

BEZWYKOPOWA BUDOWA

WPROWADZENIE DO INŻYNIERII

PŁYNÓW WIERTNICZYCH

CZĘŚĆ 1: DEFINICJE – IDEA – FUNKCJE

■ 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 są funkcje płynów wiertniczych w technikach bezwykopowej budowy rurociągów,
- ☑ w jaki sposób można zredukować poziom niepewności i ryzyka podczas wiercenia,
- ☑ jakie działania należy podjąć w celu stworzenia optymalnie działającego płynu wiertniczego.

Pierwszy z cyklu artykułów poświęconych problematyce technologii płynów wiertniczych przedstawia zagadnienia dotyczące zadań płynów w technikach bezwykopowej budowy rurociągów, z uwzględnieniem zarówno metody HDD, jak i metod przeciskowych (DSPT i mikrotunelowanie). Artykuł ma za zadanie uzasadnić tezę, że płyn wiertniczy to jeden z najistotniejszych i zarazem niezbędnych elementów technologicznych, odgrywa kluczową rolę w optymalizacji procesu wiercenia otworów dla inżynierskich instalacji rurociągowych.

1. DEFINICJE TECHNIK WIERTNICZYCH

Trzy przywołane powyżej techniki są powszechnie uznawane za najbardziej zaawansowane wiertnicze metody budowy rurociągów. Podlegają one naturalnej ewolucji i ciągłemu rozwojowi. Możliwe aplikacje są poszerzane i modyfikowane w taki sposób, aby cały proces odbywał się w sposób bezpieczny i zgodnie z ogólnie akceptowanymi standardami przemysłu. Jak wynika z przed-

stawionych poniżej definicji, proces drążenia otworu, niezależnie od wybranej metody, zakłada wykorzystanie płynu wiertniczego.

Terminem **HDD** (*Horizontal Directional Drilling*) określa się zaawansowaną i uniwersalną technikę należącą do bezwykopowych metod budowy infrastruktury podziemnej. HDD polega na płuczkowym, kierunkowym wierceniu otworów z użyciem przewodu wiertniczego w celu instalacji podziemnych rurociągów, kabli lub dla osiągnięcia zdefiniowanego celu technicznego. Jest to me-

toda kilkuetapowa. Wykorzystywana jest dla realizacji projektów zlokalizowanych na lądzie (*onshore*), na styku z morzem (*shoreline*) i na morzu (*offshore*).

Terminem **DSPT** (*Direct Steerable Pipe Thrusting*) określa się rodzinę metod hybrydowych rozumianą jako jednoetapową sterowaną technikę wiertniczą, łączącą cechy co najmniej dwóch metod bezwykopowej budowy, wykorzystującą zamknięty obieg **płuczki**, stację pchającą i głowicę mikrotunelową wraz z osprzętem. Proces drążenia tunelu odbywa się po ściśle zaprojektowanej trajektorii z jednoczesną zabudową stalowego rurociągu. Technika wykorzystywana jest dla realizacji projektów zlokalizowanych na lądzie, do przekraczania przeszkód naturalnych, w tym linii brzegowej, rzek i zbiorników wodnych. Jednym z możliwych wariantów metody jest technika *Direct Pipe*®.

Terminem **mikrotunelowanie MT** (*Micro-tunneling*) określa się jednoetapową technikę wiertniczą, służącą bezwykopowej budowie instalacji podziemnych, która wykorzystuje zdalnie sterowane urządzenie MTBM w połączeniu ze stacją siłowników, odpowiadającą za wciskanie rur przeciskowych. Rurociąg (kolektor) instalowany jest w pojedynczym przejściu od komory nadawczej do komory odbiorczej. W większości przypadków technika wykorzystuje zamknięty obieg **płuczki**. Technika wykorzystywana jest dla realizacji projektów zlokalizowanych głównie na terenach zurbanizowanych, ale także do przekraczania przeszkód naturalnych czy szlaków komunikacyjnych.

2. IDEA PŁYNU WIERTNICZEGO

Wiercenie można zdefiniować jako działanie, w którym należy zachować właściwe proporcje pomiędzy zwiercaną fazą stałą, tłoczonym do otworu strumieniem płuczki oraz panującym w otworze ciśnieniem. ROE proponuje definicję, w myśl której płuczka wiertnicza stosowana w technikach bezwykopowych to płyn wodnodispersyjny, użyty w procesie wiercenia oraz spełniający wyznaczone mu zadania (funkcje). Woda stanowi ośrodek rozpraszający, a komponenty płuczki i faza stała, pochodzące z wiercenia – ośrodek rozpraszany. Płyn posiada

Płuczka wiertnicza stosowana w technikach bezwykopowych to płyn wodnodispersyjny, użyty w procesie wiercenia oraz spełniający wyznaczone mu zadania (funkcje)



określoną charakterystykę reologiczną i jest niezbędnym składnikiem procesu wiercenia.

Prawidłowe zastosowanie płuczki to warunek konieczny do odniesienia sukcesu w projektach wiertniczych. Większość zidentyfikowanych problemów i komplikacji technicznych wynika z błędów popełnionych w technologii wiercenia. Poziom niepewności i ryzyka operacyjnego można zredukować, stosując odpowiedni system płuczki i właściwe procedury związane z jego obsługą. System płuczki rozumiany jest tutaj jako synergiczne działanie założonej kompozycji chemicznej, parametrów fizyko-chemicznych płynu, a także parametrów układu cyrkulacyjnego. Praktyczne zastosowanie płynów w technikach bezwykopowej budowy mieści się w kilku kategoriach:

- płyn cyrkulujący w otwartym otworze HDD,
- płyn cyrkulujący w instalacji mikrotunelowej lub DSPT,
- płyny smarne i podsadzkowe,
- zaczyny cementowe wypełniające i uszczelniające,
- ciecz służące balastowaniu rurociągów.

