia, czego przykładem są znaczące różnice wartości μ_t pomiędzy płuczka nieobciążoną i obciążoną. Natomiast wpływ właściwości chemicznych składników płuczki na wielkość μ_t stwierdzono na przykładzie płuczki krzemianowo-polimerowej. Właściwości smarne poliglikolu zastosowanego w jej składzie wyjściowym oraz właściwości chemiczne szkła sodowego (SW40), które zostało specjalnie zmodyfikowane dla potrzeb badań prowadzonych nad opracowaniem płuczki krzemianowo-polimerowej, spowodowały, że oznaczano niższe wartości μ_t tej płuczki, w porównaniu do płuczki krzemianowo-potasowej.

Wstępna ocena właściwości smarnych płuczek krzemianowych wykazała, że – dla zapewnienia bezpieczeństwa procesu wiercenia otworu – wartość współczynnika tarcia powinna być okresowo kontrolowana i regulowana dodatkami środka posiadającego zdolność do obniżania współczynnika tarcia, co dotyczy szczególnie płuczek zawierających 5% szkła wodnego, bez względu na jego rodzaj.

Zastosowanie w dalszych badaniach w/w środków smarnych (w ilości 0,5-1,5%) do obróbki 3, 5 i 10% roztworów szkła potasowego oraz płuczek krzemianowych korzystnie wpłynęło na właściwości smarne badanych cieczy, a uzyskiwane wartości ich współczynników tarcia zależały od właściwości chemicz-

nych i koncentracji danego środka oraz stężenia szkła wodnego. W oparciu o przeprowadzone badania wytypowane zostały środki charakteryzujące się największą zdolnością do obniżania współczynnika tarcia, a były to: **Superlub** i **ECF 313**. Wytypowane środki (w ilości 1,0 i 1,5%) zastosowane zostały do obróbki płuczki krzemianowo-potasowej i krzemianowo-poli-merowej, o gęstości regulowanej blokaterem węglanowym i barytem oraz dodatkiem zwierzcin, wynoszącym 35%. Skażenie płuczki taką ilością zwierzcin, po-

chodzących ze zmielonej skały mioceńskiej, miało na celu określenie wpływu urobku na siły tarcia, które w warunkach otworowych są przyczyną wzrostu momentu obrotowego przewodu – co potwierdziły próby przemysłowe płuczki krzemianowo-potasowej. Dlatego w warunkach laboratoryjnych podjęte zostały próby odtworzenia składu i właściwości płuczki otworowej, uwzględniając ilość urobku zawierającą ok. 7% aktywnych części bentonitu, przy którym wystąpiło zaciąganie przewodu.

Tablica 3. Średnie wartości współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-potasowej o gęstości 1,15-1,28 kg/dm³ zawierającej 3% szkła potasowego

Lp.	Skład płuczki [%]	Współczynnik tarcia [μ]		Min. i max. ciśnienie nacisku [Pn]/[MPa]	
		20°C	40°C	20°C	40°C
1.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,15 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 3,0	0,539	0,547	17,93/35,86	16,65/33,3
2.	Płuczka 1 + Superlub 1,0	0,173	0,178	17,93/89,66	15,54/93,25
3.	Płuczka 1 + Superlub 1,5	0,145	0,144		
4.	Płuczka 1 + ECF 313 1,0	0,176	0,173	16,65/99,91	14,57/87,42
5.	Płuczka 1 + ECF 313 1,5	0,161	0,169		
6.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 3,0	0,490	0,498	14,57/29,14	14,57/29,14
7.	Płuczka 6 + Superlub 1,0	0,161	0,168	13,71/82,28	13,71/82,28
8.	Płuczka 6 + Superlub 1,5	0,157	0,158		
9.	Płuczka 6 + ECF 313 1,0	0,137	0,146	13,71/123,4	13,71/123,4
10.	Płuczka 6 + ECF 313 1,5	0,131	0,136		
11.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,28 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 3,0 zwierzcin 35,0	0,482	0,514	12,27/24,54	12,27/24,54
12.	Płuczka 11 + Superlub 1,0	0,313	0,343	12,27/49,08	12,27/49,08
13.	Płuczka 11 + Superlub 1,5	0,281	0,317		
14.	Płuczka 11 + ECF 313 1,0	0,359	0,385	11,95/59,77	11,95/59,77
15.	Płuczka 11 + ECF 313 1,5	0,215	0,235		

