

WPROWADZENIE DO INŻYNIERII

PŁYNÓW WIERTNICZYCH

■ 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.

CZĘŚĆ 5: ZARZĄDZANIE RYZYKIEM TECHNOLOGICZNYM

Operacje wiertnicze mogą podlegać wielu czynnikom, które w konsekwencji mogą powodować większe lub mniejsze problemy techniczno-technologiczne. Mogą narażać załogę na niebezpieczeństwo, wywołać zanieczyszczenie środowiska, spowodować uszkodzenie narzędzi lub po prostu wygenerować czas nieproduktywny. Choć istnieją różne przyczyny problemów z wierceniem, w większości są one powiązane z płynem wiertniczym, którego charakterystyka i optymalizacja mogą pomóc w zapobieganiu lub łagodzeniu trudnych

sytuacji. Płyny wiertnicze przeszły poważną ewolucję od czasu ich wykorzystania w pierwszych projektach HDD: od prostej mieszaniny wody i iltu do bardziej złożonej kombinacji różnych rodzajów dodatków organicznych i nieorganicznych, poprawiających właściwości reologiczne płynu, smarność i poziom filtracji.

Każdy typ projektu jest narażony na szereg zagrożeń, które mogą przełożyć się bezpośrednio na harmonogram robót, a co za tym idzie także na ponoszone koszty. Rodzaj ryzyka i jego poziom (natężenie)

mogą różnić się pomiędzy poszczególnymi projektami, ponieważ projekty w swojej naturze różnią się między sobą. Pewne kategorie zdarzeń są wspólne dla wszystkich faz robót (wiercenie pilotowe, poszerzanie, instalacja). Niektóre są związane tylko z pewnymi specyficznymi czynnościami. Zarządzanie ryzykiem powinno być wpisane zarówno w fazę planowania i ewaluacji projektu, jak i w fazę konstrukcyjną.

Zarządzanie ryzykiem można i należy zaplanować. Identyfikacja i wykrywanie zagrożeń to rola zaangażowanego w projekt

Z TEKSTU DOWIESZ SIĘ:

- ✓ jakie są najczęstsze sytuacje kryzysowe podczas wiercenia,
- ✓ w jaki sposób można rozwiązywać największe problemy,
- ✓ dlaczego warto zatrudniać firmy zarządzające płynem wiertniczym.

zespołu. Ma on za zadanie poddać ocenie potencjalne zdarzenia i stworzyć ich hierarchię. Praca ta ma często charakter intuicyjny. Dokonanie oceny (stopnia negatywnego oddziaływania na cele projektu, budżet i harmonogram) wymaga sporego doświadczenia i korzystania ze stworzonych przez samą firmę baz danych. Wskazanie największych zagrożeń na stosunkowo wczesnym etapie projektu pozwala na wybór metody manipulacji ryzykiem ulokowanym w obszarach, w których potencjalne straty są uznawane za największe.

METODY MANIPULACJI RYZYKIEM WIERTNICZYM

Pod tym pojęciem rozumie się strategię postępowania z ryzykiem, czyli metody będące sumą doświadczeń zdobytych w przeszłości. Jest to zbiór czynności zmierzających do zorganizowania i przeprowadzenia procesu zarządzania ryzykiem. Działania te mogą prowadzić do następujących oczekiwanych efektów:

- Unikanie ryzyka (wykluczanie przyczyn): unikanie to doprowadzenie w prakty-

ce do sytuacji, w której dany czynnik inicjujący ryzyko nie ma możliwości wystąpić. Uzyskuje się to poprzez zwiększenie ilości niezbędnych informacji do realizacji zadania, doprecyzowanie wymagań, usprawnienie komunikacji.

- Kontrola ryzyka (łagodzenie): metoda ma na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia negatywnego i/lub konsekwencji jego zajścia do poziomu uznanego za akceptowalny. Rekomenduje się przy tym, aby działania prewencyjne (zarad-

Zarządzanie ryzykiem można i należy zaplanować. Identyfikacja i wykrywanie zagrożeń to rola zaangażowanego w projekt zespołu



cze) były wdrażane na możliwie wczesnym etapie projektu. Ma to na celu niedopuszczenie do wystąpienia sytuacji skomplikowanych, awaryjnych czy krytycznych.

