

Bartłomiej Jasiński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Określenie dynamicznej filtracji płuczek wiertniczych w warunkach HPHT z użyciem nowatorskiej metody pomiarowej

W artykule przedstawiono analizę skuteczności działania środków ograniczających filtrację dynamiczną płuczek wiertniczych w warunkach HPHT. W toku przeprowadzonych badań sprawdzono działanie trzech środków: środka skrobiowego oraz dwóch rodzajów blokatorów węglanowych. Dodawane były one w różnych koncentracjach do dwóch rodzajów płuczek wiertniczych – płuczki polimerowo-potasowej oraz płuczki glikolowo-potasowej. Badania skuteczności ograniczania filtracji dynamicznej w warunkach HPHT przeprowadzone zostały z wykorzystaniem nowoczesnego aparatu Grace M2200, przy użyciu rdzeni o wielkości porów równej 60 µm. Ponadto określono wpływ badanych środków na podstawowe parametry płuczek wiertniczych. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że najlepszą efektywnością w ograniczaniu filtracji spośród przebadanych kombinacji środków charakteryzował się zestaw: środek A – 3%, środek B – 10%, środek C – 10%. Ponadto wykazano, że filtracja dynamiczna HPHT jest o wiele wyższa od filtracji statycznej, a różnice sięgają kilkuset procent. Zauważono również, że filtracja dynamiczna płuczki glikolowo-potasowej jest niższa niż płuczki polimerowo-potasowej.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, filtracja, filtracja dynamiczna, aparat M2200.

Determination of dynamic filtration of drilling muds under HPHT conditions using an innovative measurement method

The article presents an analysis of the effectiveness of fluid loss agents in drilling muds under HPHT conditions. During the course of the tests, three agents were tested: starch and two types of carbonate blockers. They were added in different concentrations to two types of drilling muds: polymer-potassium mud and glycol-potassium mud. Research on the effectiveness of reducing dynamic filtration in HPHT was carried out using a modern apparatus Grace M2200, and 60 µm pore size cores. In addition, the impact of the investigated agents on the basic parameters of drilling muds was determined. The obtained results allow to conclude, that the best efficiency in reducing the filtration among the tested combinations of agents, had the set containing the following agents: agent A – 3%, agent B – 10%, agent C – 10%. In addition, it has been demonstrated that dynamic filtration HPHT is much higher than static filtration, and the differences reach several hundred percent. Moreover, it was noted that the dynamic filtration of glycol-potassium drilling mud is lower than the filtration of polymer-potassium drilling mud.

Key words: drilling mud, filtration, dynamic filtration, M2200 apparatus.

Wprowadzenie

Wiercenie otworów w warunkach wysokich temperatur i ciśnień wymaga wykorzystania zaawansowanych systemów płuczek wiertniczych, w których szczególną uwagę należy zwrócić na dobór odpowiednich materiałów i środków chemicznych. Wymagania dotyczące płuczek wiertniczych, w szczególności stosowanych do dowiercania złóż w warunkach HPHT, to przede wszystkim zapewnienie, by uszkodze-

nia strefy przyotworowej były jak najmniejsze, ustalenie odpowiednich parametrów reologicznych umożliwiających zawieszenie materiału obciążającego, odpowiednich właściwości inhibitacyjnych, smarnych oraz niskiej filtracji. Ważne jest również utrzymywanie jak najniższej wartości filtracji płuczki wiertniczej, dlatego że w wyniku kontaktu przewierczanych skał, przede wszystkim iłowców i mułowców, z filtrem

płuczki może nastąpić przyspieszenie erozji ściany otworu wiertniczego, co w konsekwencji może prowadzić do zmniejszenia jej stabilności. Ponadto przedostanie się do skały dużej ilości filtratu może powodować zmniejszenie przepuszczalności strefy przyotworowej złoża. Kolejnym negatywnym czynnikiem jest powstawanie zbyt grubego osadu filtracyjnego, który powoduje nadmierne zaciąganie, przychwytywanie przewodu wiertniczego w wyniku ciśnienia różnicowego oraz nagłe wzrosty ciśnienia w otworze i tłokowanie. Jednym ze sposobów zapobiegania tym zjawiskom jest wykorzystanie w składzie płuczek wiertniczych środków pozwalają-

cych na stworzenie szczelnego, słabo przepuszczalnego osadu filtracyjnego.

Badania filtracji płuczek wiertniczych prowadzone od wielu lat przyczyniają się do coraz lepszego poznania tego zjawiska. Nowoczesne urządzenia pomiarowe, pozwalające prowadzić badania w warunkach otworopodobnych pomagają dokładniej zrozumieć procesy zachodzące w otworze. Jednym z takich urządzeń jest wielofunkcyjny symulator wiercenia Grace M2200, który od niedawna znajduje się na wyposażeniu Zakładu Technologii Wiercenia Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego.

Filtracja płuczek wiertniczych

Filtracją nazywa się odfiltrowanie płynu (najczęściej wody i rozpuszczonych w niej substancji chemicznych) z płuczki wiertniczej do przewierczanych formacji skalnych. Zjawisko filtracji ma miejsce, gdy płuczka wiertnicza wywiera ciśnienie na ścianę otworu wiertniczego oraz gdy przepuszczalność danej formacji pozwala na wnikanie płynu w otwartą przestrzeń komunikujących się porów. Jeżeli otwarta przestrzeń porowa jest wystarczająco duża, pierwszym efektem jest nagłe wtargnięcie w nią płuczki poprzez ścianę otworu wiertniczego. Dalszą część wnikającego płynu powoduje tworzenie się coraz grubszego osadu na ścianie otworu wiertniczego. Osad składa się z naturalnej fazy stałej pochodzącej z przewierczanych warstw oraz z fazy stałej dodatków, dodawanych przy sporządzaniu i obróbce płuczki. Ze względu na właściwości osadu filtracyjnego, ważniejsze jest, jaki kształt, rozmiar i rozmieszczenie ma faza stała, niż jaka jest jej zawartość [4, 10, 11]. Źle dobrany skład oraz niewłaściwe parametry płuczki wiertniczej mogą skutkować powstaniem osadu filtracyjnego złej jakości (zbyt grubego), co z kolei prowadzi do nadmiernej szybkości infiltrowania płynu w porowatą skałę oraz zbyt wysokiej objętości filtratu. Może to być przyczyną następujących problemów w otworze:

- zawężenia w otworze prowadzącego do powstania zjawiska zaciągania,
- nagłych wzrostów ciśnienia w czasie zapuszczania przewodu spowodowanych zmniejszeniem średnicy otworu,
- zwiększenia ciśnienia różnicowego, prowadzącego do przyklejenia przewodu poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu w grubym osadzie,
- gorszej jakości cementowania spowodowanej niecałkowitym wytłoczeniem płuczki oraz obecnością zbyt grubego osadu,
- nadmiernej inwazji filtratu i zbyt grubej warstwy osadu stwarzających trudności w prawidłowej ocenie złoża.

Jak widać, większość wymienionych problemów jest pochodną zbyt grubego osadu filtracyjnego na ścianie otworu. Nadmierna filtracja rzutuje również na jakość i ocenę złoża.