Tablica 4. Średnie wartości współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-potasowej o gęstości 1,15-1,28 kg/dm³ zawierającej 5% szkła potasowego

Lp.	Skład płuczki [%]	Współczynnik tarcia [μ]		Min. i max. ciśnienie nacisku [Pn]/[MPa]	
		20°C	40°C	20°C	40°C
1.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,15 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 5,0	0,653	0,694	33,3/66,6	33,3/66,6
2.	Płuczka 1 + Superlub 1,0	0,217	0,250	31,25/174,85	31,25/174,85
3.	Płuczka 1 + Superlub 1,5	0,178	0,187		
4.	Płuczka 1 + ECF 313 1,0	0,155	0,163	25,90/671,42	25,90/671,42
5.	Płuczka 1 + ECF 313 1,5	0,152	0,163		
6.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 5,0	0,621	0,694	21,19/42,38	21,19/42,38
7.	Płuczka 6 + Superlub 1,0	0,227	0,228	19,42/97,13	19,42/97,13
8.	Płuczka 6 + Superlub 1,5	0,179	0,174		
9.	Płuczka 6 + ECF 313 1,0	0,166	0,173	19,42/136,0	19,42/136,0
10.	Płuczka 6 + ECF 313 1,5	0,160	0,167		
11.	Płuczka krzemianowo-potasowa, obciążona do $\rho = 1,28 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: R40 5,0 zwierciny 35,0	0,555	0,563	11,95/23,91	11,95/23,91
12.	Płuczka 11 + Superlub 1,0	0,434	0,446	11,65/34,97	11,65/34,97
13.	Płuczka 11 + Superlub 1,5	0,348	0,418		
14.	Płuczka 11 + ECF 313 1,0	0,441	0,457	11,65/34,97	11,65/34,97
15.	Płuczka 11 + ECF 313 1,5	0,418	0,467		

Zmiany współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-potasowej o gęstości 1,15, 1,22 i 1,28 kg/dm³, zawierającej 3 i 5% szkła potasowego, powodowane obróbką środkami smarnymi (Superlub, ECF 313) w ilości 1,0-1,5%, zestawione zostały w tablicy 3 i 4. Przeprowadzona analiza wyników badań pod kątem zdolności zastosowanych środków do obniżania współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-potasowej wykazała, że wzrost ilości środka smarnego powodował obniżenie wartości współczynnika tarcia badanej płuczki, lecz

efektywność działania środka zależała od jego właściwości chemicznych, zawartości szkła, dodatku materiału obciążającego, a przede wszystkim od skażenia płuczki zwiercinami. Wytypowane środki smarne tworzyły także dobre jakościowo warstewki smarne, przeciwdziałające zacieraniu się elementów stalowych, które wymagały stosunkowo wysokich ciśnień nacisku do ich zerwania. Jak wykazały badania, dodatek zwiercin do płuczki spowodował obniżenie wartości jej współczynnika tarcia, ale równocześnie przyczynił się do

obniżenia efektywności działania zastosowanych środków smarnych, porównując ich działanie w płuczce obciążonej.

Na podstawie otrzymanych wyników badań laboratoryjnych stwierdzono, że płuczka krzemianowo-potasowa w warunkach otworowych wymaga stosowania dobrych jakościowo środków smarnych, a przy dużej zawartości zwiercin w płuczce zastosowane ilości tych środków, tj. 1,0 i 1,5%, mogą być niewystarczające. Zaproponowane ilości wybranych środków mogą być

natomiast z powodzeniem zastosowane w składzie płuczki o niskiej zawartości fazy stałej, a w miarę potrzeb, zależnych od warunków otworowych i wysokości współczynnika tarcia, konieczne będzie zwiększenie ilości danego środka.