Woda – jako płuczka – stosowana jest w trakcie nieskomplikowanych, krótkich instalacji. Na użytek większych projektów kompozycja płuczki jest bardziej skomplikowana. Zawiera składniki odpowiadające za parametry lepkościowe, poziom filtracji oraz zdolności inhibicyjne. Termin płyn wiertniczy jest wykorzystywany w celu podkreślenia, że nie jest on pospolitą zawiesiną, lecz suspensją o kontrolowanej charakterystyce reologicznej.

Płuczki sporządzane na bazie wody są na ogół łatwe w sporządzaniu, niedrogie w utrzymaniu i można je tak skonstruować, aby przewyciężyć większość problemów

związanych z wierceniem. Aby lepiej zrozumieć szerokie spektrum płynów na bazie wody, podzielimy je na dwa główne typy: płyny nieinhibitowane oraz płyny inhibitowane.

Płyny nieinhibitowane to takie, które nie hamują znacząco pęcznienia iltu (minerałów ilastych), składają się zazwyczaj z iltów rodzimych lub dostępnych na rynku bentonitów. Faza stała powstała w wyniku procesu wiercenia może ulegać rozproszeniu (dyspersji) w płynie. Najczęściej właściwości płuczki kontrolowane są poprzez dodatek materiału ilastego (zwiększenie lepkości) lub wody (zmniejszenie lepkości). Tak skonstruowany system ma umiarkowaną tolerancję na fazę stałą.

Płyny inhibitowane to takie, które znacznie opóźniają pęcznienie iltu i osiągają swoje właściwości dzięki obecności kationów: wapnia (Ca++) lub potasu (K+). Ogólnie rzecz biorąc, K+ lub Ca++, lub ich kombinacja, zapewniają największą inhibicję wobec pęcznienia materiałów ilastych. Systemy te są powszechnie stosowane do przewiercania łupków, iltów i glin zawierających frakcję iltową. Źródłem kationu w płuczce są zazwyczaj sole.

Zasadniczo obydwa wymienione powyżej typy płynów mogą zawierać związki polimerowe o pochodzeniu naturalnym lub syntetycznym. Związki te wchodzi lub też nie wchodzi w interakcję z materiałem ilastym w celu zapewnienia określonych właściwości płuczki i są bardzo zróżnicowane w swoim zastosowaniu. Polimery można stosować do zwiększania lepkości płynów, kontrolowania właściwości filtracyjnych lub kapsułkowania fazy stałej. Systemy wspomagane polimerami – pomimo wielu pozytywnych cech i pomimo swojej różnorodności – wykazują ograniczenia, które mogą być widoczne w aplikacjach technik bezwykopowych. Główną przeszkodą (zagrożeniem) dla po-

myślnego funkcjonowania ekonomicznego systemu płuczki polimerowej jest faza stała.

3. FUNKCJE KRYTYCZNE I POMOCNICZE

Przedstawione powyżej uwagi dotyczą wszystkich kategorii płynów wiertniczych. Niezależnie od zastosowanej kompozycji płyn cyrkulujący wewnątrz wierconego otworu (HDD) lub wewnątrz instalowanego rurociągu (DSPT, MT) powinien dobrze spełniać zadania (funkcje), do których został stworzony. Wiele funkcji może zostać uznanych za uniwersalne. Dadzą się one zakwalifikować do kilkunastu wyodrębnionych kategorii. Stopień istotności poszczególnych funkcji płynu może się zmieniać wraz z typem przewiercanej formacji geologicznej, a te zmieniają się często kilkakrotnie w trakcie długiego wiercenia. Opracowanie uniwersalnego składu płynu z możliwością modyfikacji parametrów technicznych i zdolności inhibicyjnych jest więc zagadnieniem kluczowym.

Dla stworzenia optymalnie działającego płynu wiertniczego każda z kilkunastu wymienionych poniżej funkcji musi być rozważona i w miarę możliwości realizowana. Niedotrzymanie jednej lub kilku krytycznych funkcji może skutkować komplikacjami wiertniczymi, a w skrajnym przypadku doprowadzić do kosztownych awarii. Funkcje realizowane są dzięki współdziałaniu prawidłowo zaprojektowanego płynu i technologii wiercenia otworu.

Należy pamiętać, że różne parametry płuczki mogą wpływać na konkretną funkcję. Nawet jeśli inżynier płuczki zmienia tylko jedną lub dwie właściwości (parametry) w celu kontrolowania danej funkcji

płuczki wiertniczej, może to mieć istotny wpływ również na inną. Inżynieria płynów wiertniczych prawie zawsze wymaga kompromisu w obróbce i utrzymaniu właściwości niezbędnych do spełnienia wymaganych funkcji. Wysoka lepkość może poprawić skuteczność transportu zwiercin, ale może jednocześnie obniżyć wydajność hydrauliczną, zmniejszyć postęp wiercenia, utrudnić rozdział faz w urządzeniach do mechanicznej separacji oraz zmienić wymagania dotyczące rozcieńczania i obróbki chemicznej. Doświadczeni inżynierowie są świadomi konieczności zawierania kompromisów i rozumieją, jak ulepszyć jedną funkcję, minimalizując jednocześnie wpływ zmian właściwości płuczki na inne funkcje.

Omówimy najważniejsze funkcje w kolejności istotności dla procesu. Ze względu na zasadniczą odrębność techniki HDD od metod przeciskowych podobne funkcje mają różną pozycję i stopień istotności dla procesu. Z tego też względu zostaną przedstawione oddzielnie.

3.1. PODSTAWOWE FUNKCJE PŁYNU W PROCESIE HDD

W literaturze przedmiotu poświęconej HDD wymienia się najczęściej od siedmiu do dziesięciu zadań, jakie krążąca w obiegu zamkniętym płuczka ma do spełnienia. Na potrzeby niniejszego tekstu wyodrębniono piętnaście funkcji, które uporządkowano pod względem stopnia istotności i wpływu na proces wiertniczy. Wskazano ponadto na podstawowe instrumenty oddziaływania i manipulacji daną funkcją, a także na monitorowane parametry jej dotyczące.