Kiedy do złoża wniknie znaczna objętość filtratu, płyny złożowe mogą zostać odepchnięte ze strefy okołotworowej na taką odległość, że pomiary geofizyczne dadzą fałszywe wyniki. Również podczas opróbowywania, można uzyskać przypływ filtratu, który nie pozwala na właściwą ocenę rzeczywistego płynu w złożu. Jeżeli w złożu występują ily, woda z filtratu może powodować pęcznienie cząstek ilastych lub ich dyspersję, powodując tym samym ograniczenie przepuszczalności. Aby uniknąć problemów, przy wierceniu i udostępnianiu złoża, spowodowanych dużą filtracją, należy kontrolować osad – powinien on być jak najcieńszy i najmniej przepuszczalny [4, 5, 10, 11, 20].

Znane są dwa rodzaje filtracji: dynamiczna i statyczna. Filtracja dynamiczna ma miejsce, gdy płuczka znajduje się w ruchu – w systemie cyrkulacyjnym. Filtracja statyczna natomiast występuje, gdy cyrkulacja płuczki jest zatrzymana. Filtracja dynamiczna różni się od filtracji statycznej tym, że przepływ płuczki wzdłuż ściany otworu wiertniczego może powodować erozję osadu utworzonego w wyniku procesu filtracji. Osad na ścianie otworu powiększa się w wyniku filtracji aż do momentu, gdy szybkość jego tworzenia i szybkość erozji, nawzajem się równoważą. Gdy grubość osadu osiągnie stan równowagi, szybkość filtracji utrzymać się będzie na stałym poziomie. Przeciwnie jest w wypadku filtracji statycznej, przy której osad powiększa się stale wraz z upływem czasu. Równocześnie szybkość filtracji statycznej jest niższa niż dynamicznej. Dlatego też w procesie wiercenia otworu ważne jest aby regulować obie wartości: filtrację dynamiczną w celu kontroli ilości filtratu przechodzącego do formacji skalnej oraz filtrację statyczną, aby zapobiec tworzeniu zbyt grubego osadu.

Ważnymi czynnikami mającymi wpływ na wielkość filtracji są czas jej trwania oraz wielkość ciśnienia. Zgodnie z normą PN-EN ISO 10414-1, czas trwania pomiaru filtracji powinien wynosić 30 min. Przyjmuje się, że zależność objętości uzyskanego filtratu od czasu pomiaru można opisać następującym równaniem:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \sqrt{\frac{t_2}{t_1}} \quad (1)$$

gdzie:

Q_2 – nieznaną objętość filtratu zmierzona w czasie t_2 [cm³],

Q_1 – znana objętość filtratu zmierzona w czasie t_1 [cm³] [11].

Można zauważyć, że objętość filtratu wzrasta wprost proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego czasu pomiaru.

Ciśnienie jest kolejnym czynnikiem wpływającym na filtrację. Badanie filtracji tej samej płuczki przy różnych ci-

śnieniach powoduje uzyskanie dwóch różnych wyników, proporcjonalnych do pierwiastka ilorazu wartości ciśnienia pomiaru:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad (2)$$

gdzie:

Q_2 – nieznaną objętość filtratu zmierzona przy ciśnieniu p_2 [cm³],

Q_1 – znana objętość filtratu zmierzona przy ciśnieniu p_1 [cm³],

p_1 – ciśnienie, przy którym uzyskano objętość filtratu Q_1 [Pa],

p_2 – ciśnienie, przy którym uzyskano objętość filtratu Q_2 [Pa] [11].

Dodatki regulujące filtrację

W technologii płuczkowej substancje ograniczające filtrację w płuczkach wodnodispersyjnych można podzielić na trzy główne grupy:

- środki pochodzenia mineralnego, takie jak ility, blokatory węglanowe lub nanomateriały,
- środki pochodzenia roślinnego, m.in. środki skrobiowe, środki celulozowe, zmielone łupiny,
- syntetyczne polimery.

Ility

Przez długi czas podstawowym środkiem do regulacji filtracji dla większości płuczek wiertniczych wodnodispersyjnych była faza stała w postaci ility. Punktem wyjściowym do dobrej regulacji filtracji jest odpowiedni rozkład wymiarów cząstek w płuczce. Płuczka zawiera zróżnicowane pod względem wielkości cząstki, a duża ich część ma rozmiary mniejsze lub równe mikronowi. W efekcie tak małych rozmiarów cząstek wnikaających w wolne przestrzenie osadu filtracyjnego, ma on niską porowatość i przepuszczalność. Il przemysłowy (bentonit) nie tylko powoduje obniżenie filtracji płuczek wiertniczych, wpływa również na podwyższenie lepkości płuczki [4, 11, 12].

Blokatory węglanowe

Węglan wapnia (CaCO₃) występuje w przyrodzie jako składnik wielu minerałów (m.in. kalcyt) oraz skał (dolomit, kreda, marmur). Jako środek stosowany w technologii płuczkowej pozyskiwany jest przez zmielenie marmuru. Blokatory węglanowe występują w różnej ziarnistości, od kilku mikrometrów aż do 3 mm. Odpowiednio dobrany rozmiar ziaren umożliwia uszczelnienie osadu filtracyjnego, skutecznie ograniczając migrację płynu i fazy stałej w głąb skał zbiornikowych w strefie przyotworowej. Z uwagi na zróżnicowaną wielkość cząstek, obojętność chemiczną produktu oraz łatwość usuwania ze ściany odwiertu, blokatory węglanowe są powszechnie stosowane nie tylko jako środki ograniczające

filtrację, ale również jako materiały obciążające płyny wiertnicze do gęstości 1,5 g/cm³ [17–19].

Nanomateriały

Wśród stosowanych obecnie płuczek wiertniczych stosuje się tzw. inteligentne systemy płuczkowe. Są to ciecz nano, w których zawarte są cząstki w rozmiarze nanometrów. W zależności od liczby dodatków nanowymiarowych, można dokonać podziału płuczek na proste ciecz nano oraz zaawansowane ciecz nano. Płuczki zawierające w swoim składzie jeden rodzaj nanocząstek nazywane są prostymi nanopłuczki, natomiast płuczki zawierające więcej niż jeden rodzaj nanocząstek definiowane są jako zaawansowane nanopłuczki [1, 2, 22]. Jednym z najczęściej wykorzystywanym w przemyśle nanomateriałem jest ditlenek krzemu (krzemionka SiO₂). Dostępność tego materiału oraz specyficzne właściwości przyczyniły się do jego szerokiego wykorzystania. Jest on trwały w wodzie w podwyższonych temperaturach, a dodatkowo to dobry izolator. Krzemionka jest chemicznie inerta i ulega reakcjom jedynie z wrzącymi, stężonymi roztworami wodnymi KOH i NaOH, stopionymi Na₂CO₃ i K₂CO₃ oraz fluorowodem lub jego wodnymi roztworami. Średnica nanocząstek ditlenku krzemu produkowanego w przemyśle najczęściej zawiera się w przedziale od 5 do 1000 nm, a ich powierzchnia właściwa może sięgać do około 500 m²/g [10, 13–15]. Badania przeprowadzone przez M. Adela i innych [3, 6, 13–15] potwierdzają wysoką skuteczność nanomateriałów w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych oraz zmniejszaniu uszkodzenia naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych.

Skrobia

Jeżeli wykorzystanie koloidów mineralnych nie daje zadowalających wyników można użyć do obniżenia filtracji koloidów organicznych, takich jak skrobia. Podstawowymi źródłami pozyskiwania skrobi dla potrzeb przemysłu naftowego są kukurydza i ziemniaki. Odpowiednio spreparowane

włókna skrobiowe zapewniają maksymalne obniżenie filtracji przez szybkie pęcznienie oraz zdolność do żelowania. Proces ten zachodzi zarówno w wodzie słodkiej, jak i słonej, bez względu na temperaturę i pH. Pod wpływem wody i ciepła ziarna skrobi ulegają rozerwowaniu, a uwolniona amylaza w szybkim tempie absorbuje wodę, a następnie pęcznieje w workowate kształty przypominające swoją strukturą gąbkę. Zaabsorbowanie otaczającej wolnej wody powoduje zmniejszenie filtracji. Ponadto spęczniałe cząstki skrobiowe wypełniają wolne przestrzenie w osadzie filtracyjnym, zmniejszając filtrację [4, 11].

