

BEZWYKOPOWA BUDOWA

# WPROWADZENIE DO INŻYNIERII

# PŁYNÓW WIERTNICZYCH

## CZĘŚĆ 3: PARAMETRY LABORATORIUM PROGRAMY

### ■ ROBERT OSIKOWICZ ROE



Absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Zajmuje się technologią wiercenia otworów kierunkowych i praktycznymi aplikacjami płynów wiertniczych w otworach różnego przeznaczenia. Ponadto w kręgu zainteresowań autora znajdują się: analizy wykonalności, ryzyka, jakości i kosztów dla projektów bezwykopowych. Ma za sobą pracę w spółkach naftowych i firmach zajmujących się doradztwem w obszarze wiertnictwa i technik pokrewnych. Od 2009 r. pracuje dla firmy Robert Osikowicz Engineering.



## Z TEKSTU DOWIESZ SIĘ:

- ☑ jakie czynniki należy brać pod uwagę, dobierając parametry płynu wiertniczego,
- ☑ w jaki sposób ustala się właściwości płuczek,
- ☑ czym jest program płuczkowy.

Kolejny artykuł cyklu poświęcamy parametrom płynu wiertniczego, ich wyznaczeniu, interpretacji i programowaniu. Dzięki mierzalnym parametrom jesteśmy w stanie zobiektywizować ocenę jakości płynu i jego przydatności do danej aplikacji. Czy istnieje uniwersalna metoda wyboru odpowiednich właściwości płynu? Zapewne nie, ale warto przeanalizować następujący ciąg zdarzeń.

### ZASADY POSTĘPOWANIA

Pierwszym krokiem w wyborze odpowiednich właściwości płuczki wiertniczej jest

określenie celów i oczekiwań związanych z planowaną operacją wiertniczą. Co zamierzamy osiągnąć? Najczęściej będą to: minimalizacja czasu wiercenia, maksymalizacja produktywności procesu, zapobieganie materializacji zdarzeń niepożądanych (ryzykownych), unikanie niestabilności otworu i zmniejszanie negatywnego wpływu na środowisko. W zależności od celów możemy nadać priorytet różnym właściwościom płynu wiertniczego, takim jak gęstość, lepkość, filtracja, pH i skład chemiczny.

Następnym krokiem jest ocena zagrożeń, które możemy napotkać podczas wierce-

nia. Jaka jest charakterystyka formacji geologicznej? Jak długa i skomplikowana jest trajektoria otworu? Jakie są warunki hydrologiczne? Jakie są ograniczenia prawne i logistyczne? Niektóre typowe wyzwania obejmują zaniki wgłębne płuczki, szczelinowanie hydrauliczne nadkładu, kawernowanie ściany otworu, pęcznienie i agregację zwiercin ilastych, kolizję z obiektami kamienistymi. W zależności od wyzwań, przed jakimi stoimy, konieczna jest taka manipulacja właściwościami płuczki wiertniczej, aby je przezwyciężyć lub złagodzić.

Trzeci krok to wybór rodzaju płuczki wiertniczej, która najlepiej odpowiada celom i wyzwaniom projektu. Temu zagadnieniu poświęciliśmy poprzedni artykuł naszego cyklu. Istnieje wiele możliwych do zastosowania płuczek wiertniczych. Każdy typ ma swoje zalety i ograniczenia, w zależności od przewidywanej aplikacji. Płyny konwencjonalne sporządzane na bazie bentonitu są tańsze, bardziej przyjazne dla środowiska i bardziej kompatybilne z większością formacji, ale mają niższą odporność na skażenia, wyższy potencjał korozyjny i wyższą reaktywność formacji ilastych. Płyny inhibitowane są droższe, mniej przyjazne dla środowiska, mniej kompatybilne z niektórymi formacjami, ale przeciwdziałają reaktywności iltów.

Czwartym krokiem jest optymalizacja właściwości płynu w zależności od jego typu i specyficznych wymagań operacji wiertniczych. Aby to osiągnąć, można zastosować badania laboratoryjne, testy terenowe, modelowanie komputerowe bazujące na doświadczeniu i projektach rzeczywistych. Gęstość powinna być zrównoważona pomiędzy zapobieganiem napływowi wody i unikaniem pęknięcia formacji. Lepkość powinna być zrównoważona pomiędzy zapewnieniem odpowiedniego oczyszczenia otworu i racjonalnymi oporami przepływu. Płyn wiertniczy powinien charakteryzować się niską lepkością przy wysokich prędkościach ścinania i wysoką lepkością przy niskich prędkościach ścinania. Filtracja powinna być wystarczająco niska, aby zapobiec nadmiernej penetracji płynu do formacji i wystarczająco wysoka, aby zapewnić odpowiednie uszczelnienie strefy przyotworowej. Wartość pH powinna mieścić się w optymalnym zakresie charakterystycznym dla rodzaju płynu i rodzaju formacji. Materiały płuczkowe powinny być skuteczne i wydajne, a jednocześnie zgodne z rodzajem płynu, typem formacji i przepisami środowiskowymi. Stosując tę metodę, można wybrać odpowiednie właściwości płuczki wiertniczej dla danego etapu prac i osiągnąć pożądane wyniki. Jest to jednak proces ciągły, który wymaga monitorowania, oceny i regulacji parametrów w miarę zmiany warunków wiercenia.

## Pierwszym krokiem w wyborze odpowiednich właściwości płuczki wiertniczej jest określenie celów i oczekiwań związanych z planowaną operacją wiertniczą



### PARAMETRY PŁUCZEK WODNODYSERSYJNYCH

Chociaż płuczki wiertnicze zwykle pochłaniają od 10% do 15% całkowitych kosztów wiercenia, mogą prowadzić do 100% zidentyfikowanych problemów z wierceniem. Przy wyborze parametrów płuczki wiertniczej czynniki wyboru opierają się na następujących informacjach: trajektoria i geometria otworu, bilans ciśnień, chemia i mechanika przewiercanej formacji, wrażliwość środowiska, logistyka i koszty materiałów. Niebagatelne znaczenie będzie miała także jakość nadzoru nad pracami płuczkowymi i technologia wiercenia. Należy zauważyć, że możliwość symulowania warunków pracy w otworze i optymalizacja parametrów płynu zawsze przyczynia się do skrócenia czasu nieproduktywnego.

Aby uwzględnić te istotne czynniki, płuczka wiertnicza powinna mieć ustalonych co najmniej pięć podstawowych właściwości, a mianowicie: gęstość, parametry reologiczne, zawartość fazy stałej, filtracja i parametry chemiczne. W przypadku dowolnego rodzaju płuczki wiertniczej na wszystkie pięć właściwości mogą wpływać zarówno woda zarobowa, materiały płuczkowe, jak i faza stała pochodząca z procesu wiercenia. Amerykański Instytut Naftowy ustandaryzował metody przeprowadzania badań terenowych i laboratoryjnych płuczek wiertniczych, a szczegółowe procedury można znaleźć w publikacji *Recommended Practice: Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, API RP 13B1*.