Poniżej dokonano szczegółowego przeglądu najistotniejszych zadań stawianych

przed płynem wiertniczym wykorzystywanym w technice HDD. Choć ocena poszczególnych funkcji ma charakter subiektywny, to ich hierarchia (pozycja w rankingu) jest wynikiem wieloletniej obserwacji rynku i ponad stu przeprowadzonych skutecznie projektów wiertniczych.

Transmitowanie energii hydraulicznej (pozycja 1 – funkcja krytyczna)

Płyn wiertniczy jest medium transmitującym energię hydrauliczną do systemu. Jest ona potrzebna do przetłoczenia płuczki poprzez powierzchniowy system płuczki, przewód wiertniczy do dysz narzędzia, a następnie poprzez przestrzeń pierścieniową (pomiędzy przewodem wiertniczym a ścianą otworu) na powierzchnię. Urabianie formacji w technice HDD jest skutkiem synergicznego działania energii mechanicznej (dostarczanej na spód otworu przez urządzenie wiertnicze za pomocą przewodu wiertniczego) i energii hydraulicznej, będącej funkcją strumienia przepływu, oraz spadku ciśnienia w dyszach narzędzia. Energia hydrauliczna często jest określana w odniesieniu do powierzchni przekroju poprzecznego urabianej formacji. Źródłem energii hydraulicznej będzie pompa płuczki odpowiedzialna nie tylko za utrzymanie wymaganego wydatku płuczki, ale także za pokonanie oporów przepływu pojawiających się w związku z krążeniem płuczki w układzie cyrkulacyjnym. Ponieważ wraz z odległością rosną straty ciśnienia wewnątrz przewodu, możemy osiągnąć punkt, w którym dostępna energia w narzędziu wiertniczym będzie niewystarczająca dla osiągnięcia zadowalającego postępu wiercenia.

Transport zwiercin przestrzenią pierścieniową na powierzchnię (pozycja 2 – funkcja krytyczna)

Zwierciny powstałe w procesie wiercenia muszą zostać wyprowadzone przez płuczkę na powierzchnię. Transport zwiercin powinien odbywać w sposób ciągły. Brak należytej kontroli w tym zakresie może skutkować problemami technologicznymi takimi jak: wysokie obciążenia rejestrowane na prze-

Dla stworzenia optymalnie działającego płynu wiertniczego każda z kilkunastu wymienionych w artykule funkcji musi być rozważona i w miarę możliwości realizowana



Pozycja w rankingu	Funkcja (zadanie) płynu	Stopień istotności	Wpływ na proces wiercenia	Podstawowe instrumenty oddziaływania	Parametry monitorowane i raportowane
1	Transmitowanie energii hydraulicznej (bezpośrednie wspieranie postępu wiercenia)	krytyczny	bezpośredni	Strumień przepływu Geometria dysz narzędzia	Prędkość w dyszach Spadek ciśnienia w dyszach Moc hydrauliczna
2	Transport zwiercin przestrzenią pierścieniową z dna otworu na powierzchnię	krytyczny	bezpośredni	Parametry płuczki Strumień przepływu Postęp wiercenia	Koncentracja zwiercin Bilans fazy stałej Wskaźnik CCI
3	Utrzymywanie w stanie zintegrowanym ściany otworu (kontrola ciśnień wgłębnych)	krytyczny	bezpośredni	Parametry płuczki Geometria otworu Trajektoria otworu Strumień przepływu	Ciśnienie denne ECD Moc hydrauliczna Profil reologiczny
4	Czyszczenie czoła narzędzia	krytyczny	bezpośredni	Strumień przepływu Kompozycja płuczki Postęp wiercenia	Jednostkowa moc hydrauliczna Koncentracja zwiercin
5	Utrzymywanie zwiercin w suspensji w trakcie cyrkulowania w otworze i w stanach statycznych	krytyczny	bezpośredni	Parametry płuczki Geometria otworu Strumień przepływu Rozmiar zwiercin	Profil reologiczny Wskaźnik CCI
6	Redukcja tarcia	krytyczny	bezpośredni	Kompozycja płuczki Koncentracja zwiercin	Torque & Drag Współczynnik tarcia
7	Odprowadzenie ciepła	istotny	bezpośredni	Strumień przepływu Parametry płuczki	Temperatura płuczki Temperatura sondy pomiarowej
8	Napędzanie silnika wgłębego	istotny	bezpośredni	Strumień przepływu Konfiguracja motoru Parametry pompy płuczkowej	Postęp wiercenia Ciśnienie różnicowe
9	Inhibitowanie warstw aktywnych (o ile funkcjonują w otworze)	istotny	bezpośredni	Kompozycja płuczki	Koncentracja zwiercin ilastych Koncentracja inhibitorów
10	Uszczelnianie stref chłonnych	istotny	bezpośredni	Parametry płuczki Kompozycja płuczki	Bilans płynu
11	Kontrola wyporności instalowanego rurociągu	istotny	pośredni	Parametry płuczki Parametry rurociągu Balastowanie płynem	Bilans fazy stałej Siły tarcia w trakcie instalacji
12	Ograniczanie zjawisk związanych z korozją	istotny	pośredni	Kompozycja płuczki	
13	Dostarczanie informacji geologicznych i technologicznych	pomocniczy	pośredni	Parametry płuczki Strumień przepływu	Ocena makroskopowa fazy stałej
14	Możliwość rozdziału faz w mechanicznych urządzeniach do oczyszczania	pomocniczy	pośredni	Parametry płuczki Kompozycja płuczki	Koncentracja fazy stałej Bilans masy
15	Możliwość przetłaczania przez infrastrukturę rurociągową	pomocniczy	pośredni	Parametry płuczki Geometria instalacji Parametry pomp cyrkulacyjnych	Spadek ciśnienia w układzie