Karboksymetyloceluloza (KMC)

KMC jest koloidem organicznym stosowanym przy regulacji filtracji. Struktura KMC składa się z długich łańcuchów molekuł, które mogą ulegać polimeryzacji, tworząc struktury o odmiennych długościach. Istnieje kilka teorii wyjaśniających mechanizm obniżania filtracji przez karboksymetylocelulozę:

- klinowanie się długich łańcuchów polimerów w porach osadu filtracyjnego,
- zwijanie długich łańcuchów w kule, które stają się elementem uszczelniającym osad filtracyjny,
- pokrywanie cząstek fazy stałej cienką warstwą,
- zwiększenie lepkości fazy wodnej [4, 11].

W pierwszym etapie badań wytypowane zostały trzy środki o właściwościach ograniczających filtrację płuczek wiertniczych:

- środek skrobiowy A,
- blokator węglanowy B,
- blokator węglanowy C.

Kolejnym krokiem był dobór płuczek wiertniczych, stosowanych obecnie do głębokich wierceń w warunkach HPHT, które miały być modyfikowane przez dodatek środków ograniczających filtrację. Wybrano płuczki o podwójnym inhibowaniu polimerowo-jonowym: płuczkę polimerowo-potasową oraz płuczkę glikolowo-potasową. Obydwa rodzaje płuczek wykorzystanych w badaniach laboratoryjnych opierały się na tym samym zestawie polimerów strukturotwórczych. Były to: PAC LV, PAC R, XCD oraz Polofix LV. Podobnie w obydwu rodzajach płuczek jednym z użytych inhibitorów hydratacji łupków był chlorek potasu, który pełnił funkcję jonowego inhibitora hydratacji skał ilastych. W płuczce glikolowo-potasowej rolę inhibitora polimerowego odgrywał dwuskładnikowy układ blokowego kopolimeru tlenku etylenu i tlenku propylenu w połączeniu z oksyetylenowanym trójglicerydem kwasu

Polianionowa celuloza (PAC)

Jest to środek organiczny obniżający filtrację przeznaczony głównie do płuczek z dużą koncentracją soli i niską zawartością fazy stałej. Składa się z polianionowych, długich łańcuchów polimerowych o wysokim ciężarze molekularnym [4, 11].

Zmielone łuski babki jajowatej

Badania przeprowadzone przez A. Salmachi i innych [16, 21] dowodzą, że efektywnym środkiem obniżającym filtrację płuczek wiertniczych mogą być zmielone łuski ziaren, pochodzące z rośliny o nazwie babka jajowata. Do tej pory łuski babki jajowatej były szeroko stosowane w medycynie i przemyśle spożywczym. W pracy [16] oceniono efektywność tego środka jako przyjaznego dla środowiska dodatku do płuczek wodnodispersyjnych. Stwierdzono, że stężenie wynoszące 0,75÷1% zmielonych łusek nadaje cieczy właściwości reologiczne, równoważne wykorzystaniu 5% bentonitu. Środek dodany do wody bardzo szybko dysperguje, tworząc żelową strukturę. Przeprowadzone badania wykazały, że roztwór o stężeniu 1% środka charakteryzował się 13-proc. obniżeniem filtracji w stosunku do roztworu bentonitu o stężeniu 5%. Oprócz tworzenia żelowej struktury absorbującej wolną wodę z otoczenia, nierozpuszczalne części łusek tworzą bardzo cienki płacek filtracyjny, który blokując duże pory przyczynia się do ograniczenia filtracji.

Zakres badań

W przypadku płuczki polimerowo-potasowej funkcję inhibitora polimerowego pełni częściowo hydrolyzowany poliakryloamid (PHPA).

W kolejnym etapie realizacji zadania określono wpływ badanych środków ograniczających filtrację na podstawowe parametry technologiczne płuczek, takie jak: właściwości reologiczne, gęstość, filtracja API, pH. Ponadto płuczki poddano badaniu reometrem Anton Paar MCR 301, polegającym na zmierzeniu parametrów reologicznych płuczek w zakresie temperatur 20°C – 100°C – 20°C, w odstępach co 20°C. Uzyskane w ten sposób wyniki posłużyły do oszacowania wytrzymałości termicznej badanych płuczek.

Następnie mierzono wartość filtracji dynamicznej w warunkach HPHT z użyciem wielofunkcyjnego symulatora wiercenia Grace M2200 w płuczках wyjściowych oraz w płuczках z dodatkiem poszczególnych środków ograniczających filtrację. Do badania filtracji użyte zostały rdzenie, których średnica porów wynosiła 60 μm. Pomiary przeprowadzane były w temperaturze 100°C, czyli w warunkach zbliżonych do tych panujących w głębokich otworach.

Pomiar filtracji dynamicznej w warunkach HPHT

Do pomiaru filtracji dynamicznej wykorzystano unikatowy na skalę światową aparat Grace M2200 HPHT. Umożliwia on przeprowadzenie pomiaru smarności i filtracji dynamicznej płuczek wiertniczych w symulowanych warunkach otworowych. Dodatkową funkcją jest pomiar szybkości wiercenia w rzeczywistych próbkach skał przy pomocy miniaturowego świdra wiertniczego. Aparat umożliwia realistyczne symulowanie warunków otworowych dzięki dużemu zakresowi temperatury roboczej (do 260°C) oraz ciśnienia (do 13,8 MPa). Obsługa odbywa się przy użyciu nowoczesnego oprogramowania komputerowego M2200 PC.

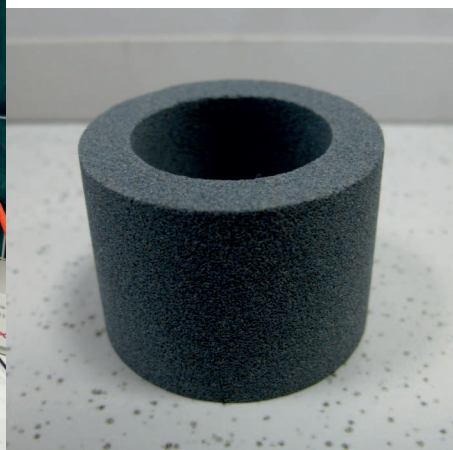


Fot. 1. Aparat Grace M2200 HPHT

Podczas pomiaru filtracji dynamicznej, na płuczkę wiertniczą oddziałuje ciśnienie, co powoduje wnikanie filtratu w cylindryczny rdzeń wykonany z porowatego materiału. Filtrat ten przenika przez ściankę rdzenia, skąd wtłaczany jest do kolumny pomiarowej, powodując przesunięcie się tłoczka, którego ruch jest ciągle rejestrowany przez urządzenie. Na podsta-

wie aktualnego położenia tłoczka w kolumnie obliczana jest objętość filtratu. W trakcie trwania pomiaru, wewnątrz otworu rdzenia z zadaną prędkością wiruje rotor symulujący przewód wiertniczy w otworze wiertniczym. Całość jest zamknięta w szczelnej komorze, która z kolei otoczona jest płaszczem podgrzewającym cały układ do zadanej temperatury.