### GĘSTOŚĆ PŁUCZKI

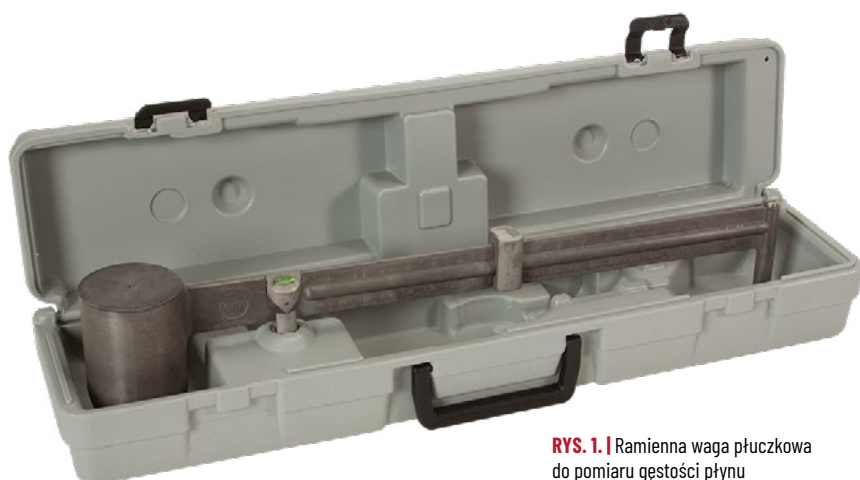
Gęstość (masa właściwa) to stosunek masy pewnej substancji do zajmowanej przez nią objętości.

Gęstość jest wielkością charakterystyczną dla substancji w określonych warunkach fizycznych. Dla większości substancji jest zależna od panujących warunków, w szczególności od temperatury i ciśnienia. Gęstość płynów można wyznaczyć poprzez ważenie próbek o znanej objętości. Gęstość płuczki jest parametrem służącym do analizy zawartości fazy stałej, do kontrolowania ciśnienia dennego i do stabilizacji ściany otworu. Pomiaru gęstości płynu należy dokonywać w dwóch punktach obiegu: przed jego zatłoczeniem do otworu oraz po odebraniu z otworu. Różnica w wynikach pomiarów, uzyskanych pomiędzy wyjściem i wejściem, jest podstawą do oceny prawidłowości procesu wiercenia i transportu zwiercin w otworze. Dodatek do płuczki fazy stałej w postaci materiałów płuczkowych lub zwiercin pochodzących z procesu wiercenia będzie powodował wzrost gęstości szlamu, natomiast dodatek wody wywoła redukcję gęstości. Ze względu na fakt, że płyny wiertnicze charakteryzują się zmiennością w przestrzeni i czasie, zaleca się, aby kontroli parametru dokonywać nie rzadziej niż co 3 godziny prac wiertniczych.

**Przyrząd pomiarowy:** gęstość płynu mierzy się w warunkach polowych za pomocą wagi ramiennej o dokładności  $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ . Waga płuczkowa składa się z podstawy i naczynia na próbkę płuczki o stałej objętości z pokrywką połączoną z ramieniem wagi posiadającym skalę z podziałką. Skalibrowany przyrząd powinien wskazać gęstość czystej wody na poziomie  $1,0 \text{ g/cm}^3$  ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ) w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Zakres pomiarowy typowej wagi wynosi od  $0,7$  do  $2,8 \text{ g/cm}^3$ . W odróżnieniu od ciężaru właściwego gęstość nie zależy od siły ciężenia.

#### Procedura pomiarowa:

- zmierzyć (ustalić) temperaturę płuczki,
- ustawić wagę ramienną na płaskiej powierzchni,



**RYS. 1.** | Ramienna waga płuczkowa do pomiaru gęstości płynu (zdjęcie: OFI Testing Equipment)

- napełnić czyste i suche naczynie (pojemnik) płuczką, zamknąć dopasowaną do naczynia pokrywkę w celu usunięcia nadmiaru płynu i powietrza,
- umyć i przetrzeć (wysuszyć) zewnętrzną część naczynia,
- położyć wagę ramienną na podporze,
- ustalić równowagę według wskazań poziomicy poprzez przesuwanie ciężarka wzdłuż ramienia wagi,
- odczytać wynik wskazany przez krawędź ciężarka od strony podparcia,
- wprowadzić wynik do raportu płuczkowego,
- umyć i wysuszyć przyrząd przed kolejnym pomiarem.

## LEPKOŚĆ UMOWNA

Lepkość płynu definiuje się jako opór stawiany w trakcie przepływu. Dokładny pomiar lepkości płuczki wiertniczej jest zależny od wielu czynników i wymaga specjalnego sprzętu. Podstawowymi czynnikami wpływającymi na lepkość płynu są: charakterystyka fazy rozpraszającej (w większości przypadków wody) oraz wielkość, kształt i liczba zawieszonych cząstek (faza rozproszona) oraz siły istniejące między cząstkami, a także między cząstkami i płynem.

W przypadku nieskomplikowanych projektów, w warunkach polowych pomiaru lepkości umownej (względnej), można dokonać za pomocą przyrządu nazwanego lejkiem Marsha. Miarą lepkości jest tutaj czas wypływu ustandaryzowanej objętości cieczy z lejka pomiarowego. Na otrzymany wynik pomiaru istotny wpływ mają skład płynu,

stopień zżelowania oraz gęstość suspensji. Częste kontrolowanie lepkości za pomocą lejka informuje użytkownika o zmianach, które mogłyby wymagać działań korygujących. Pomiar lepkości za pomocą lejka należy traktować jako pomiar uzupełniający, który nie zastępuje pomiaru wykonywanego za pomocą lepkościomierza obrotowego (reometru).

**Przyrząd pomiarowy:** lepkościomierz lejkowy Marsha to łatwe w obsłudze urządzenie stosowane do przeprowadzania szybkich pomiarów lepkości umownej (względnej) płuczki wiertniczej. Zestaw pomiarowy składa się z lejka o pojemności 1500 cm<sup>3</sup> i kubka pomiarowego ze skalą o pojemności 1000 cm<sup>3</sup>. Lejek Marsha jest skalibrowany w taki sposób, że czas wypływu wody o temperaturze 20°C z lejka wynosi 27,5 s. Ustandaryzowana średnica wylotu lejka dla pomiarów płuczkowych wynosi 4,7 mm. W praktyce wiertniczej najczęściej stosuje się płyny charakteryzujące się lepkością umowną w zakresie 45–120 s.



**RYS. 2.** | Zestaw laboratoryjny do pomiaru lepkości umownej (zdjęcie: OFI Testing Equipment)

## Procedura pomiarowa:

- do pomiaru należy używać czystego i suchego lejka trzymanego w pozycji pionowej,
- nalać do lejka przez sito 1500 cm<sup>3</sup> dobrze wymieszanej płuczki, blokując jednocześnie jej wypływ przez otwór umieszczony w dolnej części lejka,
- umieścić pod lejkiem kubek miarowy,
- odblokować otwór wylotowy i jednocześnie uruchomić stoper,
- zmierzyć czas wypływu pierwszych 1000 cm<sup>3</sup> płuczki z lejka,
- otrzymany wynik wyrażony w sekundach jest umowną miarą lepkości,
- wprowadzić wynik do raportu płuczkowego,
- umyć i wysuszyć przyrząd przed kolejnym pomiarem.

## PARAMETRY REOLOGICZNE

Termin reologia oznacza naukę o deformacji (odkształceniach) oraz płynięciu materiałów. Reologia zajmuje się płynami wiertniczymi obejmującymi suspensje, zawiesiny, szlamy i roztwory. Reologia służy ustaleniu zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem, a także pomiędzy prędkością ścinania i naprężeniem. W konsekwencji powyższego reologia zajmuje się zwłaszcza zmienną lepkością i przepływem (rodzaj odkształcenia). Lepkość wyraża stosunek naprężeń ścinających do prędkości ścinania. Jej interpretacja i wymagany poziom w programach płuczkowych są niejednoznaczne. Z jednej strony lepkość jest naszym przeciwnikiem ze względu na opory przepływu (straty ciśnienia w układzie krążenia płuczki). Z drugiej jednak strony lepkość jest naszym sojusznikiem w kontekście transportu zwiercin. Należy wskazać, że przepływ przez określone geometrie wiąże się z koniecznością modelowania rzeczywistej prędkości ścinania, która z kolei pozwoli na zmierzenie lepkości efektywnych panujących w danym miejscu naszego obiegu. Ponadto, analiza zachowania się fazy stałej w płynie pozostającym zarówno w ruchu, jak i w spoczynku wskazuje na kluczową rolę lepkości mierzonych przy niskich i ultra niskich prędkościach ścinania – jako reprezentujących zdolności suspensyjne niezbędne dla stabilności płynu, jak i dla transportu obcej fazy stałej.