TAB. 1. | Zestawienie funkcji płynu wiertniczego w technice HDD

wodzie (wzrost tarcia) czy zanik prawidłowego krążenia płuczki. Zbyt duża ilość pozostającego w otworze urobku obniża postęp wiercenia. Transport zwiercin to zagadnienie interdyscyplinarne powiązane zarówno z parametrami reologicznymi płynu, jak i parametrami technologicznymi wiercenia. Idealny płyn cyrkulujący w otworze to taki, który utrzymuje w zawieszeniu zwiercinę, posiadając przy tym możliwość transportu przy niskiej różnicy ciśnień. W przypadku zwiercin o rozmiarze przekraczającym zdolności transportowe płuczki w strudze należy przyjąć, że jedynym sposobem na ich wyprowadzenie będzie mechaniczne tłokowanie. Zjawisko to jest kojarzone z dodatkowymi marszami kalibrującymi (czyszczącymi).

Utrzymywanie w stanie zintegrowanym ściany otworu (pozycja 3 – funkcja krytyczna)

Kontrolowany proces drążenia otworu zakłada powstanie stabilnego wyrobiska wypełnionego płuczką wierniczą zmieszaną z urobkiem. Szczególną uwagę należy poświęcić zapewnieniu równowagi ciśnień. Dla zachowania stabilnej ściany otworu i prawidłowego obiegu płuczki należy zadbać, aby ciśnienie denne było większe od ciśnienia porowego (dla zapobiegania zapadania otworu i dopływom wód gruntowych), ale też zarazem mniejsze niż ciśnienie szczelinowania nadkładu (maksymalnego ciśnienia dopuszczalnego). W większości analizowanych przypadków otwór pozostanie stabilny, dopóki będzie się w nim znajdował płyn wierniczy. Ciśnienie denne w stanie statycznym jest wprost proporcjonalne do gęstości płuczki i aktualnej głębokości punktu pomiarowego (ciśnienie hydrostatyczne). Ciśnienie denne w stanie dynamicznym jest ciśnieniem hydrostatycznym powiększonym o opory przepływu płuczki (szlamu wierniczego) od aktualnego punktu pomiarowego do wylotu otworu. Strata ciśnienia (opory przepływu) wiąże się ściśle z parametrami płynu.

Stabilność otworu to złożona równowaga czynników mechanicznych (ciśnienie i naprężenie) i chemicznych. Kompozycja

chemiczna musi współgrać z parametrami płuczki, aby zagwarantować stabilny otwór do czasu instalacji rurociągu. Idealna stabilność otworu jest identyfikowana z wyrobiskiem o nominalnym rozmiarze i cylindrycznym kształcie. Gdy otwór ulegnie erozji lub powiększeniu w jakikolwiek sposób, ściana staje się słabsza i trudniejsza do ustabilizowania. Niestabilność ściany otworu jest najczęściej identyfikowana jako podatność na tworzenie kawern, wrębów, naturalnych przewężeń. Często powoduje to konieczność przerabiania otworu dla uzyskania wymaganej stateczności. Część deformacji wiąże się z inną krytyczną funkcją płynu, jaką jest skuteczny transport urobku.

Czyszczenie czoła narzędzia (pozycja 4 – funkcja krytyczna)

Dla poprawnego przebiegu procesu wiercenia wymagane jest, aby zapewnić skuteczny odbiór zwiercin z dna otworu. Istotną rzeczą jest skorelowanie wydatku pompy z postępem wiercenia, aby mieć pewność, że czoło otworu jest zawsze pozbawione urobku. Płuczki o niskiej zawartości fazy stałej i kontrolowanej lepkości będą bardziej efektywne w dostarczaniu możliwie dużej porcji energii do narzędzia – nie tylko dla prawidłowego urabiania, ale i oczyszczania dna otworu. Wymagany strumień płuczki tłoczony do otworu jest zależny od typu i średnicy narzędzia. Parametrami raportowanymi (mierzonymi i kalkulowanymi) w związku z tą funkcją będą: strumień przepływu, ilość zwiercin generowana w jednostce czasu, jednostkowa moc hydrauliczna.

Utrzymywanie zwiercin w suspensji w trakcie cyrkulowania w otworze i w stanach statycznych (pozycja 5 – funkcja krytyczna)

Jest to zadanie powiązane z transportem zwiercin. Mechanizm na pierwszy rzut oka wydaje się stosunkowo nieskomplikowany. Cyrkulująca płuczka odprowadza zwiercinę z czoła otworu i przesuwa je w kierunku wyjścia otworu. Pod wpływem działania siły grawitacji faza stała ma tendencję do opadania na dolną ścianę otworu. Tendencja

ta nasila się w przypadku urobku o dużych rozmiarach. Prędkość sedimentacji cząstek jest funkcją rozmiaru zwiercin, lepkości płynu oraz gęstości płynu i urobku. Im wyższa lepkość, tym prędkość opadania jest niższa. Dla efektywnego usuwania zwiercin z otworu lepkość płuczki musi być prawidłowo skorelowana ze strumieniem tłoczony płuczki. W długich otworach prędkość płynu w przestrzeni pierścieniowej musi być na tyle wysoka, aby przeciwdziałać stałą tendencję do osiadania urobku. Płyn wierniczy jest suspensją o określonej charakterystyce reologicznej. Odpowiedni poziom wybranych parametrów może zapewnić utrzymanie w stanie zawieszenia ziaren (zwiercin) o średnicy od kilku do kilkudziesięciu milimetrów. Płyny wiernicze oparte na bentonitach lub biopolimerach charakteryzuje zjawisko zmiany lepkości w zależności od prędkości ścinania. Objawia się to efektem istotnego zwiększania lepkości w przypadku niskich prędkości ścinania lub szybkiego żelowania w przypadku braku ścinania. Zdolność do budowania lepkości w stanach statycznych i upłynniania w stanie dynamicznego przepływu jest zjawiskiem pożądanym i określa się mianem tiksotropii. Z powyższego komentarza wynika, że trudniej jest utrzymać w zawieszeniu zwiercinę w stanie przepływu niż w stanie spoczynku płuczki.