- Przeniesienie skutków (transfer): jest to metoda, której celem nie jest usunięcie z przestrzeni projektu potencjalnego zagrożenia, ale przeniesienie całej lub częściowej odpowiedzialności za przygotowanie adekwatnego działania na inny podmiot.
- Dystrybucja ryzyka: metoda zakłada podział danego ryzyka pomiędzy partnerów realizujących projekt. Przykładem może być rozłożenie ryzyka pomiędzy generalnym wykonawcą a spółką wiertniczą, czy pomiędzy podmiotami biorącymi udział w konsorcjum wykonawczym. Partnerzy mogą dzielić pomiędzy siebie grupy ryzyk, ale też poszczególne ryzyka, biorąc za nie wzajemną odpowiedzialność.
- Akceptacja ryzyka: istotą tej strategii jest niewprowadzanie zmian w planach realizacji projektu. Decyzja taka może wynikać z faktu, że dane ryzyko nie jest oceniane jako specjalnie dotkliwe (lub jest mało prawdopodobne). Może także oznaczać, że w przypadku zidentyfikowanego ryzyka nie znaleziono odpowiedniej i skutecznej strategii reakcji wobec zagrożenia.
- Plan rezerwowy: jest to opracowany zestaw działań, jakie należy wdrożyć, jeśli nie zostanie osiągnięty jeden lub kilka ze strategicznych celów projektu: cel techniczno-technologiczny, harmonogram, budżet. Plan taki należy przygotować na wypadek poważnych komplikacji technicznych lub zdarzeń awaryjnych.
- Wycofanie: jest to strategia, którą można dopuścić we wstępnej fazie projektu. Można ją łączyć z przygotowaniem ana-

lizy wykonalności (projektant) lub planu wykonalności (spółka wiertnicza). Na tym etapie można zweryfikować, czy projekt ma szansę powodzenia. Jeżeli przeprowadzona symulacja nie wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo osiągnięcia celów strategicznych, projekt powinien zostać odroczone lub na nowo przeanalizowany.

KLASYFIKACJA RYZYKA

Ryzyko technologiczne może być w różny sposób klasyfikowane. Na potrzeby niniejszego artykułu wyodrębniono dwa umowne zbiory ryzyk. Większość omówionych w artykule typów zagrożeń jest wzajemnie ze sobą powiązana, co oznacza, że materializacja jednego z nich zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia innych. Równoległe śledzenie podobnych lub powiązanych ze sobą ryzyk ułatwia ich mitygację.

RYZYKA (ZDARZENIA) IDENTYFIKOWANE BEZPOŚREDNIO Z PŁYNEM WIERTNICZYM

Pierwsze dwa ryzyka warte omówienia to: **niewłaściwa kompozycja płuczki**

(ryzyko nr 1) oraz **niewłaściwe parametry płuczki** (2). Ich materializacja zależy w znacznym stopniu od kompetencji personelu zarządzającego segmentem płuczkowym. Jak już wspomniano w poprzednich częściach naszego cyklu, płyn wiertniczy definiowany jest zarówno przez swój skład (kompozycję), ale też poprzez specyficzne parametry fizyko-chemiczne. Parametry te powinny mieścić się w zakresach przewidzianych programem płuczkowym. Program płuczkowy jest odpowiedzią na zidentyfikowane warunki geologiczne oraz zaplanowaną geometrię otworu. Program powinien umożliwić spełnienie przez płyn powierzonych mu funkcji. W przypadku małych i średnich projektów wybór materiałów płuczkowych, ich koncentracji i zalecanych parametrów płynu pozostaje w gestii firmy wiertniczej. W projektach większych często spotykana jest sytuacja, w której za obsługę płuczkową projektu odpowiada specjalistyczna firma serwisowa – i to na niej spoczywa odpowiedzialność za przygotowanie koncepcji i programu. Firma serwisowa deleguje swojego inżyniera do bezpośredniego nadzoru nad realizowanymi pracami. Wiele aspektów interakcji systemu wiertniczego z otworem jest ściśle powiązanych z właściwościami płuczki. Utrzymanie reologii płuczki wiertniczej w pożądanym przedziale jest dużą częścią tego procesu. Jest to jeden z powodów, dla których inżynierowie płuczki są obecni na placach budów wiertniczych na całym świecie. Ciągłe monitorowanie procesu pozwala inżynierowi płuczki na właściwą reakcję we właściwym czasie.