## Chociaż płuczki wiertnicze zwykle pochłaniają od 10% do 15% całkowitych kosztów wiercenia, mogą prowadzić do 100% zidentyfikowanych problemów z wierceniem



Płyny rzeczywiste można podzielić na newtonowskie i nienewtonowskie. W przypadku płynów newtonowskich stosunek naprężenia ścinającego do szybkości ścinania jest stały. W konsekwencji tego krzywa płynięcia  $\tau = f(\dot{\gamma})$  jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych. Przykładem płynu newtonowskiego jest woda. W przypadku płynów nienewtonowskich stosunek naprężenia ścinającego do szybkości ścinania nie jest stały i zmienia się dla każdej szybkości ścinania. Płyny wiertnicze jako płyny nienewtonowskie stosowane w wiertniczych technikach bezwykopowych opisywane są (przybliżane są) modelami reologicznymi. Kształt krzywej płynięcia wynika z dopasowania danych zmierzonych do modelu. Charakterystyczne wielkości dla czterech najpopularniejszych modeli zestawiono poniżej w tab. 1. Dla większości płynów lepkość jest

zależna od panujących warunków, w szczególności od temperatury i ciśnienia. Zaleca się, aby kontroli parametrów reologicznych dokonywać nie rzadziej niż co 3 godziny prac wiertniczych.

**Przyrząd pomiarowy:** najbardziej popularnym przyrządem mierzącym zależność pomiędzy ścinaniem a naprężeniem w płynach wiertniczych jest reometr – lepkościomierz obrotowy (V-G). Lepkościomierz tego typu składa się z koncentrycznie umieszczonych elementów: zewnętrznego cylindra rotora i wewnętrznego cylindra (boba) zawieszzonego na sprężynie. Pomiędzy dwoma elementami znajduje się przestrzeń pierścieniowa (szczelina) o zdefiniowanej geometrii. Kiedy cylindryczna tuleja zewnętrzna rotora obraca się ze znaną prędkością, moment obrotowy jest przenoszony przez lepłą płuczkę na cylinder wewnętrzny. Bob jest połączony ze sprężyną

i układem pomiarowym, w którym mierzony jest moment obrotowy. Szybkość ścinania SR (Shear Rate) powiązana jest poprzez stałą przyrządu z prędkością obrotową rotora, a naprężenie ścinające SS (Shear Stress) wskazane jest na tarczy przyrządu. Pomiar przyrządem można wykonywać, kontrolując temperaturę dzięki zastosowaniu podgrzewanego naczynia. Kalibracji przyrządu należy dokonywać zgodnie z instrukcją dołączoną do danego modelu lepkościomierza, za pomocą cieczy o stałych lepkościach. Parametry dostępnych na rynku lepkościomierzy podano w tab. 2.

Lepkościomierz obrotowy niezależnie od modelu i producenta charakteryzuje się jednolitymi cechami:

- prędkość ścinania jest wprost proporcjonalna do prędkości obrotowej rotora przyrządu według zależności: 1 obr./min = 1,703 s<sup>-1</sup>, w konsekwencji takiego założenia dla 600 obr./min rotora wartość prędkości ścinania wynosi 1022 s<sup>-1</sup>,
- odczyt lepkościomierza dokonywany jest w °Fann, po pomnożeniu przez stałą 1,067 uzyskujemy wartość naprężenia ścinającego w funtach na sto stóp kwadratowych (lbs/100ft<sup>2</sup>),
- lepkość wyrażona w mPas ustalona dla 300 obr./min jest równa zmierzonemu naprężeniu wyrażonemu w °Fann (stała przyrządu),

Nazwa modelu Ilość parametrów	Rok powstania	Wzór podstawowy	Podstawowe parametry reologiczne modelu	Uwagi
Bingham Plastic Model (BPRM) 2	1916	$\tau = \tau_o + \mu_p \dot{\gamma}$	Lepkość plastyczna: $PV(\mu_p) = \theta_{600} - \theta_{300}$ Granica płynięcia: $YP(\tau_o) = \theta_{300} - \mu_p$	Przeszacowanie wartości granicy płynięcia, brak wiarygodnych danych o zachowaniu płynu przy niskich prędkościach ścinania
Ostwald-de-Waele Power Law Model (PLRM) 2	1925	$\tau = k \dot{\gamma}^n$	Wykładnik potęgowy (stopień nienewtonowskiej charakterystyki płynu) $n = 3.32 \log(\theta_{600}/\theta_{300})$ Współczynnik konsystencji $k = \theta_{600}/1022^n = \theta_{300}/511^n$	Model nie uwzględnia granicy płynięcia, co prowadzi do niedokładnych wyników kalkulacji oporów przepływu
Herschel-Bulkley Model (HBRM) 3	1926	$\tau = \tau_o + K \dot{\gamma}^n$	Lepkość pozorna $\eta = \tau_o/\dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^{n-1}$	Istnieją wyzwania związane z wykonywaniem kalkulacji hydraulicznych bez zastosowania metod numerycznych
Zamora Yield Power Law Model (YPLRM) Unified Model 3	2000	$\tau = \tau_y + k \dot{\gamma}^n$	Wykładnik potęgowy $n = 3.32 \log(\theta_{600} - \tau_y / \theta_{300} - \tau_y)$ Współczynnik konsystencji $k = (\theta_{300} - \tau_y) / 511^n$ Przybliżenie granicy płynięcia $\tau_y = LSYP$ $LSYP = 2\theta_s - \theta_6$	Unified Model jest uproszczoną wersją modelu Herschela-Bulkleya wypracowaną przez AADE

TAB. 1. | Najczęściej wykorzystywane w praktyce modele reologiczne

Model	800 S	900	35A/SR12	45 APV	RheoVADR
Producent	OFI	OFI	Fann	Fann	Fann
Prędkości rotora zadane bezpośrednio	8 w zakresie od 3 do 600 RPM	12 w zakresie od 1 do 600 RPM	12 w zakresie od 0,9 do 600 RPM	12	12
Prędkość zmienna rotora	nie	0,006 – 1000 RPM	nie	0,1 – 600 RPM	0,01 – 1000 RPM
Dokładność prędkości rotora	0,1 RPM	0,001 RPM	0,1 RPM	0,001 RPM	0,001 RPM
Zakres prędkości ścinania	5,11 – 1022 s <sup>-1</sup>	0,01 – 1700 s <sup>-1</sup>	1,5 – 1022 s <sup>-1</sup>	0,17 – 1022 s <sup>-1</sup>	0,017 – 1700 s <sup>-1</sup>
Odczyt wyniku	tarcza	wyświetlacz cyfrowy	tarcza	wyświetlacz cyfrowy	wyświetlacz cyfrowy
Kalkulacja lepkości	nie	tak	nie	tak	tak
Rozdzielczość odczytu naprężenia	0,5 °Fann	0,1 °Fann	0,5 °Fann	0,1 °Fann	0,1 °Fann
Automatyczny pomiar żeli	nie	tak	nie	tak	tak
Pojemnik do podgrzewania	nie	tak w zakresie do 90°C	tak w zakresie do 90°C	tak	tak w zakresie do 95°C

**TAB. 2.** | Parametry lepkościomierzy obrotowych stosowanych w praktyce wiertniczej

- lepkość pozorna dla dowolnej prędkości ścinania wynika z formuły  $300 \times \tau / \text{RPM}$ , gdzie  $\tau$  oznacza zmierzone naprężenia, a RPM zadaną prędkość obrotową przyrządu.