Pomiar filtracji dynamicznej płuczki wiertniczej rozpoczął się od umieszczenia porowatego rdzenia pierścieniowego w uchwycie, gdzie następnie został doszczelniony gumowymi uszczelkami. Rdzenie użyte podczas badań charakteryzowały się średnicą porów równą 60 μm . Po umieszczeniu rdzenia w uchwycie zabezpieczano go poprzez dokręcenie stałym pierścieniem, uniemożliwiającym przesunięcie lub obrót próbki. Następnie uchwyt z zamocowanym rdzeniem wkręcano do komory, do której nalewano 325 cm^3 badanej płuczki. Całość była przykręcana do gniazda aparatu, gdzie na wale



Fot. 2. Rdzeń pierścieniowy o średnicy porów 60 μm

obrotowym zamocowany był rotor. Kolejnym krokiem było przygotowanie w programie M2200 PC odpowiedniej sekwencji kroków pomiarowych, czyli zadanie wymaganej temperatury do jakiej podgrzana ma być płuczka oraz obrotów rotora. Po osiągnięciu wymaganej temperatury, za pomocą pokręteł umieszczonych na obudowie aparatu regulowano ciśnienie oddziałujące na płuczkę znajdującą się w komorze pomiarowej oraz przeciwcisnienie w kolumnie pomiarowej. Ciśnienia uzyskiwane są z butli z azotem. Badania przeprowadzone w toku realizacji pracy

charakteryzowały się następującymi parametrami:

- średnica porów rdzenia pierścieniowego – 60 μm ,
- temperatura płuczki – 100°C,
- ciśnienie płuczki – 100 psi (0,69 MPa),
- prędkość obrotowa rotora – 250 obr./min.,
- czas pomiaru – 30 min.

Omówienie wyników badań

Bazowa płuczka polimerowo-potasowa oznaczona została cyfrą 1. Charakteryzowała się lepkością plastyczną równą 66,1 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, lepkością pozorną o wartości 106,8 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ oraz granicą płynięcia wynoszącą 39,0 Pa. Ponadto gęstość płuczki wynosiła 1,04 g/cm^3 , a filtracja API – 6,4 cm^3 . Podniesienie temperatury płuczki do 100°C spowodowało, że lepkość plastyczna i lepkość pozorna uległy obniżeniu do wartości

odpowiednio 26,3 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ i 36,7 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, natomiast granica płynięcia wynosiła 9,8 Pa. Skład płuczki bazowej modyfikowano poprzez dodatek środków B i C w różnych stężeniach, a powstałe w ten sposób płuczki oznaczono cyframi 2–7. Ich skład i parametry przedstawiono w tabelicy 1.

Płuczkę glikolowo-potasową przygotowano na podstawie tego samego zestawu polimerów strukturotwórczych, jakim

Tablica 1. Skład oraz parametry płuczek polimerowo-potasowych modyfikowanych środkami ograniczającymi filtrację

Nr płuczki	Skład płuczki wiertniczej		Lepkość [mPa · s]				Granica płynięcia [Pa]		Wytrzymałość strukturalna I/II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}		η_s		τ_y				
			20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C			
1.	Biostat PAC LV PAC R XCD Polofix LV Stabpol S KCl + Środek A	0,10% 0,50% 0,20% 0,25% 0,75% 0,30% 5,00% 3,00%	66,1	26,3	106,8	36,6	39,0	9,8	5,9 / 7,6	6,4	9,4
2.	Płuczka 1 + Środek B	5,00%	67,2	27,4	108,8	37,9	39,7	9,9	6,6 / 7,8	5,2	9,2
3.	Płuczka 1 + Środek B	10,00%	72,3	28,2	11,6	37,6	44,2	8,9	6,6 / 7,8	4,6	9,1
4.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	5,00% 5,00%	69,4	27,4	109,8	38,2	38,6	10,3	7,0 / 8,4	5,0	9,1
5.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	5,00% 10,00%	74,7	27,6	113,7	37,8	37,3	9,6	7,8 / 9,4	4,8	9,2
6.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	10,00% 5,00%	72,7	25,9	112,7	33,7	38,2	7,5	5,9 / 7,5	3,7	9,1
7.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	10,00% 10,00%	7,7	26,1	119,6	34,7	39,0	8,2	8,1 / 9,9	3,2	9,3

charakteryzowała się płuczka polimerowo-potasowa. W jej składzie znajdował się dodatek oksyetylenowanego trójglicerydu kwasu rycynolowego (R26) w stężeniu 1% oraz blokowy kopolimer tlenku etylenu i tlenku propylenu (R2100) w stężeniu 3%. Tak otrzymana płuczka oznaczona została cyfrą 8 i nazywana jest dalej bazową płuczka glikolowo-potasową. Cechowała się ona lepkością plastyczną równą 55,5 mPa · s, lepkością pozorną o wartości 85,3 mPa · s oraz granicą płynięcia wynoszącą 28,5 Pa. Ponadto gęstość płuczki wynosiła 1,04 g/cm³, a filtracja API – 5,8 cm³. Podniesienie temperatury płuczki do 100°C spowodowało, że lepkość plastyczna i lepkość pozorną uległy obniżeniu do wartości, odpowiednio: 23,1 mPa · s i 32,5 mPa · s, natomiast granica płynięcia wynosiła 8,9 Pa. Skład i parametry płuczki bazowej oraz jej modyfikacji środkami ograniczającymi filtrację przedstawiono w tablicy 2.

nięcia wynoszącą 28,5 Pa. Ponadto gęstość płuczki wynosiła 1,04 g/cm³, a filtracja API – 5,8 cm³. Podniesienie temperatury płuczki do 100°C spowodowało, że lepkość plastyczna i lepkość pozorną uległy obniżeniu do wartości, odpowiednio: 23,1 mPa · s i 32,5 mPa · s, natomiast granica płynięcia wynosiła 8,9 Pa. Skład i parametry płuczki bazowej oraz jej modyfikacji środkami ograniczającymi filtrację przedstawiono w tablicy 2.

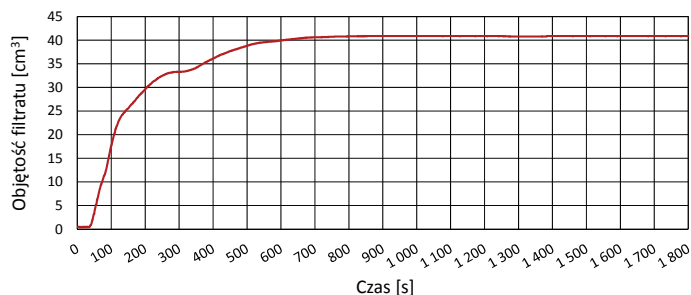
Tablica 2. Skład oraz parametry płuczek glikolowo-potasowych modyfikowanych środkami ograniczającymi filtrację

Nr płuczki	Skład płuczki wiertniczej		Lepkość [mPa · s]				Granica płynięcia [Pa]		Wytrzymałość strukturalna I/II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}		η_s		τ_y				
			20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C			
8.	Biostat PAC LV PAC R XCD Polofix LV R26 R2100 KCl + Środek A	0,10% 0,50% 0,20% 0,25% 0,75% 1,00% 3,00% 5,00% 3,00%	55,5	23,1	85,3	32,5	28,5	8,9	5,0 / 6,9	5,8	9,5
9.	Płuczka 1 + Środek B	5,00%	54,3	23,1	83,9	33,4	28,3	9,8	5,4 / 7,9	4,4	9,4