**Deklarowana wydajność jest silnie zależna od
składu płuczki, jej parametrów reologicznych
i zawartości fazy stałej. Jest to parametr
decydujący o skuteczności działania całego
systemu wiertniczego i decydujący w największym
stopniu o jego produktywności**



Kolejne dwie kategorie ryzyk są powiązane z wykorzystywanym sprzętem i strategią wiercenia – **niska przepustowość obiegu płuczkowego** (3) oraz **niewłaściwa hydraulika otworowa** (4). Realizacja projektu wiertniczego wymaga zmobilizowania adekwatnego do skali zadania systemu płuczkowego, na który składają się: pompa płuczkowa, zbiorniki służące do przygotowania i kondycjonowania płuczki, układ separacji faz (oczyszczanie wypływającej z otworu płuczki), pompy szlamowe i rurociągi służące zamykaniu obiegu. Wydajność systemu (identyfikowana także jako przepustowość układu) wyrażona jest w jednostce objętości cyrkulującego płynu na jednostkę czasu. Deklarowana wydajność jest silnie zależna od składu płuczki, jej parametrów reologicznych i zawartości fazy stałej. Jest to parametr decydujący o skuteczności działania całego systemu wiertniczego i decydujący w największym stopniu o jego produktywności. Systemy kontroli fazy stałej (w tym systemy separacji faz) nie mogą ograniczać wydajności wiercenia. Po właściwym skonfigurowaniu sprzętu i rozpoczęciu wiercenia najważniejsze jest utrzymanie wydajności kontroli fazy stałej. Ostatnią rzeczą, jakiej firmy wiertnicze potrzebują, jest zatrzymanie procesu wiercenia i cyrkulowania w otworze, ponieważ sprzęt do kontroli fazy stałej nie nadaje. Z kolei hydraulika otworowa odnosi się do sposobu, w jaki płyn wiertniczy krąży w wierconym otworze i jest wprost powiązana z mechaniką płynów. Zrozumienie hydrauliki otworowej jest ważne, ponieważ odnosi się bezpośrednio do takich zagadnień, jak prędkość przepływu i spadek ciśnienia w różnych punktach (sekcjach) układu cyrkulacyjnego.

Ryzyka nr 5 i 6 odnoszą się do potencjalnych zaburzeń w prawidłowym obiegu płuczki i mogą być określone jako: **wgłębne zaniki płynu do formacji** oraz **hydrauliczne szczelinowanie nadkładu**. Pierwsze z wymienionych zdarzeń często poprzedza drugie. Za główne przyczyny materializacji wymienionych powyżej zagrożeń uważa się: ciśnienie denne, przekraczające prognozowane ciśnienie normalne, silnie chłonne

lub szczelinowate formacje, niebilansowaną właściwie trajektorię otworu. Migracja płynu poza otwór jest zjawiskiem wysoce niepożądanym, mającym swoje negatywne konsekwencje dla jakości wierconego otworu, jak i ponoszonych kosztów. Choć całkowite zapobieganie temu zjawisku jest nierealne, skuteczne strategie obejmują dobór odpowiedniej gęstości płuczki, dokładne czyszczenie otworu ze zwiercin, stosowanie kompatybilnych z przewiercaną formacją płynów wiertniczych i prewencyjne stosowanie skutecznych produktów typu LCM (*Lost Circulation Materials*). Dodatkowo, posiadanie proaktywnego planu, gdy spodziewane lub możliwe jest wystąpienie utraty cyrkulacji, może znacznie złagodzić to ryzyko. Praktyki te pomagają usprawnić operacje, zmniejszyć opóźnienia i kontrolować koszty. Inżynierowie zajmujący się

to efekt obserwowany przy przewiercaniu warstw o naturalnej wysokiej przepuszczalności. Utrata prawidłowej cyrkulacji jest zdecydowanie poważnym problemem, ponieważ jej nasilenie może zainicjować inne problemy, takie jak: uszkodzenie strefy przyotworowej, niestabilność ścian otworu, brak oczyszczania otworu czy dodatkowe koszty.