Takim samym zakresem badań objęta została płuczka krzemianowo-polimerowa zawierająca 3 i 5% SW40, charakteryzująca się niższym współczynnikiem tarcia w porównaniu do płuczki krzemianowo-potasowej. Wyniki tych badań przedstawione zostały w tabelicy 5 i 6.

Tablica 5. Średnie wartości współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-polimerowej o gęstości 1,15-1,29 kg/dm³ zawierającej 3% szkła sodowego

Lp.	Skład płuczki [%]	Współczynnik tarcia [μ]		Min. i max. ciśnienie nacisku [Pn]/[MPa]	
		20°C	40°C	20°C	40°C
1.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,16 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 3,0	0,310	0,253	15,04/30,08	15,04/30,08
2.	Płuczka 6 + Superlub 1,0	0,237	0,277	25,90/51,80	15,54/31,08
3.	Płuczka 6 + Superlub 1,5	0,179	0,269		
4.	Płuczka 6 + ECF 313 1,0	0,170	0,192	25,90/129,51	15,54/77,71
5.	Płuczka 6 + ECF 313 1,5	0,165	0,175		
6.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 3,0	0,196	0,320	15,04/30,08	15,04/45,12
7.	Płuczka 11 + Superlub 1,0	0,186	0,208	24,54/98,16	15,54/62,16
8.	Płuczka 11 + Superlub 1,5	0,174	0,175		
9.	Płuczka 11 + ECF 313 1,0	0,173	0,194	23,31/93,25	15,54/62,16
10.	Płuczka 11 + ECF 313 1,5	0,172	0,181		
11.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,28 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 3,0 zwierciny 35,0	0,359	0,416	11,65/34,97	11,65/34,97
12.	Płuczka 16 + Superlub 1,0	0,302	0,424	11,65/34,97	11,37/22,74
13.	Płuczka 16 + Superlub 1,5	0,245	0,392		
14.	Płuczka 16 + ECF 313 1,0	0,294	0,408	11,37/34,11	11,37/22,74
15.	Płuczka 16 + ECF 313 1,5	0,261	0,384		

Tablica 6. Średnie wartości współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-polimerowej o gęstości 1,15-1,29 kg/dm³ zawierającej 5% szkła sodowego

Lp.	Skład płuczki [%]	Współczynnik tarcia [μ]		Min. i max. ciśnienie nacisku [Pn]/[MPa]	
		20°C	40°C	20°C	40°C
1.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,16 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 5,0	0,588	0,604	15,04/30,08	15,04/30,08
2.	Płuczka 1 + Superlub 1,0	0,588	0,531	23,31/46,62	15,54/31,08
3.	Płuczka 1 + Superlub 1,5	0,326	0,359		
4.	Płuczka 1 + ECF 313 1,0	0,271	0,261	21,19/84,77	15,54/62,16
5.	Płuczka 1 + ECF 313 1,5	0,201	0,204		
6.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,22 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 5,0	0,367	0,326	15,04/30,08	15,04/30,08
7.	Płuczka 6 + Superlub 1,0	0,220	0,237	16,65/83,26	15,04/62,16
8.	Płuczka 6 + Superlub 1,5	0,215	0,258		
9.	Płuczka 6 + ECF 313 1,0	0,220	0,225	18,65/130,55	15,04/90,24
10.	Płuczka 6 + ECF 313 1,5	0,173	0,176		
11.	Płuczka krzemianowo-polimerowa, obciążona do $\rho = 1,28 \text{ kg/dm}^3$, zawierająca: SW40 5,0 zwierciny 35,0	0,474	0,572	11,1/22,2	11,1/22,2
12.	Płuczka 11 + Superlub 1,0	0,384	0,572	11,2/33,3	11,1/22,2
13.	Płuczka 11 + Superlub 1,5	0,277	0,433		
14.	Płuczka 11 + ECF 313 1,0	0,408	0,449	11,2/33,3	11,1/22,2
15.	Płuczka 11 + ECF 313 1,5	0,375	0,482		