#### Procedura pomiarowa:

- założyć cylinder wewnętrzny (bob), a następnie przykręcić cylinder zewnętrzny (rotor),
- do pojemnika wlać płyn wiertniczy w określonej objętości,
- wprowadzić do pojemnika z płuczką zestaw pomiarowy rotor – bob do zaznaczonego na cylindrze rotora poziomu,
- ustalić temperaturę pomiaru,
- włączyć przyrząd na 600 obr./min, poczekać na ustabilizowanie pomiaru i odczytać (zapisać) wartość naprężenia (dla niektórych lepkościomierzy także lepkości),
- przełączyć przyrząd na 300 obr./min, poczekać na ustabilizowanie pomiaru i odczytać (zapisać) wartość naprężenia (dla niektórych lepkościomierzy także lepkości),
- postępując analogicznie, ustalić wartość naprężenia i powiązanej z nim lepkości dla wszystkich dostępnych zakresów prędkości obrotowych rotora (prędkości ścinania),
- w przypadku lepkościomierzy z przekład-

nią mechaniczną będzie to co najmniej 6 zakresów prędkości, w przypadku lepkościomierzy elektronicznych będzie to co najmniej 12 zakresów prędkości,

- po zakończeniu sczytywania profilu lepkościowego można przejść do procedury pomiaru żeli,
- wymieszać płuczkę na 600 obr./min. przez 15 sekund,
- w przypadku lepkościomierza mechanicznego zmienić prędkość rotora na 3 obr./min, a następnie wyłączyć silnik przyrządu,
- odczekać 10 s, a następnie włączyć silnik przy ustawionych uprzednio 3 obr./min i zarejestrować maksymalne wychylenie wskazówki (maksymalne naprężenie interpretowane jako żel I – GI),
- odczekać 10 minut, a następnie włączyć silnik przy ustawionych uprzednio 3 obr./min i zarejestrować maksymalne wychylenie wskazówki (maksymalne naprężenie interpretowane jako żel II – GII),
- w przypadku lepkościomierza elektronicz-

**Materiały płuczkowe powinny być skuteczne i wydajne, a jednocześnie zgodne z rodzajem płynu, typem formacji i przepisami środowiskowymi**

**RYS. 3.** | Laboracyjne lepkościomierze obrotowe (zdjęcia: Fann Instrument Company, OFI Testing Equipment)



nego procedura wygląda podobnie, z tą różnicą, że wartość 3 obr./min wybieramy bezpośrednio z klawiatury przyrządu,

- wprowadzić uzyskane wyniki do raportu płuczkowego,
- umyć i wysuszyć przyrząd przed kolejnym pomiarem.

#### Analiza profilu lepkościowego i interpretacja wyników:

- profil lepkościowy płuczki mierzony jest w kilku (kilkunastu) charakterystycznych zakresach pomiarowych,
- należy wykonać pomiar naprężenia wyrażonego w  $^{\circ}\text{Fann}$  dla poszczególnych prędkości obrotowych przyrządu (prędkości ścinania),
- istnieją cztery charakterystyczne zakresy prędkości obrotowej przyrządu: wysokie (powyżej 100 obr./min), średnie (10–100), niskie (1–10) oraz ultra niskie (poniżej 1),
- zakresy prędkości są powiązane z prędkością ścinania panującą w poszczególnych miejscach obiegu płuczkowego,
- lepkość jest ilorazem mierzonego naprężenia do prędkości ścinania,
- wykresy  $\tau = f(\dot{\gamma})$  oraz  $\mu = f(\dot{\gamma})$  obrazują wyniki pomiarów,
- interpretacji podlega zawsze cały profil, a nie wyciągnięty z kontekstu pojedynczy pomiar,
- w zależności od stosowanego modelu reologicznego obliczyć należy specyficzne wartości (parametry) charakteryzujące płyn: PV, YP, LSYP, n, K,
- opory przepływu rejestrowane w obiegu płuczkowym są w znacznym stopniu pochodną po profilu lepkościowym,
- różnica pomiędzy wskazaniem przyrządu na 600 i 300 obr./min powinna być jak najmniejsza,
- poziom wskazań na 6 i 3 obr./min powinien być racjonalnie wysoki (w przypadku techniki HDD),
- poziom wskazań poniżej 1 obr./min powinien być wysoki (w przypadku techniki HDD),
- iloraz LSYP do YP powinien być jak najwyższy,
- iloraz wskazań przy 3 obr./min do wskazań przy 600 obr./min powinien być jak najwyższy,
- żele (GI i GII) nie powinny być progresywne.

## FILTRACJA NISKOCIŚNIENIOWA API/GRUBOŚĆ OSADU FILTRACYJNEGO

Te dwie właściwości należy rozpatrywać łącznie, ponieważ to filtracja płynu wiertniczego do formacji powoduje powstawanie osadu filtracyjnego. Migracja płynu (zwykle wody i rozpuszczalnych substancji chemicznych) z płuczki do formacji ma miejsce, gdy przepuszczalność umożliwi przepływ płynu przez ośrodek porowaty. W miarę filtracji płynu na ścianie otworu gromadzi się osad stały. Występują dwa rodzaje filtracji: dynamiczna, gdy płuczka krąży w otworze i statyczna, gdy kolumna płynu pozostaje w spoczynku. Filtracja dynamiczna na ogół charakteryzuje się stabilnym osadem, gdyż szybkość erozji osadu w wyniku cyrkulacji odpowiada szybkości jego budowania. Filtracja statyczna powoduje, że osad z czasem staje się coraz grubszy, co skutkuje zmniejszeniem filtracji płynu w jednostce czasu.

Laboratoryjne pomiary płuczkowe ograniczają się do filtracji statycznej. Właściwości filtracyjne płynu wiertniczego określa się za pomocą prasy filtracyjnej. Badanie polega na monitorowaniu szybkości, z jaką płyn jest wypychany z prasy filtracyjnej w określonych warunkach czasu, temperatury i ciśnienia, a następnie pomiarze grubości osadu na bibule filtracyjnej.

Podczas wiercenia płuczka wiertnicza ma tendencję do migracji z otworu wiertniczego do formacji na skutek różnicy pomiędzy ciśnieniem dennym i ciśnieniem porowym. Ciśnienie hydrostatyczne jest na ogół wyższe w otworze niż w formacji. W miarę cyrkulowania płuczki faza stała zawieszona lub zdyspergowana w niej osadza się na ścianie otworu wiertniczego, co znacząco ogranicza naturalny przepływ. Osad filtracyjny na ścianie otworu lub skoncentrowany żel zdeponowany w strefie przygotowawczej są traktowane jako naturalna bariera przed nadmierną migracją płynu wiertniczego.

W teorii przyjętej na potrzeby wierceń naftowych uznaje się za idealny osad filtracyjny, który jest cienki i elastyczny. Jednak w porównaniu do otworów realizowanych w oparciu o techniki bezwykopowe otwory naftowe są wielokrotnie głębsze, a tym samym poziom ciśnienia hydrostatycznego jest nieporównywalny. Grubość osadu filtracyjnego (lub

struktury żelowej) dla konkretnego płynu jest na ogół funkcją przepuszczalności formacji. W konsekwencji takiej teorii bariera filtracyjna w warstwach ilastych będzie cieńsza niż w nie-spoistych piaskach.