Następne analizowane ryzyka są ściśle powiązane z technologią wiercenia i hydrauliką otworową: **problem z transportem zwiercin** (7) oraz **oblepienie narzędzia wiertniczego** (8). Transport zwiercin jest jedną z głównych funkcji płynów wiertniczych, które znacząco wpływają na powodzenie operacji wiertniczych. Transport pomiędzy dnem otworu a jego wylotem jest determinowany przez prędkość przepływającej płuczki w przestrzeni pierście-

Ciągłe monitorowanie procesu pozwala inżynierowi płuczkowemu na właściwą reakcję we właściwym czasie



płuczką utrzymują na właściwym poziomie jej gęstość (powyżej ciśnienia porowego), ale także gęstość i reologię, które pozwalają uzyskać równoważną gęstość cyrkulacyjną ECD (*Equivalent Circulating Density*) poniżej gradientu ciśnienia szczelinowania. Wiertnicy kontrolują ciśnienie w otworze poprzez wskazania ciśnieniomierzy wgłębnych, bilansowanie cyrkulującego płynu oraz bilansowanie zwiercanej fazy stałej. Utrata cyrkulacji występuje, gdy dochodzi do niekontrolowanego przepływu płuczki wiertniczej do formacji. Przepływ ten nazywany jest częściową lub całkowitą stratą, w zależności od tego, ile płuczki wiertniczej znalazło się podczas cyrkulacji poza normalnym obiegiem. Jak wspomniano w powyższej sekcji, gdy ciśnienie denne w otworze jest zbyt wysokie, formacja może ulec pęknięciu. Możliwa jest także migracja płynu do formacji geologicznej przy niskim (normalnym) ciśnieniu dennym. Jest

niowej i zdolności płynu do utrzymywania fazy stałej w stanach statycznych i w stanach dynamicznych. Strumień zatłaczanej płuczki musi być wystarczający dla wiercenia aktualnej geometrii otworu interpretowanej zarówno jako długość, jak i średnica otworu. Skuteczny transport zwiercin może wpłynąć korzystnie na postęp wiercenia i przeciwnie, problemy z transportem są czynnikiem opóźniającym realizację projektu. W przypadku prawidłowego czyszczenia otworu zwierciny przepływają wraz z płuczką wiertniczą i nie notują istotnych opóźnień. W przypadku słabego oczyszczania otworu zwierciny mają tendencję do osadzania się na dolnej ścianie tunelu, tworząc ruchome skupiska, które mogą być erodowane przez cyrkulację płuczki wiertniczej.

Z czasem nagromadzone zwierciny będą tworzyć zarówno ruchome, jak i nieruchome osady, zmniejszając obszar prze-

pływu i powodując inne problemy związane z wierceniem (narastające ciśnienie w otworze, wzrost obciążeń notowanych na przewodzie wiertniczym). Chociaż istnieje wiele potencjalnych przyczyn negatywnych zdarzeń, takich jak nadmierny moment obrotowy i opór, przedwczesne zużycie narzędzia wiertniczego oraz zmniejszony postęp wiercenia, słabe czyszczenie otworu jest wspólnym mianownikiem. Z transportem zwiercin wiąże się też zdolność do utrzymywania czoła narzędzia w należytej kondycji. Zaklekanie świdrów i poszerzacz jest zjawiskiem kojarzonym zwłaszcza z wierceniem w aktywnych formacjach ilastych. Kwestia ta może powodować szereg problemów, takich jak zmniejszenie postępu wiercenia i wahania momentu obrotowego,

cyjne i przepływowe w zakresie, który najlepiej poradzi sobie ze wszystkimi problemami związanymi z wierceniem. Oznacza to, że musimy zwracać szczególną uwagę na kontrolowanie cząstek koloidalnych, ponieważ determinują one właściwości płuczki. Co prawda rozcieńczanie jest powszechną i dość skuteczną metodą redukcji cząstek stałych w płuczce wiertniczej, jednak opcja ta jest bardziej kosztowna i mniej efektywna w porównaniu z mechanicznym sprzętem do kontroli cząstek stałych. Dzięki mechanicznemu (lub mechaniczno-chemicznemu) systemowi separacji płuczka wiertnicza może być używana przez długi czas, zmniejszając koszty i ogólny czas wiercenia. Skuteczna kontrola koncentracji fazy stałej