Redukcja tarcia (pozycja 6 – funkcja krytyczna)

Kontrola tarcia traktowana jest jako funkcja krytyczna z punktu widzenia prowadzenia robót wierniczych. Gdy przewód wierniczy lub instalowany rurociąg dociska do ściany otworu, występują między nimi siły kontaktowe. Siła wymagana do wywołania ruchu posuwistego lub obrotowego jest konsekwencją istnienia sił kontaktowych i określana jest potocznie tarciem występującym w otworze. Płyn wierniczy jest bez wątpienia środkiem smarnym, pozwalającym na manipulowanie przewodem i instalowanie w otworze rurociągu. Jednocześnie spełnia on funkcję ochronną wobec narzędzi i elementów przewodu wierniczego, wydłużając ich żywotność. Dla powodzenia procesu tar-

cie pomiędzy współpracującymi ośrodkami powinno być utrzymane na możliwie niskim poziomie. Poziom współczynnik tarcia jest zależny od rodzaju ośrodków stykających się ze sobą (stal – skała, stal – stal lub tworzywo sztuczne – skała), składu chemicznego płynu oraz zawartości fazy stałej pochodzącej ze zwiercin. Najpewniejszą metodą kontroli zjawiska tarcia jest utrzymanie otworu we właściwej kondycji (drożnego i stabilnego). Oznakami słabego smarowania są wysoki moment obrotowy i opór, nieprawidłowe zużycie elementów przewodu wiertniczego. Zjawiska te mogą być spowodowane poważnymi problemami związanymi z geometrią otworu, pozostawionymi w otworze zwiercinami otworu i nieprawidłową konfiguracją dolnego zestawu przewodu. Zastosowanie środka smarowego (lubrykanta) może zmniejszyć objawy tych problemów, ale aby rozwiązać problem, należy usunąć rzeczywistą przyczynę.

Odprowadzanie ciepła (pozycja 7 – funkcja istotna)

W wyniku wiercenia i pokonywania tarcia w otworze powstaje ciepło. Sprawą oczywistą jest konieczność odprowadzenia ciepła zwłaszcza z dolnej części przewodu wiertniczego. Otwór o niewłaściwej cyrkulacji lub otwór pozbawiony płuczki w przestrzeni pierścieniowej skutkuje nadmiernym wycieraniem się przewodu na zwornikach. Dostarczanie wymaganego przez technologię strumienia objętości płuczki jest sprawą krytyczną z punktu widzenia żywotności narzędzi wiertniczych i węglanych instrumentów pomiarowych. Cyrkulujący płyn utrzymuje na bezpiecznym poziomie temperaturę roboczą sondy pomiarowej, nie dopuszczając do jej przegrzania.

Napędzanie silnika węglanego (pozycja 8 – funkcja istotna)

Płyn wiertniczy jest nieodzownym medium umożliwiającym pracę silnika węglanego na spodzie otworu. Energia hydrauliczna dostarczana do silnika jako konsekwencja przepływu i spadku ciśnienia

jest zamieniana na energię mechaniczną i przekazywana jest bezpośrednio na świder w formie rotacji oraz dostępnego momentu obrotowego. Prędkość obrotowa świdra jest wprost proporcjonalna do strumienia przepływu płuczki. Parametrami raportowanymi (mierzonymi i kalkulowanymi) w związku z tą funkcją będą: strumień przepływu, ciśnienie różnicowe, postęp wiercenia.

Inhibitowanie warstw aktywnych (pozycja 9 – funkcja istotna)

Kiedy zwierciny mieszają się z płuczką, wypadkowe parametry zmieniają się znacząco. Zmiany te są szczególnie wyraźne, jeśli wiercimy w formacji ilastej. Formacja ta wpływa na materializację ryzyka związanego ze stabilnością ściany otworu, transportem zwiercin i potencjalnie wysokim ciśnieniem w otworze. Rekomenduje się działanie prewencyjne w postaci dodatku do płuczki inhibitorów, które opóźniają lub zatrzymują proces dyspersji frakcji iłowej i ograniczają jej wpływ na niekontrolowane budowanie lepkości. W trakcie przewiercania formacji iłowych i iłotupkowych z użyciem płuczek na bazie wody różnice chemiczne powodują interakcje pomiędzy płuczką wiertniczą a ścianą otworu, co może (z czasem) prowadzić do pęcznienia ściany. Do wierceń w formacjach wrażliwych na wodę najlepiej nadają się systemy o dużej zawartości wapnia, choć należy podkreślić, że iły wykazują tak szeroki zakres składu i wrażliwości, że żaden pojedynczy dodatek nie ma uniwersalnego zastosowania.

Uszczelnianie stref chłonnych (pozycja 10 – funkcja istotna)

Wiercenie na głębokościach typowych dla techniki HDD wiąże się z koniecznością zmierzenia się z osadowymi formacjami o niskim stopniu zagęszczenia (żwir, pospółki) lub z warstwami zawierającymi szczeliny i pustki. Formacje silnie przepuszczalne absorbują płyn wiertniczy przy niskim poziomie ciśnienia dennego. Płuczka o określonym składzie i profilu lepkościowym tworzy struktury zbliżone swą postacią

do żelu i migruje do strefy przyotworowej, wzmacniając i doszczelniając ścianę, zapobiegając dalszej niekontrolowanej penetracji płynu do formacji. Najlepszą formą stabilizowania ściany otworu wiertniczego jest jej rozpięcie kontrolowanym ciśnieniem wewnętrznym. Według alternatywnej teorii, na skutek różnicy ciśnień pomiędzy otworem i formacją, filtrat płuczki przedostaje się do porowatego ośrodka, a na ścianie otworu tworzy się osad filtracyjny z fazy stałej. Przy takiej interpretacji zjawiska należy dążyć do tworzenia cienkiego osadu o niskiej przepuszczalności. Parametrem raportowanym w związku z tą funkcją będzie bilans płynu wiertniczego.