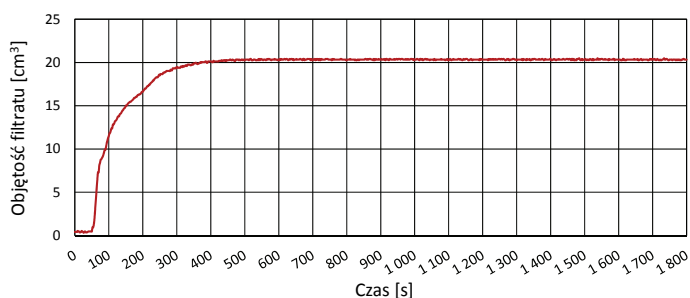
cd. Tablica 2

Nr płuczki	Skład płuczki wiertniczej		Lepkość [mPa · s]				Granica płynięcia [Pa]		Wytrzymałość strukturalna I/II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}		η_s		τ_y				
			20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C			
10.	Płuczka 1 + Środek B	10,00%	55,7	24,9	88,7	34,1	31,6	8,8	5,7 / 7,6	3,4	9,4
11.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	5,00% 5,00%	56,8	23,7	86,8	33,7	28,7	9,6	5,3 / 7,4	4,0	9,3
12.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	5,00% 10,00%	61,3	22,0	89,6	31,2	27,0	9,4	7,1 / 8,9	3,8	9,3
13.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	10,00% 5,00%	70,6	26,3	104,9	36,0	32,8	9,3	7,4 / 12,1	2,6	9,3
14.	Płuczka 1 + Środek B + Środek C	10,00% 10,00%	68,4	24,3	102,9	34,7	33,0	9,9	7,6 / 13,0	2,5	9,3

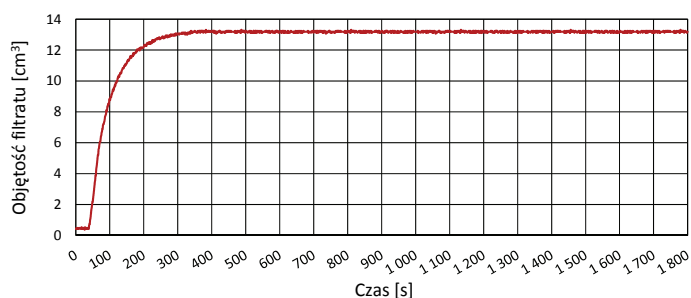
Na rysunkach 1–7 przedstawiono wykresy objętości filtratu w funkcji czasu, uzyskanych podczas badań płuczek polimerowo-potasowych. Analizując wykresy, można stwierdzić, że we wszystkich przypadkach początkowe minuty pomiaru cechowały się dużą dynamiką narastania objętości filtratu. Następnie zaczynał się etap budowania osadu filtracyjnego na ścianie rdzenia pomiarowego, co na wykresach widać wyraźnie po coraz mniejszym tempie narastania objętości filtratu. Gdy osad stawał się nieprzepuszczalny dla filtratu, krzywe stabilizowały się na pewnym poziomie.



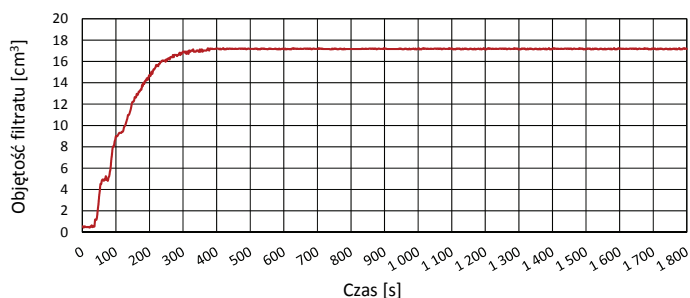
Rys. 1. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 1 w funkcji czasu



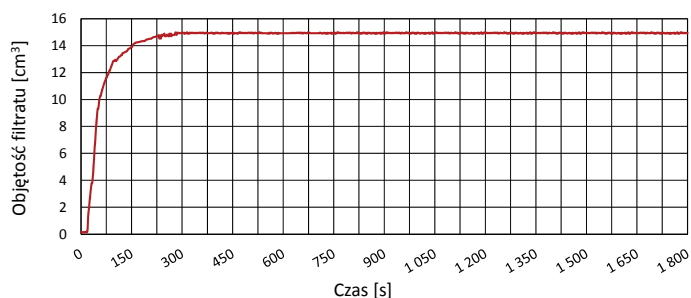
Rys. 2. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 2 w funkcji czasu



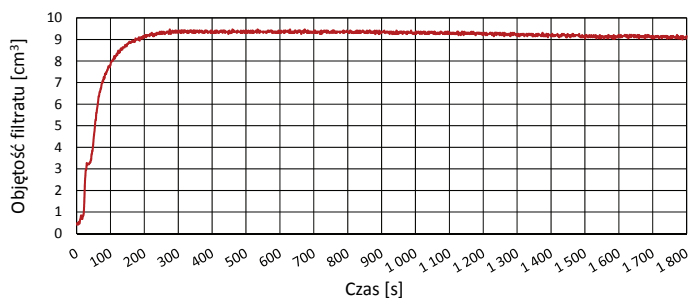
Rys. 3. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 3 w funkcji czasu



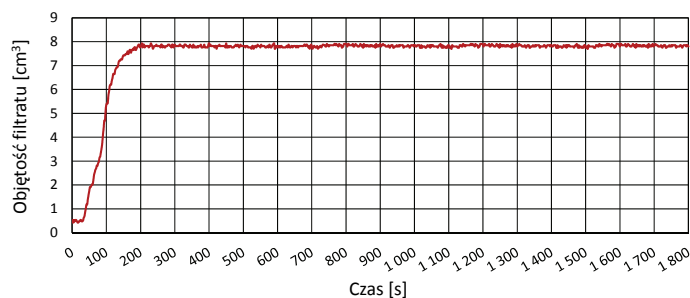
Rys. 4. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 4 w funkcji czasu



Rys. 5. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 5 w funkcji czasu



Rys. 6. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 6 w funkcji czasu



Rys. 7. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 7 w funkcji czasu

W tabelicy 3 zestawiono wyniki pomiarów filtracji dynamicznej HPHT płuczek 1–7, przeprowadzonych z użyciem aparatu M2200. Bazowa płuczka polimerowo-potasowa (płuczka 1) charakteryzowała się filtracją równą 40,9 cm³.

Największą efektywność w ograniczaniu filtracji zapewniała płuczka 7. Miała ona w swoim składzie aż 20% blokatorów węglanowych (10% środka B oraz 10% środka C), a wartość filtracji po 30 min. wynosiła 7,8 cm³, czyli o 80,9% mniej niż w płuczce bazowej. Z kolei najmniej efektywna była płuczka 2, mająca w składzie 5% środka B, której filtracja miała wartość 20,3 cm³ – o 50,4% mniej niż w płuczce bazowej. Z tabelicy 3 można również odczytać czas powstania nieprzepuszczalnego osadu filtracyjnego w poszczególnych płuczках. Najdłuższy czas, około 800 s, odnotowano podczas badania płuczki bazowej. Najkrótszym czasem (około 200 s) charakteryzowała się płuczka 7, zawierająca 20% blokatorów.