trami ekonomicznymi procesu: **przekroczenie założonego budżetu płuczkowego** (11) oraz **wysokie koszty utylizacji odpadów** (12). Jedną z istotnych pozycji budżetu projektu wiertniczego jest koszt materiałów płuczkowych, koszt pozyskania wody i koszt utylizacji odpadów płynnych i stałych. Kwota przeznaczona na materiały płuczkowe jest uzależniona w największym stopniu od docelowej pojemności otworu wiertniczego i stopnia złożoności warunków geologicznych. Przygotowanie jednego metra sześciennego płuczki poza kosztem wody i materiałów płuczkowych obejmuje też koszty jego składowania i kondycjonowania. Koszt płynów inhibowanych będzie wyższy niż koszt konwencjonalnej płuczki bentonitowej. Przestrzeganie wymogów środowiskowych i przepisów prawa jest obecnie jednym z ważniejszych wyzwań dla branży wiertniczej. Zgodność z przepisami lokalnymi jest niezbędna. Skuteczne zarządzanie odpadami, wodą, gruntami i powietrzem, wraz z odpowiednim planowaniem i monitoringiem w czasie rzeczywistym, pomagają prowadzić operacje w sposób bezpieczny i przyjazny dla otoczenia. Systemy wiercenia z wykorzystaniem obiegu zamkniętego zmniejszają wpływ na środowisko poprzez wielokrotne wykorzystanie tego samego płynu i ograniczenia w znacznym stopniu konsumpcji wody, materiałów płuczkowych oraz stowarzyszonych z nimi odpadów. Odpad stały w postaci odseparowanego urobku i odpad płynny w postaci nadmiarowych objętości płuczki musi zostać sfinansowany i mieć zabezpieczone źródło w budżecie projektu.

Przestrzeganie wymogów środowiskowych i przepisów prawa jest obecnie jednym z ważniejszych wyzwań dla branży wiertniczej



wzrost ciśnienia tłoczenia płuczki. W konsekwencji załoga może być zmuszona do wyciągnięcia zestawu z otworu w celu usunięcia problemu.

Problemy nr 7 i 8 powiązane są z pojęciem skażenia płynu wiertniczego. Do **skażenia fazą stałą** (ryzyko nr 9) dochodzi w trakcie normalnego procesu wiercenia. Faza stała pozyskana w ten sposób nosi nazwę zwiercin lub urobku. Wygenerowane zwierciny podlegają procesowi oddzielania w systemach mechanicznej separacji faz. Faza stała jest tym trudniejsza do usunięcia, im jest drobniejsza. Koszt usuwania drobnych cząstek jest wyższy od kosztu separacji większych cząstek. Naszym podstawowym celem jest ograniczenie zawartości cząstek stałych w płuczce do praktycznego limitu, który pozwoli nam utrzymać właściwości reologiczne, filtra-

jest niezbędna do utrzymania jakości płuczki wiertniczej. Utrzymywanie płynów wiertniczych w stanie wolnym od skażeń to ciągła walka. Mamy tutaj także na myśli **skażenia chemiczne** (ryzyko nr 10). Poniżej wskażemy na najbardziej typowe rodzaje skażeń. Jony wapnia, często pochodzące z gipsu, cementu i innych źródeł, mogą zakłócać działanie bentonitowych systemów płuczkowych, prowadząc do niepożądanych reakcji, które wpływają na wydajność płuczki wiertniczej. Wodorowęglany i węglany mogą dostać się do systemu płuczki wiertniczej z nadmiernego użycia sody kalcynowanej. Sól i słona woda – napotkane w porach formacji lub pochodzące z wody zarobowej – mogą prowadzić do silnych zaburzeń poziomu lepkości.

Kolejne ryzyka bezpośrednio powiązane z płynem wiertniczym łączą się z paramet-

METODY ODDZIAŁYWANIA NA ZIDENTYFIKOWANE BEZPOŚREDNIE RYZYKO PŁUCZKOWE

W tabeli nr 1 wskazano na możliwe przyczyny materializacji zidentyfikowanych zagrożeń, które są bezpośrednio powiązane z technologią płynów wiertniczych. Każda z wymienionych pozycji wpływa na podstawowe parametry projektu: zakres (cel), budżet i harmonogram.