Kontrola wyporności instalowanego rurociągu (pozycja 11 – funkcja istotna)

Ważący w powietrzu dziesiątki, a nawet setki ton rurociąg pod wpływem oddziaływania płuczki może charakteryzować się korzystną pływalnością. Redukowane są w ten sposób obciążenia procesu instalacji. Inżynieria płuczkowa pozwala na optymalizowanie zachowania rurociągu poprzez dostosowanie ciężaru właściwego zamkniętej rury do ciężaru właściwego płynu w otworze. Balastowanie rurociągu wodą lub płynem wiertniczym jest najskuteczniejszym sposobem na uzyskanie bezpiecznej wyporności i niskich sił instalacyjnych. Parametrami raportowanymi (mierzonymi i kalkulowanymi) w związku z tą funkcją są: obciążenia wywołane ruchem posuwistym rurociągu oraz współczynnik tarcia.

Ograniczanie zjawisk związanych z korozją (pozycja 12 – funkcja istotna)

Elementy przewodu wiertniczego, które są w ciągłym kontakcie z płuczką wiertniczą są podatne na różne formy korozji. Dlatego ważną funkcją płuczki wiertniczej jest utrzymanie korozji na akceptowalnym poziomie. Ogólnie rzecz biorąc, niskie pH płynu, obecność niektórych polimerów syntetycznych i gazów podnosi poziom zagrożenia. W przypadku projektów, przedmiotem których jest instalacja rurociągów stalowych, inżynieria płuczkowa powinna monitorować

poziom rezystywności szlamu pozostającego w otworze i rezystywności otaczającego gruntu.

Dostarczanie informacji geologicznych i technologicznych (pozycja 13 – funkcja pomocnicza)

Dokładna ocena formacji geologicznej ma kluczowe znaczenie dla powodzenia operacji wiertniczej. Podczas wiercenia obieg płuczki i kontrola zwiercin są monitorowane pod kątem bilansu masy i bilansu objętości. System pomiarów wgłębnych informuje nie tylko o parametrach wiercenia kierunkowego, ale także o dynamicznie zmieniającym się ciśnieniu na spodzie otworu. Śledzenie trendów ciśnienia dennego, analiza odseparowanych próbek okruszkowych pozwalają na bieżąco monitorować i identyfikować warstwy, przez które prowadzone jest wiercenie. Prowadzona równolegle analiza postępu wiercenia i analiza T&D pozwala na bieżąco modyfikować zaprojektowane parametry procesu, a tym samym ograniczać ryzyko geologiczne i środowiskowe. Płuczka wiertnicza ma wpływ na wszystkie te metody oceny formacji. Na przykład, jeśli zwierciny rozdrobnią się i rozproszą w płuczce makroskopowa ocena formacji będzie utrudniona.

Możliwość rozdziału faz w mechanicznych urządzeniach do oczyszczania (pozycja 14 – funkcja pomocnicza)

Firma wiertnicza powinna być przygotowana do prowadzenia ewidencji zwierconej fazy stałej i jej aktualnego stanu w systemie płuczki. Faza stała może podlegać separacji w mechanicznych urządzeniach do oczyszczania, może ulegać rozproszeniu w płuczce. Płyn powinien być zaprojektowa-

ny w taki sposób, a faza stała utrzymywana na takim poziomie, aby nie wywoływać perturbacji w pracy systemu separacji faz i nie wstrzymywać procesu wiercenia. Parametrami raportowanymi (mierzonymi i kalkulowanymi) w związku z tą funkcją są: strumień przepływu, bilans fazy stałej, koncentracja fazy stałej.

Możliwość przetłaczania przez infrastrukturę rurociągową (pozycja 15 – funkcja pomocnicza)

Zamykanie obiegu płuczki na powierzchni jest realizowane najczęściej za pomocą pomp wirowych o niskiej lub średniej wysokości podnoszenia. Stąd parametry płynu wiertniczego lub szlamu zawierającego istotną koncentrację fazy stałej powinny pozostawać w akceptowalnym przez te urządzenia zakresie. Parametrami kontrolowanymi w związku z tą funkcją są: strumień przepływu, spadek ciśnienia w układzie rurociągowym, lepkość płuczki, koncentracja fazy stałej.

3.2. PODSTAWOWE FUNKCJE PŁYNU PEŁNIONE W TECHNIKACH PRZECISKOWYCH

Zaawansowane metody przeciskowe obejmują dwa niezależne systemy płuczki. Jednym z nich jest system cyrkulacyjny, w którym płuczka krąży kolektorami w obiegu zamkniętym: zbiornik płuczki na powierzchni terenu – transport do wnętrza tunelu – komora odbioru urobku na czole tunelu – transport na powierzchnię – system separacji faz – kondycjonowanie płynu – ponowne pompowanie do wnętrza tunelu. Drugi system służy do produkcji i załączania cieczonej smarnej do przestrzeni pierścieniowej

między instalowanym rurociągiem a ścianą wierconego otworu. Obecność dwóch systemów wyróżnia techniki przeciskowe od techniki HDD. Ponadto metody MT i DSPT zakładają zabudowę (rurowanie otworu) wraz z postępowaniem wiercenia, w przeciwieństwie do metody HDD, w której to otwór jest podpierany płynem wiertniczym.