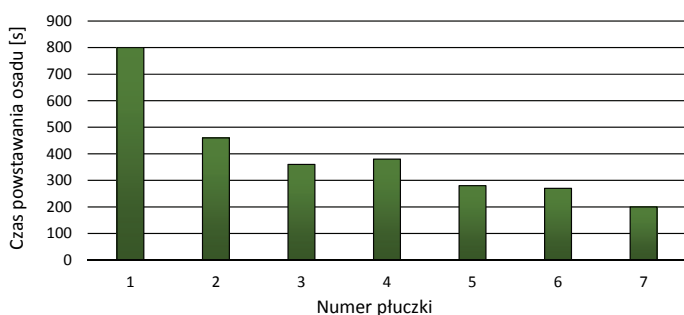
Tabelica 3. Filtracja dynamiczna HPHT oraz czas budowania osadu w płuczках polimerowo-potasowych

	Nr płuczki						
	1	2	3	4	5	6	7
Filtracja dynamiczna HPHT [cm ³]	40,9	20,3	13,2	17,2	14,9	9,1	7,8
Zmiana [%]	–	–50,4	–67,7	–57,9	–63,6	–77,8	–80,9
Czas budowania osadu filtracyjnego [s]	800	460	360	380	280	270	200
Zmiana [%]	–	–42,5	–55,0	–52,5	–65,0	–66,3	–75,0

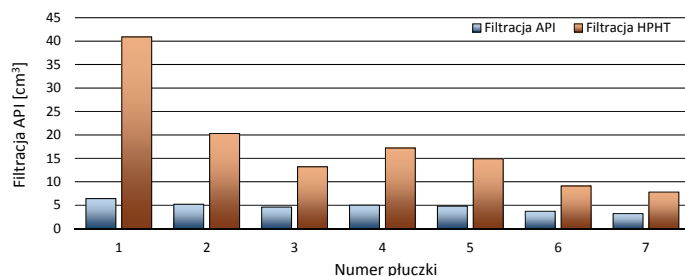
Tabelica 4. Porównanie wyników badania filtracji API w 20°C oraz dynamicznej filtracji HPHT w 100°C płuczek 1–7

	Nr płuczki						
	1	2	3	4	5	6	7
Filtracja API [cm ³]	6,4	5,2	4,6	5,0	4,8	3,7	3,2
Filtracja HPHT [cm ³]	40,9	20,3	13,2	17,2	14,9	9,1	7,8

Wartości filtracji dynamicznej były zdecydowanie wyższe niż wartości filtracji API, można jednak zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości substancji ograniczających filtrację różnica staje się coraz mniejsza. W płuczce 1, w której nie było blokatorów węglanowych, filtracja dynamiczna miała wartość 40,9 cm³, a więc była o 540% wyższa od filtracji API. Z kolei w płuczce 7 filtracja dynamiczna było wyższa od filtracji API o około 144%.



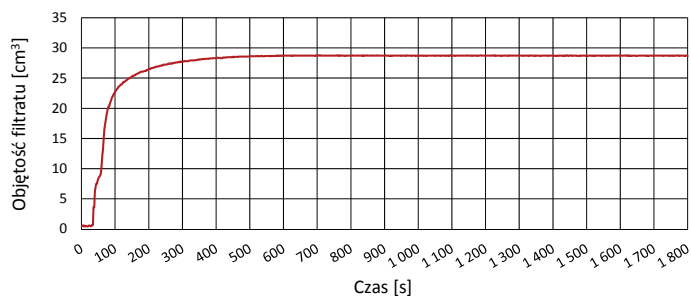
Rys. 8. Czas budowania nieprzepuszczalnego osadu w płuczках 1–7



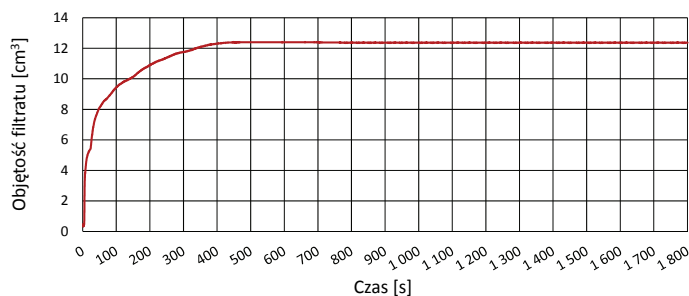
Rys. 9. Graficzne porównanie wyników badania filtracji API oraz dynamicznej filtracji HPHT płuczek 1–7

W tabelicy 4 oraz na rysunku 9 zestawiono ze sobą wyniki pomiaru filtracji statycznej API w temperaturze 20°C z wynikami pomiaru filtracji dynamicznej HTHP w temperaturze 100°C.

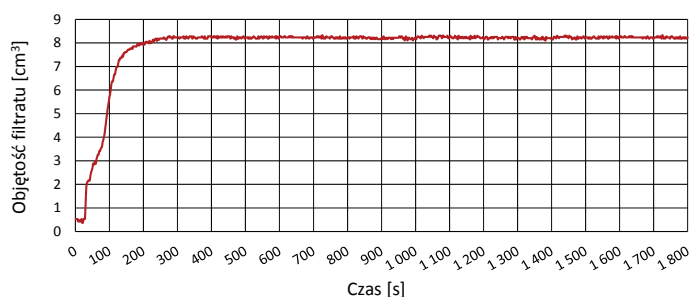
Na rysunkach 10–16 przedstawiono wykresy objętości filtratu uzyskanego z płuczek glikolowo-potasowych. Analogicznie do badań przeprowadzonych na płuczках polimerowo-potasowych, tutaj również można zaobserwować etap



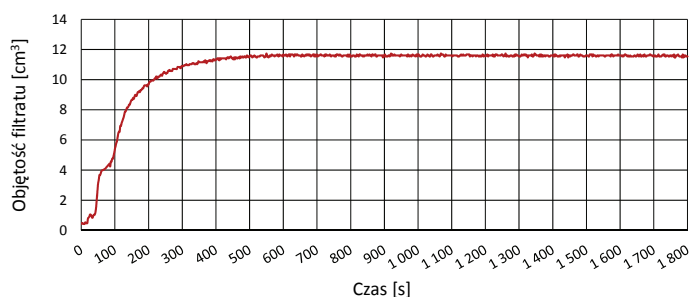
Rys. 10. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 8 w funkcji czasu



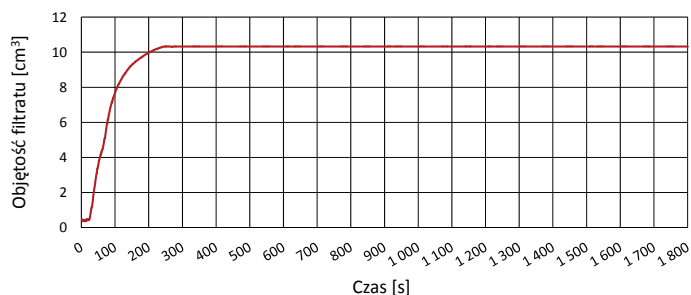
Rys. 11. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 9 w funkcji czasu



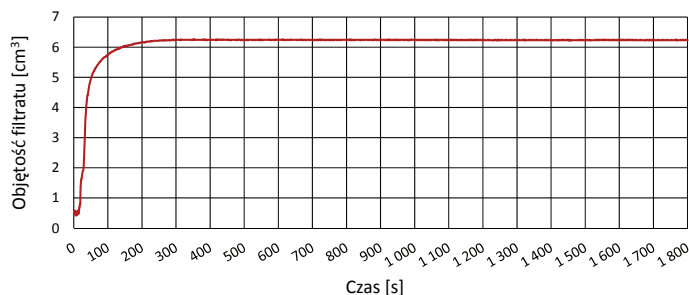
Rys. 12. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 10 w funkcji czasu