Nr ryzyka	Ryzyko	Przyczyna	Działania prewencyjne	Środki zaradcze	Strategia działania
1	Niewłaściwa kompozycja płuczki	Wady dokumentacji projektowej Brak analizy projektu Brak kompetencji własnych Brak konsultacji z firmami specjalistycznymi	Analiza podobnych projektów (case study) Konsultacje ze specjalistycznymi podmiotami	Częściowa lub całościowa zmiana koncepcji płuczkowej Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Unikanie Transfer
2	Niewłaściwe parametry płuczki	Wady dokumentacji projektowej Brak analizy geologicznej Brak programu płuczkowego Brak specjalistycznego nadzoru	Analiza założeń projektowych Rzetelny program płuczkowy Monitoring trendu ECD Monitoring trendu T&D Bilansowanie fazy stałej Bilansowanie płynu wiertniczego	Zmiana składu i parametrów płuczki Wprowadzenie szczegółowych raportów Kalibracja otworu Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Kontrola Transfer
3	Niska przepustowość obiegu płuczkowego	Brak dogłębnej analizy projektu Brak zasobów technicznych Kompozycja i parametry płynu wiertniczego Postęp wiercenia niedostosowany do jakości sprzętu	Analiza założeń projektowych Przygotowanie programu technologicznego Dostosowanie zasobów sprzętowych Szkolenie załogi w zakresie obsługi sprzętu	Dostosowanie postępu wiercenia do ograniczeń sprzętowych Optymalizacja parametrów płuczkowych Zwiększenie zasobów sprzętowych Zmiana konfiguracji i parametrów pracy	Unikanie Kontrola Akceptacja
4	Niewłaściwa hydraulika otworowa	Brak dogłębnej analizy projektu Brak programu technologicznego Błędna konfiguracja dysz Niedostosowanie strumienia przepływu do geometrii otworu i typu formacji geologicznej	Analiza założeń projektowych Przygotowanie programu technologicznego Bilansowanie fazy stałej Bilansowanie płynu wiertniczego Konsultacje ze specjalistycznymi podmiotami	Częściowa lub całościowa zmiana koncepcji technologicznej Zmiana konfiguracji dysz w narzędziach Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Unikanie Kontrola
5	Wgłębne zaniki do formacji	Wady dokumentacji projektowej (trajektoria) Chłonna formacja Wysokie ciśnienie w PP	Analiza danych geologicznych Modyfikacja trajektorii Kontrola ECD Materiały typu LCM Szkolenie personelu	Ograniczenia ciśnienia dennego Optymalizacja parametrów płuczkowych Ograniczenie postępu wiercenia Przerabianie otworu	Unikanie Kontrola Akceptacja
6	Szczelinowanie hydrauliczne nadkładu	Brak analizy ciśnień Wadliwa trajektoria Przekroczenie ciśnienia dopuszczalnego Niewystarczające rozpoznanie geologiczne Niska jakość otworu Brak nadzoru	Szczegółowa analiza aspektów geologicznych Weryfikacja trajektorii Opracowanie analizy ciśnień Monitoring trendu ECD Bilansowanie fazy stałej Bilansowanie płynu wiertniczego Szkolenie personelu	Weryfikacja programu płuczkowego Marszowanie w otworze Udrażnianie otworu Zmiana geometrii narzędzia Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Unikanie Kontrola
7	Problem z transportem zwiercin	Niewystarczający strumień przepływu Parametry płynu wiertniczego Duża średnica zwiercin (średnica ziarna) Aktywne zwierciny ilaste (blokowanie przestrzeni pierścieniowej)	Szczegółowa analiza aspektów geologicznych Rzetelny program płuczkowy Dostosowana do wymagań hydraulika otworowa Monitoring trendu ECD Bilansowanie fazy stałej Bilansowanie płynu wiertniczego Stosowanie płynów inhibitowanych	Zmiana hydrauliki otworowej Zmiana koncepcji płuczkowej (kompozycja i parametry reologiczne) Marszowanie w otworze Kalibracja otworu	Unikanie Kontrola
8	Oblepienie narzędzia wiertniczego	Formacja geologiczna Dysfunkcja hydrauliki otworowej Niewłaściwy typ narzędzia (struktury tnącej) Niewłaściwy rozmiar dysz Niedostosowany do typu formacji postęp wiercenia	Szczegółowa analiza aspektów geologicznych Wybór typu narzędzia dostosowanego do najtrudniejszej sekcji w otworze Optymalizacja strumienia przepływu i spadków ciśnień w dyszach narzędzia Stosowanie środków powierzchniowo czynnych	Monitoring postępu wiercenia Cyrkulowanie w otworze Optymalizacja parametrów płuczkowych Marszowanie w otworze Oczyszczenie narzędzia na powierzchni i ponowne zapuszczenie do otworu	Kontrola Akceptacja