Dostępna literatura przedmiotu poświęcona mikrotunelowaniu i DSPT nie wyodrębnia specyficznych dla tych metod funkcji płynu. Można więc założyć, że obowiązujące będą podobne funkcje jak w przypadku wiertnictwa naftowego czy wiertnictwa HDD. Na potrzeby niniejszego tekstu zaprezentowano dziesięć funkcji, które uporządkowano pod względem stopnia istotności i wpływu na proces wiertniczy. Wskazano też na podstawowe instrumenty oddziaływania i manipulacji daną funkcją, a także na monitorowane parametry jej dotyczące. Dwóm funkcjom (zadaniom) przyznano najwyższy stopień istotności. Poniżej omówiono ich wpływ na proces wiercenia tunelu.

Cyrkulowanie i transport zwiercin w kolektorach przy kontrolowanym spadku ciśnienia (pozycja 1 – funkcja krytyczna)

Cyrkulujący w kolektorach (rurociągach) płyn powinien utrzymywać w zawieszeniu zwierciny, posiadając przy tym możliwość ich transportu przy akceptowalnej przez system cyrkulacyjny różnicy ciśnień. Program wiercenia powinien skorelować parametry płynu z prędkością przepływu wewnątrz rurociągów dla uzyskania optymalnego postępu wiercenia – przy wymaganym tempie usuwania zwiercin w systemie mechanicznej separacji faz. Specyfika kolektorowego transportu szlamu wewnątrz instalowanego rurociągu sprawia, że utrata prawidłowego obiegu płuczki zdarza się niezwykle rzadko. Tym niemniej opory przepływu na odcinku od głowicy mikrotunelowej na powierzchnię powinny być przedmiotem wnikliwej analizy i estymacji hydraulicznych. Opory przepływu cieczy lepkiej, obciążonej fazą stałą, determinują wybór i parametry pompy wgłębnej typu wirowego lub strumieniowego. Opory przepływu pomiędzy powierzchnią a dnem

Zaawansowane metody przeciskowe obejmują dwa niezależne systemy płuczki. (...). Obecność dwóch systemów wyróżnia techniki przeciskowe od techniki HDD



Pozycja w rankingu	Funkcja (zadanie) płynu	Stopień istotności	Wpływ na proces wiercenia	Podstawowe instrumenty oddziaływania	Parametry monitorowane i raportowane
1	Cyrkulowanie i transport zwiercin w kolektorach przy kontrolowanym spadku ciśnienia (utrzymywanie drożności kolektorów)	krytyczny	bezpośredni	Strumień przepływu Geometria kolektorów Parametry płynu Postęp wiercenia Parametry pomp cyrkulacyjnych	Spadek ciśnienia w układzie Koncentracja fazy stałej Bilans fazy stałej
2	Redukcja tarcia – kontrola sił przeciskowych	krytyczny	bezpośredni	Kompozycja cieczy smarnej Objętość cieczy smarnej Geometria przestrzeni pierścieniowej	Ciśnienie tłoczenia lubrykanta Siła przeciskowa Bilans cieczy smarnej
3	Inhibowanie zwiercin aktywnych (w celu ograniczenia ryzyka blokowania się układu cyrkulacyjnego)	istotny	bezpośredni	Kompozycja płuczki	Koncentracja zwiercin ilastych Koncentracja inhibitorów
4	Utrzymywanie zwiercin w suspensji	istotny	bezpośredni	Parametry płuczki Strumień przepływu Rozmiar zwiercin	Profil reologiczny Wskaźnik CCI
5	Kontrola ciśnień wgłębnych (kontrola stabilności ściany tunelu)	istotny	pośredni	Objętość cieczy smarnej Trajektoria otworu	Ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej APWD
6	Możliwość rozdziału faz w mechanicznych urządzeniach do oczyszczania	istotny	pośredni	Parametry płuczki Kompozycja płuczki	Koncentracja fazy stałej Bilans masy
7	Czyszczenie tarczy mikrotunelowej i stabilizacja przodka tunelu	istotny	bezpośredni	Strumień cieczy przemawającej Kompozycja cieczy	Postęp wiercenia Parametry pracy tarczy Ciśnienie na czole tunelu
8	Ograniczanie zjawisk związanych z korozją	istotny	pośredni	Kompozycja płuczki	
9	Odprowadzenie ciepła	pomocniczy	bezpośredni	Strumień przepływu Parametry płuczki	Temperatura płuczki
10	Dostarczanie informacji geologicznych i technologicznych	pomocniczy	pośredni	Parametry płuczki Strumień przepływu	Ocena makroskopowa fazy stałej

TAB. 2. | Zestawienie funkcji płynu wiertniczego w technice DSPT i MT

wierconego otworu pokonywane są przy użyciu pomp wirowych. Celem technologicznym jest utrzymanie pełnej drożności kolektorów płuczkowych, stąd dużą wagę przykładają do ustalenia limitów lepkości płuczki i limitów dla fazy stałej w układzie cyrkulacyjnym.

Redukcja tarcia – kontrola sił przeciskowych (pozycja 2 – funkcja krytyczna)

Drugim obszarem stosowanej techniki płuczkowej w projektach MT i DSPT jest produkcja cieczy (suspensji) smarnej i zatłaczanie jej do przestrzeni pierścieniowej

w celu redukcji tarcia pomiędzy poboczną rurociągu i ścianą tunelu. Podczas aplikacji technik przeciskowych siły tarcia powstają na całej długości tunelu w miarę przesuwania się maszyny MTBM. Poziom siły tarcia zależy od chropowatości materiału rury, sił kontaktowych i rodzaju gruntu wzdłuż bocznej ściany tunelu.