Dalszą poprawę właściwości smarnych płuczek uzyskano stosując do jej obróbki wytypowane środki smarne, których skuteczność działania potwierdziły wcześniejsze badania. Przeprowadzone testy wykazały podobne zachowanie się ww. środków w środowisku badanej płuczki; zarówno ze względu na ilość szkła, jak i jej gęstość, a przede wszystkim skażenie zwiercinami. Analiza efektywności działania zastosowanych środków smarnych na podstawie zmian współczynnika tarcia płuczki krzemianowo-polimerowej wykazała, że

– pomimo korzystnego, smarnego działania występującego w jej składzie glikolu – płuczka ta w warunkach otworowych wymagać będzie obróbki bardziej skutecznymi środkami smarnymi, do których należy zaliczyć Superlub i ECF 313, w ilości zależnej od warunków jej stosowania.

W celu porównania właściwości smarnych płuczek krzemianowych sporządzonych w warunkach laboratoryjnych z właściwościami płuczek otworowych, oznaczone zostały także wartości μ , płuczek pochodzących

z otworów przedgórza Karpat oraz Nizu Polskiego, których wyniki przedstawiono w tabelicy 7. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wartości μ_t płuczki krzemianowo-potasowej zawierającej 3 i 5% krzemianu potasu mieściły się w zakresie wartości μ_t

bentonitowych płuczek otworowych, natomiast właściwości smarne płuczki krzemianowo-polimerowej zawierającej 3% krzemianu sodu były porównywalne do właściwości płuczek polimerowych, a z dodatkiem 5% krzemianu sodu – do płuczek bentonitowych.

Tabela 7. Średnie wartości współczynnika tarcia płuczek otworowych

Lp.	Rodzaj płuczki otworowej	Współczynnik tarcia [μ_t]
1.	Płuczka bentonitowa z głębokości 720 m przed cementowaniem rur 7"	0,506
2.	Płuczka bentonitowa z głębokości 200 m przed cementowaniem rur 185/8"	0,555
3.	Płuczka beziłowa polimerowo-potasowa z głębokości 1400 m przed cementowaniem rur 95/8"	0,424
4.	Płuczka polimerowo-solna z głębokości ~3000 m przed cementowaniem rur 95/8"	0,336
5.	Płuczka polimerowo-solna z głębokości ~4000 m	0,258
6.	Płuczka beziłowa krzemianowo-potasowa zawierająca: 3% R40 + 35% zwiercin – sporządzona w laboratorium	0,482
7.	Płuczka beziłowa krzemianowo-potasowa zawierająca 5% R40 + 35% zwiercin – sporządzona w laboratorium	0,555
8.	Płuczka beziłowa krzemianowo-polimerowa zawierająca 3% SW40 + 35% zwiercin – sporządzona w laboratorium	0,359
9.	Płuczka beziłowa krzemianowo-polimerowa zawierająca 5% SW40 + 35% zwiercin – sporządzona w laboratorium	0,474

Podsumowanie

Płuczka krzemianowa uważana jest za jedną z najlepszych płuczek zapobiegających hydratacji skał ilasto-łupkowych, a równocześnie za płuczkę powodującą wzrost momentu obrotowego i sił ciągnięcia. Przeprowadzona próba przemysłowa płuczki krzemianowej sporządzonej na osnowie 5% szkła potasowego, tzw. płuczka krzemianowo-potasowa, potwierdziła tę opinię, a równocześnie wskazała możliwości poprawy jej właściwości smarnych.

Przeprowadzone badania laboratoryjne z wykorzystaniem 3, 5 i 10% roztworów szkła potasowego i sodowego oraz płuczek krzemianowych zawierających 3 i 5% szkła potasowego lub sodowego dowiodły, że na wielkość współczynnika tarcia miały wpływ takie czynniki jak: ilość szkła wodnego, jego rodzaj, temperatura pomiaru, właściwości środków chemicznych stanowiących składniki płuczki oraz materiały obciążające. Podstawowym czynnikiem decydującym o wielkości współczynnika tarcia płuczki jest zawartość szkła, ponieważ ze wzrostem jego ilości wzrastała wartość μ_t , przy czym zależała ona od rodzaju szkła. Najwyższe wartości μ_t posiadały zarówno roztwory szkła potasowego, jak i płuczka sporządzona z jego udziałem. Uzyskane wyniki badań smerności roztworów wodnych

krzemianów i płuczek krzemianowych wykazały konieczność stosowania środków posiadających zdolność do obniżania współczynnika tarcia.