TAB. 1. | Zarządzanie bezpośrednim ryzykiem płuczkowym

Nr ryzyka	Ryzyko	Przyczyna	Działania prewencyjne	Środki zaradcze	Strategia działania
9	Skażenie fazą stałą	Formacja geologiczna Konfiguracja systemu separacji faz Przepustowość systemu płuczkowego	Optymalne wykorzystanie systemu separacji Kontrola zawartości fazy stałej Wybór systemu płuczkowego tolerującego wyższą koncentrację fazy stałej Szkolenie personelu	Dostosowanie postępu wiercenia do wydajności systemu płuczkowego Cyrkulowanie w otworze Rozcieńczanie płuczki (częściowa wymiana) Zmiana koncepcji płuczkowej Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Kontrola Akceptacja
10	Skażenie chemiczne	Formacja geologiczna Obróbka chemiczna Jakość wody zarobowej	Szczegółowa analiza aspektów geologicznych Wybór systemu płuczkowego odpornego na skażenia chemiczne	Optymalizacja kompozycji płuczki Monitoring poziomu skażenia i ewentualne stosowanie reduktorów jonów Rozcieńczanie płuczki (częściowa wymiana)	Akceptacja
11	Przekroczenie budżetu płuczkowego	Brak rzetelnej analizy projektu Nieujawnione informacje geologiczne Brak doświadczenia i kompetencji Błędne procedury wiertnicze Niedopasowanie urządzeń, narzędzi i technologii Wadliwe planowanie; Wysokie straty płynu Ceny i jakość materiałów płuczkowych	Prawidłowa analiza projektu Rzetelny program technologiczny Realistyczny program płuczkowy Realistyczne szacunki konsumpcji wody i materiałów płuczkowych Wariantowe planowanie działań Stworzenie rezerwy finansowej na zdarzenia nadzwyczajne Wariantowe planowanie działań	Optymalizacja kosztów płuczkowych Optymalizacja procedur wiertniczych Ograniczenie objętości produkowanej płuczki Stworzenie rezerwy finansowej na zdarzenia nadzwyczajne Podjęcie negocjacji z Inwestorem	Unikanie Kontrola Transfer Dystrybucja
12	Wysokie koszty utylizacji odpadów	Uwarunkowania lokalne projektu Nadmierna objętość wyprodukowanej płuczki Nadmierna ilość wilgotnego urobku	Prawidłowa analiza projektu Rzetelny program technologiczny i estymacja wymaganych objętości	Redukcja zawartości wody w odpadzie stałym Redukcja objętości pozostawionego szlamu Stworzenie rezerwy finansowej Podjęcie negocjacji z Inwestorem	Akceptacja Transfer Dystrybucja

TAB. 1. cd | Zarządzanie bezpośrednim ryzykiem płuczkowym

RYZYKA (ZDARZENIA)
IDENTYFIKOWANE POŚREDNIO
Z PŁYNEM WIERTNICZYM

Wyróżnimy tutaj cztery obszary, do których zaliczymy kwestie harmonogramu, niestabilną ścianę otworu, obciążenia mechaniczne przewodu oraz awarie wiertnicze.

Problem nr 13 został określony jako **ni-ski postęp wiercenia**. Nie jest tajemnicą, że optymalizacja postępu liniowego ROP jest kluczem do zrealizowania planu wiercenia i utrzymania w ryzach całkowitych kosztów projektu. System kontroli fazy stałej musi nadążać za planem wiercenia i jest tak samo ważny, jak wybór wiertnicy, wybór narzędzi, ustalenie hydrauliki i innych parametrów wiercenia. Każdy źle dobrany komponent lub metoda dzia-

łania może znacznie zmniejszyć postęp. Z punktu widzenia mechaniki płynów najskuteczniejszym sposobem na utrzymanie wymaganego postępu jest ograniczenie obecności w płynie bardzo drobnych cząstek poprzez mechaniczne usuwanie ich, zanim będą mogły wpłynąć na ROP.