Dobrze zaprojektowana i właściwie kondycjonowana bentonitowa płuczka wiertnicza o niskiej zawartości fazy stałej ma szansę pozostawić cienki osad filtracyjny o niskiej przepuszczalności. Naturalne płuczki samorodne powstałe w wyniku wierceń czystą wodą mają znacznie mniej pożądane właściwości filtracyjne niż wysokogatunkowy bentonit. Filtracja niestabilnej płuczki samorodnej o dużej zawartości fazy stałej będzie wyższa a tworzony osad znacznie grubszy. Gruby osad filtracyjny ma wiele wad. Może podnosić ryzyko zapadania się ściany czy szczelinowania hydraulicznego w otworze. Również ryzyko przywierania rury produktowej w trakcie instalacji jest warte przeanalizowania. Płuczki bentonitowo-polimerowe charakteryzują się niższą filtracją i cieńszym osadem filtracyjnym. Zaleca się, aby kontroli parametru dokonywać nie rzadziej niż co 12 godzin prac wiertniczych.

**Przyrząd pomiarowy:** filtrację niskociśnieniową mierzy się prasą filtracyjną. Norma API określa, że ciśnienie w prasie filtracyjnej o średnicy 9 cm musi wynosić 100 psi (ok. 7 bar), a czas pomiaru to 30 minut. Prasa zawiera stojak z uchwytem na pojemnik próbnika, pojemnik na płuczkę z przykrywką, regulator ciśnienia. W zestawie znajduje się również menzurka do pomiaru filtratu oraz wymienny filtr wraz z bibułą filtracyjną. Stosowane w branży bezwykopowej prasy filtracyjne zasilane są z butli lub naboju.



RYS. 4. | Zestaw laboratoryjny do pomiaru filtracji niskociśnieniowej API (zdjęcie: OFI Testing Equipment)

## Rekomendowany program płuczkowy powinien być realistyczny i dostosowany z jednej strony do założeń projektu, z drugiej jednak strony powinien uwzględniać możliwości sprzętowe, materiałowe i organizacyjne wykonawcy robót wiertniczych



### Procedura pomiarowa:

- do pomiaru należy używać czystego i suchego przyrządu,
- na dnie pojemnika położyć sito i bibułę filtracyjną,
- wlać płuczkę do szczelnego pojemnika ok. 1 cm poniżej krawędzi naczynia,
- nałożyć i docisnąć pokrywkę,
- wyrzucić na płuczkę w prasie ciśnienie 100 psi (ok. 7 bar),
- gromadzić filtrat płuczki w menzurce pomiarowej przez 30 minut,
- odczytać objętość filtratu z dokładnością 0,1 ml,
- sprawdzić grubość i jakość osadu filtracyjnego,
- wprowadzić wynik do raportu płuczkowego,
- umyć i wysuszyć przyrząd przed kolejnym pomiarem.



**RYS. 5. |** Szirometr do pomiaru wytrzymałości strukturalnej (zdjęcie: Fann Instrument Company)

- na listwę z podziałką nałożyć duraluminiowy cylinder tak, aby jego krawędź dotykała powierzchni płuczki,
- opuścić swobodnie cylinder i odczekać aż jego pozycja w płuczce się ustabilizuje,
- odczytać wartość pierwszej wytrzymałości strukturalnej wskazaną przez górną krawędź cylindra,
- wyjąć cylinder, pozostawić płuczkę w bezruchu,
- po 10 minutach nałożyć drugi cylinder i opuścić go, umożliwiając swobodne zagłębianie się w płuczce,
- odczytać wartość drugiej wytrzymałości strukturalnej,
- wprowadzić wynik do raportu płuczkowego,
- po zakończeniu pomiaru przyrząd należy umyć i wysuszyć.

### WYTRZYMAŁOŚĆ STRUKTURALNA

Parametr o nazwie wytrzymałość strukturalna płuczki można interpretować jako zdolność do żelowania suspensji wiertniczej w czasie. Jej oznaczenie zaleca się wykonać w przypadku braku możliwości wykonania pomiaru żeli lepkościamiernym obrotowym. Uzyskana wartość wytrzymałości strukturalnej nie jest jednak tożsama z wynikiem pomiaru żeli. Wynika to z odmiennej metodyki ścinania płuczki w przyrządzie pomiarowym.

**Przyrząd pomiarowy:** pomiaru wytrzymałości strukturalnej płuczki dokonujemy prostym przyrządem o nazwie szirometr. Przyrząd składa się z naczynia cylindrycznego z pionową listwą pomiarową wyskalowaną zarówno w paskalach, jak i anglosaskiej jednostce funty na 100 stóp kwadratowych (lbs/100ft<sup>2</sup>) oraz dwóch duraluminiowych cylindrów o masie 5 g każdy.

### Procedura pomiarowa:

- do czystego i suchego naczynia cylindrycznego wlać dobrze wymieszaną płuczkę,

przed zatłoczeniem do otworu oraz po odebraniu z otworu. Obecność w przewiercanej formacji piasku będzie powodowała procentowy wzrost zawartości tej frakcji w szlamie na wyjściu z otworu. Piasek powinien zostać odrzucony w procesie separacji faz. Zakłada się, że maksymalna koncentracja piasku na wejściu do otworu nie powinna być wyższa niż 1% w przypadku techniki HDD i 3% w przypadku technik przeciskowych. Okresowa kontrola zapiaszczenia płuczki jest konieczna w celu uniknięcia nagromadzenia się piasku w systemie wiertniczym, ograniczenia zużycia narzędzi i elementów obiegu płuczkowego, zwłaszcza armatury wysokociśnieniowej. Zaleca się, aby kontroli parametru dokonywać nie rzadziej niż co 6 godzin prac wiertniczych.

**Przyrząd pomiarowy:** zawartość piasku mierzy się w warunkach polowych za pomocą ustandaryzowanego zestawu o dokładności  $\pm 0,5\%$  objętościowej zawartości. Zestaw do pomiaru zapiaszczenia zawiera sitko o gęstości 200 mesh (rozmiar oczka 74  $\mu\text{m}$ ), plastikowy lejek, szklaną menzurkę ze skalą od 0 do 20 wskazującą procentowe zapiaszczenie płynu. W zestawie do pomiaru zapiaszczenia znajduje się też analityczny pojemnik na wodę.



**RYS. 6. |** Zestaw laboratoryjny do pomiaru zawartości piasku (zdjęcie: OFI Testing Equipment)

### ZAWARTOŚĆ PIASKU

Mianem zapiaszczenia płuczki określa się zawartość procentową, w stosunku objętościowym, ziaren piasku większych niż 74 mikrony. Preferowaną metodą określania zawartości piasku w płuczce należy dokonywać co najmniej w dwóch punktach obiegu:



**Procedura pomiarowa:**

- napełnić menzurkę płynem wiertniczym do kreski oznaczonej jako *mud to here*,
- uzupełnić menzurkę wodą do kreski oznaczonej jako *water to here*,
- mocno wymieszać zawartość naczynia,
- zawartość naczynia przelać przez sitko, menzurkę przepłukać aż będzie czysta,
- nałożyć od góry lejek na sitko i cały zestaw odwrócić,
- skierować wylot lejka do menzurki,
- na odwrócone sitko skierować strumień wody w celu wypłukania piasku,
- odczekać, aż piasek w menzurce opadnie,
- odczytać procentową zawartość piasku na skali przyrządu,
- wprowadzić wynik do raportu płuczkowego,
- umyć i wysuszyć przyrząd przed kolejnym pomiarem.