Ocena efektywności działania zastosowanych do badań środków smarnych, tj. GEM GP, olej wiertniczy, Superlub i ECF 313, na podstawie zmian współczynnika tarcia roztworów szkła i płuczek krzemianowych wykazała, że każdy z tych środków powodował obniżenie wartości μ_t badanych cieczy, lecz efektywność działania danego środka zależała od jego właściwości chemicznych, zawartości szkła oraz dodatku materiału obciążającego i skażenia płuczki zwiercinami.

W oparciu o otrzymany wartości współczynnika tarcia, μ_t , płuczek krzemianowych, a głównie płuczek skażonych zwiercinami, wytypowano ECF 313 i Superlub jako środki o dobrych właściwościach smarnych, tworzących także dobre jakościowo warstewki smarne, przeciwdziałające zacieraniu się elementów stalowych, które wymagały stosunkowo wysokich ciśnień nacisku do ich zerwania. Dla warunków otworowych ilości wytypowanych środków powinny być ustalane w oparciu o okresowe, kontrolne pomiary współczynnika tarcia płuczki w trakcie wiercenia otworu.

Literatura

- [1] Alford S., Działowski A., Jiang P., Ullmann H.: *Research Into Lubricity, Formation Damage Promises to Expand Applications for Silicate Drilling Fluids*. SPE 67737, 2001.
- [2] Chudoba J. i in.: *Opracowanie płuczek wiertniczych krzemianowych do przewiercania warstw ilasto-lupkowych w szczególności mikroszczelinowatych*. Dokument. INiG, 1998.
- [3] Dubiel S., Al-Ameri M.: *Moment obrotowy i siły osiowe działające na przewód podczas wiercenia otworów kierunkowych z poziomym odcinkiem – w świetle rozważań teoretycznych*. Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 16, 1999.
- [4] Działowski A., Zamora M.: *Badania właściwości płuczek wiertniczych do wierceń horyzontalnych*. V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, AGH, Kraków 1992.
- [5] Nowotarski I. i in.: *Dobór środków smarnych i przeciwzatarciowych do otworów kierunkowych*. Dokument INiG, 2000.
- [6] Osikowicz R.: *Krytyczne funkcje płynów wiertniczych*. Inżynieria Bezwykopowa, styczeń-marzec 2005.
- [7] Raczkowski J., Chudoba J., Uliasz M.: *Płuczka krzemianowa*. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie. Kraków, 24-25.06.1999. Wyd. AGH, t. 2, s. 123-133.
- [8] Raczkowski J., Półchłópek T.: *Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych*. Prace INiG nr 95, Kraków 1998.
- [9] www.tribologia.org
- [10] Uliasz M. i in.: *Specjalistyczne badania i wdrożenie płuczki krzemianowo-potasowej*. Dokument INiG, 2006.
- [11] Uliasz M. i in.: *Nowe aplikacje w zakresie udostępniania i eksploatacji złóż węglowodorów otworami kierunkowymi i poziomymi. Płuczki wiertnicze w technologii wiercenia otworów kierunkowych i poziomych*. Dokument INiG, 2006.
- [12] Uliasz M., Zima G., Błaż S.: *Płuczka krzemianowo-potasowa i jej zastosowanie w warunkach otworowych*. Wiadomości Naftowe nr 4, 2008.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski



Dr inż. Małgorzata ULIASZ – absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Technologii Wiercenia INiG, Oddział Krosno. Specjalizuje się w tematyce dotyczącej technologii płuczek wiertniczych stosowanych do wiercenia otworów w różnych warunkach geologiczno-złożowych oraz cieczy roboczych do prac związanych z opróbowaniem i rekonstrukcją odwiertów.