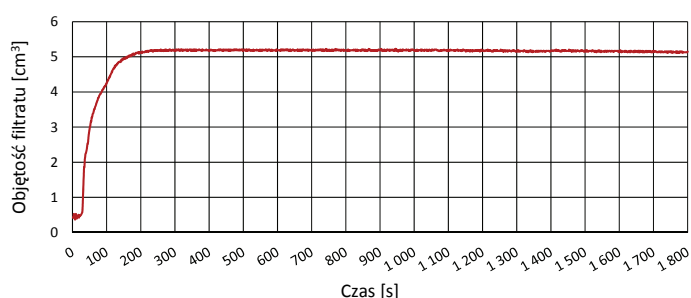
Rys. 13. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 11 w funkcji czasu



Rys. 14. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 12 w funkcji czasu



Rys. 15. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 13 w funkcji czasu

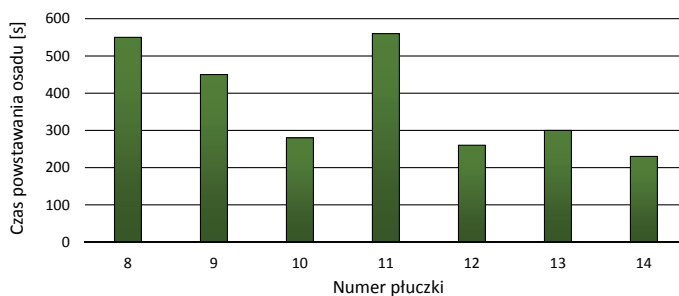


Rys. 16. Krzywa przyrostu objętości filtratu uzyskanego z płuczki 14 w funkcji czasu

dynamicznego wzrostu objętości filtratu, następnie etap tworzenia się osadu filtracyjnego, który następnie po uzyskaniu całkowitej szczelności blokuje dalsze wnikanie fazy wodnej z płuczek wiertniczych.

W tabelicy 5 zestawiono wyniki pomiarów filtracji dynamicznej HPHT płuczek 8–14. Płuczka nr 8, do której odnoso-

no pozostałe wyniki, cechowała się filtracją równą $28,7 \text{ cm}^3$. Najniższą wartość filtracji odnotowano podczas pomiaru płuczki nr 14. Było to $5,2 \text{ cm}^3$, czyli o 81,9% mniej niż w płuczce bazowej. Najmniej efektywna była płuczka 9, mająca w składzie 5,0% środka B, której filtracja miała wartość $12,4 \text{ cm}^3$ – o 56,8% mniej niż w płuczce bazowej.



Rys. 17. Czas powstawania nieprzepuszczalnego osadu filtracyjnego w płuczках 8–14

Najdłuższy czas powstania nieprzepuszczalnego osadu filtracyjnego odnotowano podczas badania płuczki 11, było to około 560 s, a więc więcej niż w płuczce bazowej. Najkrótszym czasem (około 230 s) charakteryzowała się płuczka 14, zawierająca 20% blokatorów.

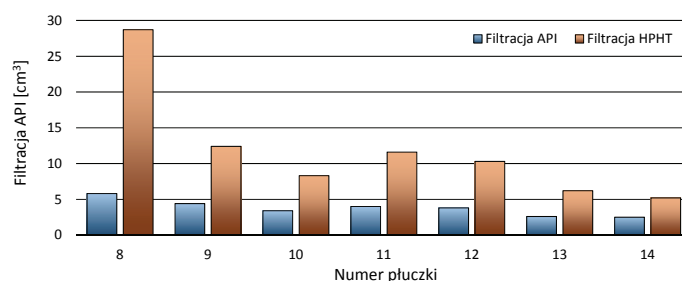
W tabelicy 6 oraz na rysunku 18 zestawiono ze sobą wyniki pomiaru filtracji statycznej API w temperaturze 20°C z wynikami pomiaru filtracji dynamicznej HPHT w temperaturze 100°C. Podobnie jak miało to miejsce podczas badania płuczek polimerowo-potasowych, wartości filtracji dynamicznej były zdecydowanie wyższe niż wartości filtracji API. W płuczce bazowej, w której nie było blokatorów węglanowych, filtracja dynamiczna miała wartość 28,7 cm³, co było wynikiem o około 395% wyższym od filtracji API równej 5,8 cm³. Z kolei w płuczce 14 filtracja dynamiczna była wyższa od filtracji API o około 108%.

Tablica 5. Filtracja dynamiczna HPHT oraz czas budowania osadu w płuczках glikolowo-potasowych

	Nr płuczki						
	8	9	10	11	12	13	14
Filtracja dynamiczna HPHT [cm ³]	28,7	12,4	8,3	11,6	10,3	6,2	5,2
Zmiana [%]	–	–56,8	–71,1	–59,6	–64,1	–78,4	–81,9
Czas budowania osadu filtracyjnego [s]	550	450	280	560	260	300	230
Zmiana [%]	–	–18,2	–49,1	1,8	–52,7	–45,4	–58,2

Tablica 6. Porównanie wyników badania filtracji API w 20°C oraz dynamicznej filtracji HPHT w 100°C płuczek 8–14

	Nr płuczki						
	8	9	10	11	12	13	14
Filtracja API [cm ³]	5,8	4,4	3,4	4,0	3,8	2,6	2,5
Filtracja HPHT [cm ³]	28,7	12,4	8,3	11,6	10,3	6,2	5,2



Rys. 18. Graficzne porównanie wyników badania filtracji API oraz dynamicznej filtracji HPHT płuczek 8–14

Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala sformułować następujące wnioski:

1. Płuczki glikolowo-potasowe i polimerowo-potasowe sporządzone w oparciu o ten sam zestaw koloidów ochronnych wyraźnie różnią się parametrami reologicznymi oraz filtracją. W temperaturze 20°C, bazowa płuczka polimerowo-potasowa miała lepkość plastyczną równą 66,1 mPa · s, lepkość pozorną 106,8 mPa · s oraz granicę płynięcia 39,0 Pa. Wartości tych parametrów płuczki glikolowo-potasowej w takich samych warunkach były niższe i wynosiły odpowiednio 55,5 mPa · s, 85,3 mPa · s oraz 28,5 Pa. W przypadku filtracji API również płuczka glikolowo-potasowa charakteryzuje się niższym wynikiem – 5,8 cm³, w porównaniu do 6,4 cm³ w płuczce polimerowo-potasowej.
2. Płuczka glikolowo-potasowa charakteryzuje się niższą filtracją dynamiczną w temperaturze 100°C. Wartość filtracji HPHT w przypadku bazowej płuczki glikolowo-potasowej wynosiła 28,7 cm³, natomiast w płuczce polimerowo-potasowej było to 40,9 cm³. Taka sama zależność miała miejsce dla każdej pary płuczek zmodyfikowanych takim samym zestawem środków ograniczających filtrację.
3. Filtracja dynamiczna HPHT jest o wiele wyższa od filtracji statycznej API. Bazowa płuczka polimerowo-potasowa charakteryzowała się filtracją HPHT o 540% wyższą od filtracji API. W przypadku płuczki glikolowo-potasowej różnica ta wynosiła 395%. Różnica w wartości obu rodzajów filtracji zmniejszała się wraz z dodawaniem coraz większej liczby blokatorów. W płuczках zawierających najbardziej efektywny z pośród badanych zestawów, czyli 10,0% środka B oraz 10,0% środka C, różnica w wielkości filtracji HPHT oraz API wynosiła 144% oraz 108% odpowiednio dla płuczki polimerowo-potasowej oraz glikolowo-potasowej.
4. Spośród wszystkich przebadanych kombinacji środków ograniczających filtrację, najbardziej skuteczny był zestaw 10% środka B oraz 10% środka C. Taka modyfikacja płuczki zapewniała ograniczenie filtracji API o 50% oraz filtracji dynamicznej HPHT o 80,9% w płuczce polimerowo-potasowej, oraz odpowiednio 56,9% i 81,9% w płuczce glikolowo-potasowej.
5. Charakterystyczne dla pomiarów filtracji dynamicznej przy użyciu aparatu M2200 było to, że po pewnym czasie, zależnym od składu płuczki, objętość filtratu przestawała narastać.