**pH PŁYNU WIERTNICZEGO I JEGO FILTRATU**

Pomiar w terenie pH płuczki (lub filtratu) i regulacja pH mają fundamentalne znaczenie. Do pomiaru pH płuczki wiertniczej, sporządzanej na bazie wody, stosuje się dwie metody: zmodyfikowaną metodę kolorymetryczną, wykorzystującą paski testowe oraz metodę potencjometryczną, wykorzystującą elektroniczny pH-metr ze szklaną elektrodą. Płuczki wiertnicze powinny mieć odczyn zasadowy odpowiadający  $\text{pH} > 7$ .

Zalecaną metodą pomiaru pH płuczki wiertniczej jest elektroniczny pH-metr ze szklaną elektrodą. Miernik ten jest dokładny i podaje wiarygodne wartości pH, zasadniczo wolne od zakłóceń. Pomiar pH powinien być wykonany zgodnie z instrukcją producenta elektronicznego przyrządu.

Przed każdym pomiarem elektrodę należy wypłukać i osuszyć. Po wykonaniu pomiaru natychmiast przepłukać elektrodę wodą destylowaną w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń i namoczyć w roztworze na czas przechowywania elektrod. Kalibracji przyrządu należy dokonywać zgodnie z instrukcją dołączoną do danego modelu pH-metru. Dokładność pomiaru standardowym przyrządem elektronicznym wynosi 0,1.

Alternatywnym sposobem postępowania jest oznaczenie pH filtratu płuczki za pomocą papierków wskaźnikowych. Pomiar wykonujemy przez zanurzenie paska wskaźnikowego w filtracie na okres około 10 sekund. Po wyjściu paska należy porównać jego zabarwienie z zamieszczoną skalą na opakowaniu. Pomiar pH przy pomocy pasków winien być traktowany jako orientacyjny. Metoda pasków wskaźnikowych jest często stosowana do pomiarów pH w terenie, ale nie jest metodą preferowaną. Pomiar jest niezawodny tylko w bardzo prostych kompozycjach. Rozpuszczone sole i chemikalia oraz płyny o ciemnym kolorze powodują błędy w odczytach wartości pH na pasku. Dokładność pomiaru wykonywanego paskami wskaźnikowymi wynosi 0,5.

**PRZEWODNOŚĆ PŁYNU WIERTNICZEGO I JEGO FILTRATU**

Konduktometr to urządzenie służące do pomiaru przewodności roztworu elektrolitów. Konduktometry pozwalają na orientacyjne określenie poziomu zanieczyszczenia i zasolenia filtratu. W praktyce polowej stosuje się uniwersalne przyrządy mierzące przewodność, TDS, zasolenie i temperaturę. Parametr TDS (Total Dissolved Solids) jest to wskaźnik mówiący o całkowitej zawartości wszystkich

ruchomych naładowanych jonów w roztworze wodnym. Do tego zaliczają się: minerały, sole oraz metale rozpuszczone w danej objętości wody. **TDS odnosi się jedynie do składników obecnych w filtracie, które przewodzą prąd.** Pomiar przewodności (konduktywności) powinien być wykonany zgodnie z instrukcją producenta elektronicznego przyrządu. Przed każdym pomiarem elektrodę należy wypłukać i osuszyć. Po wykonaniu pomiaru przepłukać elektrodę wodą destylowaną w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń i namoczyć w roztworze na czas przechowywania. Kalibracji przyrządu należy dokonywać zgodnie z instrukcją dołączoną do danego modelu konduktometru.

**ANALIZY CHEMICZNE**

**Oznaczenie koncentracji jonów Cl<sup>-</sup> (chlorków)** – test poziomu zasolenia jest bardzo istotny na obszarach, gdzie sól może skażać płuczkę wiertniczą. Obejmuje to większość wierceń prowadzonych na styku ładu i morza oraz wierceń pod ciekami wodnymi, do których zrzucają się wody słone. Sól może pochodzić zarówno z wody zarobowej, przewiercanej formacji (wód podziemnych), jak i celowo wprowadzanych komponentów płuczkowych. Do przeprowadzenia analizy chemicznej potrzebne są filtrat płuczki, woda destylowana, szkło laboratoryjne oraz następujące odczynniki: fenoloftaleina, roztwór  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (kwas siarkowy), roztwór  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  (chromian potasu) i roztwór  $\text{AgNO}_3$  (azotan srebra). Stężenia odczynników należy dostosować do wybranej procedury pomiarowej. Miarczkowanie azotanem srebra w obecności chromianu potasu spowoduje zmianę koloru roztworu filtratu z jasnożółtej na pomarańczową. Koncentracja chlorków jest wprost proporcjonalna do zużytej ilości roztworu  $\text{AgNO}_3$  i odwrotnie proporcjonalna do ilości filtratu pobranego do analizy.

**Oznaczenie koncentracji jonów wapnia  $\text{Ca}^{2+}$**  – wodę zawierającą dużą ilość rozpuszczonych soli wapnia i magnezu nazywa się „wodą twardą”. Na miejscach wielu projektów wiertniczych woda dostępna do użytku jest dość twarda. Niektóre materiały płuczkowe, w tym zwłaszcza bentonity, wykazują się niższą wydajnością po wprowadzeniu do

**Każda doświadczona firma wiertnicza  
powinna mieć przygotować i skontrolować  
podstawowy program płuczkowy zawierający  
od 6 do 8 kluczowych parametrów**



twardej wody. Często jednak, gdy dostępne są dwa lub więcej źródeł wody, pożądane może być wykonanie prostego testu w celu wybrania bardziej miękkiej wody. Jony wapnia mogą pochodzić zarówno z wody zarobowej, przewiercanej formacji (wód podziemnych), jak i celowo wprowadzanych komponentów płuczkowych. Do przeprowadzenia analizy chemicznej potrzebne są filtrat płuczki, woda destylowana, szkło laboratoryjne oraz następujące odczynniki: kalces (wskaźnik), roztwór EDTA (wersenian dwusodowy), roztwór NaOH (wodorotlenek sodu) i roztwór TEA (trietanoloamina). Stężenia odczynników należy dostosować do wybranej procedury pomiarowej. Miareczkowanie EDTA w obecności kalcesu spowoduje zmianę koloru roztworu filtratu z fioletowego na niebieski. Koncentracja  $\text{Ca}^{2+}$  jest wprost proporcjonalna do zużytej ilości roztworu EDTA i odwrotnie proporcjonalna do ilości filtratu pobranego do analizy. Reduktorem jonów wapnia w warunkach polowych jest węglan sodu  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

**Oznaczanie koncentracji jonów magnezu  $\text{Mg}^{2+}$**  – większość materiałów płuczkowych wykazuje się nietolerancją wobec obecności magnezu w filtracie. Jony te mogą pochodzić zarówno z wody zarobowej, jak i przewiercanej formacji (wód podziemnych). Metoda oznaczania jonów magnezu musi być skojarzona z metodą oznaczania jonów wapnia, ponieważ oznaczamy w niej sumaryczną zawartość jonów dwuwartościowych. Do przeprowadzenia analizy chemicznej potrzebne są filtrat płuczki, woda destylowana, szkło laboratoryjne oraz następujące odczynniki: czerni eriochromowa (wskaźnik), roztwór EDTA (wersenian dwusodowy), bufor amonowy i roztwór TEA (trietanoloamina). Stężenia odczynników należy dostosować do wybranej procedury pomiarowej. Miareczkowanie EDTA w obecności czerni eriochromowej spowoduje zmianę koloru roztworu filtratu z fioletowego na niebieski. Ilość zużytego EDTA do miareczkowania należy pomniejszyć o ilość EDTA zużytej przy oznaczaniu jonów wapnia. Koncentracja  $\text{Mg}^{2+}$  jest wprost proporcjonalna do uzyskanej różnicy ilości roztworu EDTA i odwrotnie proporcjonalna do ilości pobranego do analizy filtratu. Reduktorem jonów magnezu w warunkach polowych jest wodorotlenek sodu NaOH.