Objętość zatłaczanego lubrykanta pozostaje w ścisłym związku z teoretyczną pojemnością PP oraz z parametrami charakteryzującymi otaczający grunt (współczynnik filtracji, rozkład granulometryczny, kąt tarcia wewnętrznego). Słup cieczy smarnej oddziałuje na formację ciśnieniem hydrostatycz-

nym. Zgodnie z teorią, zaproponowaną przez wykonawców związanych z techniką DSPT, ciecz smarna zatłaczana do przestrzeni pierścieniowej pozostaje w niej w bezruchu i nie generuje dodatkowych oporów przepływu. Teoria ta nie broni się jednak w przypadku, gdy do przestrzeni wtłaczana jest większa objętość lubrykanta niż wynika to z pojemności teoretycznej. Firmy w praktyce stosują nadmiarowe objętości cieczy smarnej, która albo przepływa wzdłuż instalowanej rury (wywołując opory przepływu), albo szczelinuje ścianę otworu i migruje swobodnie do strefy przyotworowej. Rekomenduje się stosowanie pomiaru ciśnienia dennego panującego

Wybór płuczki wiertniczej dla danego projektu powinien być uzależniony od zdolności płynu do spełniania podstawowych zadań (funkcji) i zminimalizowania przewidywanych problemów technologicznych



na zewnątrz przeciskanego rurociągu. Limit ciśnienia dennego FLP powinien być ustalony przez doświadczonogo geotechnika lub wiernika na podstawie dostępnych danych geologicznych.

3.3. POŻĄDANE CECHY DODATKOWE

Oprócz spełnienia krytycznych i pomocniczych funkcji właściwy dobór systemu przynosi także inne korzyści natury technologicznej, środowiskowej, organizacyjnej i finansowej. Należą do nich między innymi:

- łatwość sporządzania i obróbki chemicznej,
- osiąganie założonych w programie parametrów,
- poprawa postępu wiercenia,
- kontrola ciśnień w układzie cyrkulacyjnym,
- stabilność parametrów płynu w czasie,
- odporność płynu na długotrwałe ścinanie,
- odporność płynu na skażenia chemiczne,
- tolerancja wobec fazy stałej,
- minimalizacja negatywnego wpływu na środowisko naturalne w trakcie procesu,
- minimalizacja kosztów utylizacji odpadów,
- adekwatny do jakości koszt.

Projektowanie, sporządzanie i utrzymanie płynu wierniczego to procesy iteracyjne, na które ma wpływ wiele często wykluczających się uwarunkowań. Specjaliści do spraw płynów wiernicznych korzystają z dostępnej wiedzy i doświadczeń (zdobytych często metodą prób i błędów), aby dostroić płuczkę wierniczną w odpowiedzi na zmieniające się warunki w otworze, a następnie ocenić wydajność (skuteczność działania) płynu i zmodyfikować właściwości płynu (o ile jest to wymagane).

PODSUMOWANIE

Wybór płuczki wiertniczej dla danego projektu powinien być uzależniony od zdolności płynu do spełniania podstawowych zadań (funkcji) i zminimalizowania przewidywanych problemów technologicznych. Chociaż funkcje omówione w tym artykule mogą stanowić wytyczne dla dokonania wyboru, proces selekcji musi opierać się na szerokiej bazie doświadczeń. Mogą też istnieć inne względy, które narzucają zastosowanie określonego systemu. Koszt, dostępność produktów i wrażliwe środowisko są zawsze ważnymi czynnikami. Jednak zazwyczaj o wyborze decyduje doświadczenie i preferencje przedstawicieli firm wiernicznych i firm serwisowych.

W następnej części cyklu przedstawimy zagadnienia związane ze sporządzaniem płynu, omówimy główne komponenty oraz najbardziej popularne receptury.

WYKAZ SKRÓTÓW UŻYTYCH W NINIEJSZYM ARTYKULE

APWD – Annular Pressure While Drilling (ciśnienie dennie w przestrzeni pierścieniowej)

CCI – Carrying Capacity Index (wskaźnik potencjału systemu do transportu zwiercin)

ECD – Equivalent Circulating Density (ekwiwalentna gęstość płuczki)

DSPT – Direct Steerable Pipe Thrusting

HDD – Horizontal Directional Drilling

FLP – Formation Limit Pressure (ciśnienie szczelinowania formacji)

MT – Microtunneling

MTBM – Micro-Tunneling Boring Machine (maszyna mikrotunelowa)

PP – Przestrzeń pierścieniowa

ROE – Robert Osikowicz Engineering

ROP – Rate of Penetration (postęp wiercenia)

T&D – Torque and Drag (moment obrotowy i siła osiowa)

LITERATURA

- [1] Baker Hughes Inteq: Drilling Fluids Reference Manual, 2007 Edition.
- [2] Bridges Samuel, Robinson Leon: A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing, Elsevier Science 2020.
- [3] Drilling Contractors Association (DCA): HDD Technical Guidelines – Fourth Edition, Aachen 2016.
- [4] Fink Johannes: Petroleum Engineer's Guide to Oilfield Chemicals, Elsevier First Edition 2012.
- [5] Goerz Stefan: Importance of Pre-planning During Direct Pipe Installation, NASTT Conference Orlando 2021.
- [6] HDD Consortium: Good Practice Guidelines, Fourth Edition 2017.
- [7] Izba Gospodarcza Gazownictwa: Standard Techniczny: Technologie bezwykopowe, horyzontalne przewiertki sterowane ST-IGG-3301:2021, Warszawa 2022.
- [8] Najafi Mohammad: Trenchless Technology. Planning, Equipment and Methods, McGraw-Hill 2013.
- [9] Osikowicz Robert: Krytyczne funkcje płynów wiernicznych, „Inżynieria Bezwykopowa” 1/2005.
- [10] Osikowicz Robert: Rynek płynów wiernicznych, „Inżynieria Bezwykopowa” 4/2013.
- [11] Osikowicz Robert: Planowanie i realizacja projektów HDD cz. VII, „Inżynieria Bezwykopowa” 4/2019.
- [12] Osikowicz Robert: Zamknięty obieg płuczkowy cz. I, „Inżynieria Bezwykopowa” 1/2016.
- [13] Robison Jonathan, Shepherd Justin: Direct Pipe® Feasibility and Planning – Industry Trends, NASTT Conference, Orlando 2021.
- [14] Staheli Kimberlie: Understanding Inadvertent Returns With Direct Steerable Pipe Thrusting, „Trenchless Works” May 2021.