Można wnioskować, że powstający na ścianie rdzenia pomiarowego osad filtracyjny, stawał się coraz mniej przepuszczalny, aż do momentu w którym stawał się całkowicie nieprzepuszczalny. Literatura wskazuje [5, 11], że podczas badania filtracji w warunkach dynamicznych musi upłynąć okres od 6 do 15 godzin, aby wytworzył się szczelny osad. Prawdopodobną przyczyną tego, że filtrat przestawał przenikać przez rdzeń po tak krótkim czasie (w zależności od składu płuczki od około 200 do około 800 s) jest specyficzny kształt rdzenia i sposób w jaki oddziałuje na niego płuczka wiertnicza. W typowej dynamicznej prasie filtracyjnej osad filtracyjny tworzy się na płaskim, ceramicznym krążku lub papierze filtracyjnym, nad którym obraca się mieszadło wywołujące w komorze filtracyjnej ruch wirowy płuczki. W takich warunkach osad ulega ciągłej erozji, przez co narasta bardzo powoli. W urządzeniu Grace M2200 porowaty rdzeń

symuluje ścianę otworu wiertniczego. Dodatkowo wewnątrz otworu rdzenia obraca się rotor wywołujący krążenie płuczki. Pod wpływem ruchu wirowego wewnątrz otworu, siła odśrodkowa może wyrzucać cząstki fazy stałej, które szybko tworzą zwarty, nieprzepuszczalny osad.

6. Czas wytworzenia osadu filtracyjnego uzależniony jest od stężenia i rodzajów środków ograniczających filtrację w płuczce. W płuczce bazowej polimerowo-potasowej, czas po którym objętość filtratu przestała się zmieniać, wynosił około 800 s. Po zmodyfikowaniu składu poprzez dodatek 5% środka B, czas wytworzenia osadu skrócił się do około 460 s. Dalsze zwiększanie stężenia blokatorów powodowało dalsze skracanie czasu potrzebnego do wytworzenia osadu. Filtracja płuczki nr 7, gdzie w sumie znajdowało się 20% blokatorów węglanowych, przestała się zwiększać już po około 200 s.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2018, nr 2, s. 85–95, DOI: 10.18668/NG.2018.02.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 24.11.2017 r. Zatwierdzono do druku 9.02.2018 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Badania laboratoryjne nad ograniczeniem filtracji płuczek wiertniczych w dynamicznych warunkach HPHT* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0062/KW/17, nr archiwalny: DK-4100-62/17.

Literatura

- [1] Abdo J., Haneef M.D.: *Clay nanoparticles modified drilling fluids for drilling of deep hydrocarbon wells*. Applied Clay Science 2016, vol. 86, s. 76–82, DOI: 10.1016/j.clay.2013.10.017.
- [2] Abdo J., Haneef M.D.: *Nano-enhanced drilling fluids: pioneering approach to overcome uncompromising drilling problems*. Journal of Energy Resources Technology 2012, vol. 134, nr 1, 014501, DOI: 10.1115/1.4005244.
- [3] Adel M., Ragab S., Noah A.: *Reduction of formation damage and fluid loss using nano-sized silica drilling fluids*. Petroleum Technology Development Journal: An International Journal 2014, vol. 2, nr 7, s. 75–88.
- [4] Bielewicz D.: *Płyny wiertnicze*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [5] Budak P., Falkowicz S.: *Statyczna i dynamiczna filtracja płuczek wiertniczych – porównawcze studium eksperymentalne*. Nafta-Gaz 2000, nr 7–8, s. 420–427.
- [6] Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Al-Saba M.: *Application of in-house prepared nanoparticles as filtration control additive to reduce formation damage*. SPE-168116-MS, 2014, DOI: 10.2118/168116-MS.
- [7] Dębińska E.: *Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki*. Nafta-Gaz 2015, nr 5, s. 290–300.
- [8] Dębińska E.: *Wpływ nanokrzemionki na parametry mechaniczne kamienia cementowego*. Nafta-Gaz 2014, nr 4, s. 229–235.
- [9] Jankiewicz B.J., Choma J., Jamiola D., Jaroniec M.: *Nanostruktury krzemionkowo-metaliczne. Otrzymywanie i modyfikacja nanocząstek krzemionkowych*. Wiadomości Chemiczne 2010, nr 64, s. 913–942.
- [10] Kalantariasl A., Zeinijahromi A., Bedrikovetsky P.: *External filter cake buildup in dynamic filtration: mechanisms and key factors*. SPE-168144-MS, 2014, DOI: 10.2118/168144-MS.
- [11] M-I Drilling Fluids: *Podręcznik inżynierii płuczek wiertniczych*. Kraków 1996.
- [12] Ozyurtkan M.H., Altun G., Osgouei A.E., Aydilsiz E.: *Dynamic filtration properties of clay based drilling muds under elevated temperatures*. SPE-163325-MS, 2012, DOI: 10.2118/163325-MS.
- [13] Ponmani S., Nagarajan R., Sangwai J.S.: *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-178919-PA, 2016, DOI: 10.2118/178919-PA.
- [14] Salih A.H., Bilgesu H.: *Investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids using various anionic nanoparticles*. SPE-185638-MS, 2017, DOI: 10.2118/185638-MS.
- [15] Salih A.H., Elshehabi T.A., Bilgesu H.I.: *Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids*. SPE-184067-MS, 2016, DOI: 10.2118/184067-MS.
- [16] Salmachi A., Talemi P., Tooski Z.Y.: *Psyllium husk in water-based drilling fluids: an environmentally friendly viscosity and filtration agent*. SPE-183308-MS, 2016, DOI: 10.2118/183308-MS.
- [17] Strona internetowa: <http://bdc.com.pl> (dostęp: wrzesień 2016).
- [18] Strona internetowa: <http://www.glossary.oilfield.slb.com> (dostęp: wrzesień 2016).
- [19] Strona internetowa: <http://www.pspw-krosno.com.pl> (dostęp: sierpień 2016).
- [20] Vipulanandan C., Raheem A., Basirat B., Mohammed A.S., Richardson D.A.: *New kinetic model to characterize the filter cake formation and fluid loss in HPHT process*. OTC-25100-MS, 2014, DOI: 10.4043/25100-MS.
- [21] Wiercinski S.: *The Use of walnutshell filtration with enhanced media for reduction and/or elimination of upstream produced water treatment equipment*. SPE-184893-MS, 2017, DOI: 10.2118/184893-MS.
- [22] Zima G.: *Analiza wpływu nanomateriałów na właściwości osadu filtracyjnego*. Nafta-Gaz 2017, nr 5, s. 312–320, DOI: 10.18668/NG.2017.05.03.



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