## INNE POMIARY WŁASNOŚCI PŁYNÓW WIERTNICZYCH

Omówione w powyższych podrozdziałach metody wyznaczania właściwości płynu wiertniczego nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwości i wszystkich procedur laboratoryjnych zawartych w normie Amerykańskiego Instytutu Naftowego. Tym niemniej opisują zdecydowaną większość badań i testów laboratoryjnych, z jakimi spotykamy się w branży bezwykopowej budowy. Wśród innych możliwych do wykonania analiz warto wymienić:

- oznaczenie lepkości Brookfielda LSRV – pomiar lepkościerzem Brookfielda,
- oznaczenie alkaliczności filtratu Pf i Mf – analiza chemiczna,
- oznaczenie aktywnych części bentonitu – analiza chemiczna,
- oznaczenie zawartości fazy stałej – retorta elektryczna (piec do wygrzewania płuczki),
- badanie smarności płuczki wiertniczej – pomiar urządzeniem typu *Lubricity Tester*.

## PROGRAM PŁUCZKOWY

Jest to formalny plan dotyczący właściwości płynu wiertniczego i parametrów technologicznych rekomendowanych dla konkretnego projektu, zawierający przewidywania i wymagania dla poszczególnych etapów prac. Należy go traktować jako kierunek, w którym należy podążać. Każdy parametr powinien być podawany w akceptowalnym przedziale (możliwie najwęższym zakresie). Dzięki zaprojektowaniu i wdrożeniu programu płuczkowego można ograniczyć problemy technologiczne związane z uzyskiwanym postępem wiercenia, transportem fazy stałej, bilansowaniem przepływów, utrzymywaniem czystego czoła narzędzia (tarczy mikrotunelowej), kontrolą tarcia w otworze, kontrolą ciśnień dennych, utrzymywaniem integralności ściany, kontrolą realizowanej trajektorii.

Pierwszym krokiem w planowaniu dowolnego programu jest zebranie wszystkich dostępnych danych. W trakcie tworzenia i kontrolowania programu płuczkowego należy wziąć pod uwagę co najmniej:

- informacje zawarte w raporcie geologicznym,
- parametry geometryczne przekroczenia

- instalacji wiertniczej (długość, średnicę, głębokość, zmiany kątowe),
- spodziewane ciśnienie porowe formacji,
- spodziewane ciśnienia dopuszczalne,
- spodziewane ciśnienia denne,
- możliwości mechaniczne urządzenia wiertniczego,
- przepustowość systemów płuczkowych,
- tolerancję płynu na aktywną fazę stałą,
- tolerancję płynu na skażenia chemiczne,
- ograniczenia związane ze środowiskiem naturalnym,
- dostępność niezbędnych do zrealizowania programu komponentów,
- wartość budżetu przeznaczanego na operacje płuczkowe,
- wartość budżetu przeznaczanego na obsługę inżynierską projektu.

Rekomendowany program płuczkowy powinien być realistyczny i dostosowany z jednej strony do założeń projektu, z drugiej jednak strony powinien uwzględniać możliwości sprzętowe, materiałowe i organizacyjne wykonawcy robót wiertniczych. Program służy do oceny jakości cyrkulującego w otworze płynu. W programie znajdują się zarówno parametry wynikające z bezpośrednich pomiarów standardowymi przyrządami, jak i parametry będące rezultatem przekształceń i kalkulacji. Każda doświadczona firma wiertnicza powinna umieć przygotować i skontrolować podstawowy program płuczkowy zawierający od 6 do 8 kluczowych parametrów. Realizację projektów o wysokim stopniu trudności (projekty o podwyższonym poziomie ryzyka) należy prowadzić we współpracy z serwisem płuczkowym zatrudniającym doświadczonych analityków i inżynierów polowych.

Ze względu na znaczące różnice w zachowaniu się przewiercanych formacji geologicznych nie można mówić o stworzeniu uniwersalnego programu spełniającego większość kryteriów technicznych i ekonomicznych w każdej sytuacji i w każdym projekcie. Nie ma bowiem jednego rozwiązania odpowiedniego dla wszystkich warunków. Jednak ostateczny cel każdego programu jest taki sam: uzyskanie spodziewanej wydajności wiercenia i utrzymanie kosztów na racjonalnym poziomie.

W tab. 3 podano przykład programu płuczki dostosowanego do specyfiki metody HDD i DSPT. Wartości umieszczone w programie należy traktować wyłącznie jako ilustrację omawianego zagadnienia.

## REKOMENDACJE DLA RÓŻNYCH TECHNIK BUDOWY

Minimalne wyposażenie laboratorium płuczki w trakcie realizacji wiertniczych

projektów bezwykopowych jest zależne od kategorii projektu i jego stopnia trudności zwłaszcza w obszarze geologicznym. Sprzęt pomiarowy może być własnością firmy wiertniczej lub zewnętrznego serwisu płuczki.

Parametr	Przyrząd	Jednostka	Mierzony	Kalkulowany	Częstotliwość pomiaru	Wartość rekomendowana dla projektu	
						HDD	DSPT
Gęstość płuczki wejściowej	Waga płuczki	g/cm <sup>3</sup>	x		2 - 3 h	< 1,15	< 1,10
Gęstość płuczki wychodzącej	Waga płuczki	g/cm <sup>3</sup>	x		2 - 3 h	< 1,30	< 1,25
Ekwiwalentny ciężar właściwy płuczki ECD	Modelowanie reologiczne	G/cm <sup>3</sup>		x	3 - 4 h	< 2,30	
Zawartość piasku na wejściu	Zestaw do pomiaru zapiaszczenia	% obj.	x		6 h	< 1	< 3
Zawartość piasku na wyjściu	Zestaw do pomiaru zapiaszczenia	% obj.	x		6 h	< 15	
Profil lepkościowy	Lepkościomierz obrotowy	°Fann	x		3 h	Należy przeprowadzić analizę naprężenia dla co najmniej 6 prędkości ścinania	
Lepkość plastyczna PV	Lepkościomierz obrotowy	mPas		x	3 h	< 15	< 12
Granica płynięcia YP	Lepkościomierz obrotowy	Pa		x	3 h	Zależna od poziomu PV i LSYP	
Granica płynięcia przy niskich prędkościach ścinania LSYP	Lepkościomierz obrotowy	Pa		x	3 h	> 12	> 6
Stosunek LSYP : YP	Lepkościomierz obrotowy	-		x	3 h	> 0,6	> 0,5
Żel 10" / 10'	Lepkościomierz obrotowy	°Fann	x		3 h	> 20/25	> 10/10
LSRV płuczki obiegowej	Lepkościomierz obrotowy Lepkościomierz Brookfielda	mPas	x		3 h	> 80 000	> 40 000
LSRV cieczy smarnej	Lepkościomierz obrotowy Lepkościomierz Brookfielda	mPas	x		6 h		> 120 000
Filtracja API	Prasa filtracyjna	ml / 30' @ 100 psi	x		12 h	< 15	< 20
Zawartość chlorków	Analiza chemiczna	mg/l	x		12 h	< 1000	< 2000
Zawartość wapnia	Analiza chemiczna	mg/l	x		12 h	< 200	
pH filtratu	pH-metr elektroniczny	-	x		6 - 12 h	> 7,5	> 7,5
pH płuczki	pH-metr elektroniczny	-	x		6 - 12 h	> 8,0	> 8,0
Przewodność filtratu	Konduktometr elektroniczny	mS/cm	x		12 h	< 3	< 5

TAB. 3. | Przykładowy program płuczki dla projektów realizowanych z użyciem technik wiertniczych

Parametr	Przyrząd pomiarowy	Technika wiertnicza				
		Maxi HDD	Midi HDD	Mini HDD	DSPT	MT
Gęstość	Waga ramienna	***	***	***	***	***
Lepkość umowna	Lejek Marsha	*	**	***	**	**
Profil lepkościowy	Lepkościomierz obrotowy	***	**	*	***	***
Żele	Lepkościomierz obrotowy	***	**	*	***	***
Wytrzymałość strukturalna	Szirometr	*	**	**	*	*
Filtracja API	Prasa filtracyjna	***	**	*	**	**
Grubość osadu filtracyjnego	Prasa filtracyjna	**	*	*	*	*
Zawartość piasku	Zestaw pomiarowy	***	***	***	***	***
pH	Przyrząd elektroniczny	***	***	***	***	***
Przewodność	Przyrząd elektroniczny	***	**	**	**	**
Zawartość jonów Cl <sup>-</sup> , Ca <sup>+2</sup> , Mg <sup>+2</sup>	Analiza chemiczna	***	**	*	**	**
Zawartość aktywnych części bentonitu	Analiza chemiczna	**	*	*	**	**
Testy materiałów, przygotowanie i obróbka płuczki	Mieszadło szybkoobrotowe Hamilton Beach	***	**	*	***	***

TAB. 4. | Zalecenia ROE dotyczące zakresu wykonywanych badań laboratoryjnych

Zakres wyposażenia jest wprost zależny od zaakceptowanego programu płuczkowego. W tab. 4 zestawiono rekomendacje dotyczące wykonywania połowych pomiarów laboratoryjnych w poszczególnych technikach wiertniczych. Poszczególne parametry płynu zostały zestawione z koniecznym do ich ustalenia przyrządem pomiarowym. Parametry wymagane zostały oznaczone \*\*\*, parametry zalecane zostały oznaczone \*\*, parametry opcjonalne oznaczono \*.

## PODSUMOWANIE

Płyny wiertnicze mają kilka podstawowych właściwości, które określają ich zachowanie i predyspozycje do spełniania krytycznych funkcji – gęstość, lepkość, siła żelowania, zawartość fazy stałej i filtracja. Należy kontrolować też inne właściwości, zwłaszcza jeśli przewiduje się napotkanie problemów technologicznych. Właściwości uzupełniające obejmują zawartość piasku, pH i przewodność filtratu, a także koncentrację podstawowych jonów. Specjalistyczne firmy dostarczają laboratoryjny sprzęt pomiarowy do pomiaru każdego z omówionych w niniej-

szym artykule parametrów płynu wiertniczego. Skomplikowane projekty wymagają zaangażowania kompletu urządzeń pomiarowych, standardowe zadania stawiają w tym względzie niższe wymagania, tym niemniej nie spotyka się przedsięwzięć wiertniczych, które całkowicie mogą pominąć kwestie ustalania i monitoringu podstawowych właściwości płynów wiertniczych. Proste testy terenowe dotyczące lepkości i gęstości, w połączeniu ze zrozumieniem technologii wiercenia i możliwości dostępnych produktów płuczkowych, mogą zaspokoić w znacznej części potrzeby wiertnicze.

W kolejnej części cyklu przedstawimy zagadnienia związane z kalkulacjami inżynierskimi i tworzeniem raportów technologicznych. |

## WYKAZ SKRÓTÓW UŻYTYCH W NINIEJSZYM ARTYKULE

**AADE** – American Association of Drilling Engineers  
**ACB** – aktywne części bentonitu  
**API** – American Petroleum Institute  
**AV** – Apparent Viscosity (lepkość pozorna)

**BPRM** – Bingham Plastic Rheological Model  
**CCI** – Carrying Capacity Index (wskaźnik potencjału systemu do transportu zwiercin)  
**ECD** – Equivalent Circulating Density (ekwiwalentna gęstość płuczki)  
**EDTA** – ethylenediaminetetraacetic acid (kwas wersentowy)  
**DSPT** – Direct Steerable Pipe Thrusting  
**FV** – Funnel Viscosity (lepkość umowna)  
**HBRM** – Hershel-Bulkley Rheological Model  
**HDD** – Horizontal Directional Drilling  
**LRSV** – Low Shear Rate Viscosity (lepkość mierzona przy niskich prędkościach ścinania)  
**LSYP** – Low Shear Yield Point (granica płynięcia w modelu Zamory)  
**MT** – Microtunneling  
**PLRM** – Power Law Rheological Model  
**PV** – Plastic Viscosity (lepkość plastyczna)  
**ROE** – Robert Osikowicz Engineering  
**ROP** – Rate of Penetration (postęp wiercenia)  
**RPM** – Revolution Per Minute (obroty na minutę)  
**SG** – Specific Gravity (ciężar właściwy)  
**SR** – Shear Rate (prędkość ścinania)  
**SS** – Shear Stress (naprężenie ścinające)  
**TDS** – Total Dissolved Solids (ilość substancji rozpuszczonych)

**TEA** – trietanolamina

**WBM** – Water Based Mud (widnodispersyjny płyn wiertniczy)

**WL** – Water Loss (filtracja płuczki)

**YP** – Yield Point (granica płynięcia w modelu Bingham)

**YPLRM** – Yield Power Law Rheological Model

$\theta_{600}$  – odczyt naprężenia z lepkościomierza obrotowego przy zadanej prędkości obrotowej

$\mu_p$  – lepkość plastyczna

$\tau$  – naprężenie ścinające

$\tau_o, \tau_y$  – granica płynięcia

$\gamma$  – prędkość ścinania

$n$  – laminar flow behavior index (wykładnik potęgowy)

$k$  – laminar consistency factor (współczynnik konsystencji)

## LITERATURA

- [1] Agwu O. i inni: Critical Review of Drilling Mud Rheological Models, Journal of Petroleum Science and Engineering 203 (2021).
- [2] American Petroleum Institute: Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluid API 13B-1. Fifth Edition 2019.
- [3] Baker Hughes Inteq: Drilling Fluids Reference Manual, 2007 Edition.
- [4] Bielewicz D.: Płyny wiertnicze, 2009 Wydawnictwa AGH.
- [5] Bridges S., Robinson L.: A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing, Elsevier Science 2020.
- [6] Caenn R.: Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Elsevier Science 2011.
- [7] Drilling Contractors Association (DCA): HDD Technical Guidelines – Fourth Edition, Aachen 2016.
- [8] HDD Consortium: Good Practice Guidelines, Fourth Edition 2017.
- [9] Izba Gospodarcza Gazownictwa: Standard Techniczny: Technologie bezwykopowe, horyzontalne przewierci sterowane ST-IGG-3301:2021, Warszawa 2022.
- [10] Najafi M.: Trenchless Technology. Planning, Equipment and Methods, McGraw-Hill 2013.
- [11] Osikowicz R.: Krytyczne funkcje płynów wiertniczych, „Inżynieria Bezwykopowa” 1/2005.
- [12] Osikowicz R.: Wprowadzenie do inżynierii płynów wiertniczych cz. I i II, „Inżynieria Bezwykopowa” 4/2023, 1/2024.
- [13] Stryczek S. i inni: Poradnik Górnika Naftowego. Tom II. Wiertnictwo, Stowarzyszenie Naukowo-Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków 2015.
- [14] Zamora M., Power D.: Making a Case for AADE Hydraulics and the Unified Rheological Model, AADE Conference, Houston 2002.