Niedotrzymanie harmonogramu to kolejne (14) analizowane ryzyko technologiczne. Firmy wiertnicze tworzą harmonogramy prac na podstawie wieloletniej obserwacji własnego działania, ale także działania firm konkurencyjnych. W harmonogramie prac powinny być uwzględnione przewidywane warunki geologiczne. Należy założyć ponadto, że prace będą realizowane z użyciem dedykowanych dla projektu urządzeń wiertniczych, a wyposażenie dodatkowe (segment płuczkowy i osprzęt

wgłębny) będzie zoptymalizowane.

Niestabilna ściana otworu (ryzyko nr 15) jest uznawana za jedno z głównych zagrożeń dla powodzenia projektu wiertniczego. Jest to zagadnienie geomechaniczne powiązane z czynnikami hydraulicznymi i chemicznymi. Niestabilność otworu wiertniczego jest zdefiniowana jako niepożądany stan nieorurowanego otworu, który nie zachowuje swojego rozmiaru, kształtu lub integralności strukturalnej, co w konsekwencji prowadzi do poważnych problemów i trudności, stwarzyszonych z dodatkowymi kosztami i wzrostem czasu nieproduktywnego. Przed rozpoczęciem prac wiertniczych przewiercana formacja jest w stanie równowagi pomiędzy wytrzymałością skały a naprężeniami działającymi na nią zarówno w pionie, jak i w poziomie. Jednak uru-

Oczekiwanie całkowitego zapobiegania niestabilności odwiertu jest nierealistyczne, ponieważ przywrócenie fizycznych i chemicznych warunków in-situ formacji jest niemożliwe. Można jednak tego typu problemy łagodzić, stosując odpowiednie praktyki



chomiony proces wiercenia zaburza tę równowagę i osłabia stabilność mechaniczną. Ponadto wprowadzenie do formacji obcych płynów w postaci płuczki wiertniczej rozpoczyna interakcję ze skałą i wysycającymi ją płynami. Niestabilność otworu wiąże się z trzema potencjalnymi przyczynami: uszkodzeniem mechanicznym (zapadanie się lub szczelinowanie ściany otworu), erozją spowodowaną tarcie przepływającej płuczki oraz chemiczną interakcją pomiędzy płynem a formacją geologiczną. W literaturze wyróżnia się następujące rodzaje niestabilności otworów wiertniczych: zamknięcie (zwężenie) otworu, powiększenie (wypłukiwanie) otworu, szczelinowanie hydrauliczne, załamanie stropu (zapadnięcie). Odrębną kategorię problemów tworzą warstwy ilaste i łupkowe, ponieważ są najbardziej zmienione hydraulicznie i chemicznie przez płuczkę wiertniczą. W przypadku niestabilności chemicznej niezgodność chemiczna płuczki wiertniczej z przewiercaną skałą i jej płynami może wpływać na obniżenie wytrzymałości mechanicznej wokół otworu. Oczekiwanie całkowitego zapobiegania niestabilności odwiertu jest nierealistyczne, ponieważ przywrócenie fizycznych i chemicznych warunków in-situ formacji jest niemożliwe. Można jednak tego typu problemy łagodzić, stosując odpowiednie praktyki.

Kolejne trzy zagrożenia: **wysoki moment obrotowy** (16), **wysoka siła pchania i/lub ciągnięcia** (17), **wysoka siła instalacyjna** (18) to elementy tak zwanej analizy *Torque and Drag* (T&D). Można przyjąć założenie, że podwyższone parametry przekraczają o 25% spodziewane wartości, wynikające z modelowania teoretycznego, a parametry wysokie identyfikujemy z poziomem o 50% przekraczającym normalne obciążenia wynikające z prawidłowej praktyki wiertniczej. Analiza T&D obejmu-

je kalkulacje zarówno momentu obrotowego, jak i sił osiowych w dwóch stanach: *on bottom* (praca na spodzie otworu) i *off bottom* (cyrkulowanie i operacje wyciągowe). W pierwszym przypadku – poza obciążeniem rejestrowanym na samym przewodzie i wynikającym z jego masy i obecności w kierunkowym (zakrzywionym) otworze – mamy do czynienia także z obciążeniem wynikającym z urabiania (skrawania, odspajania) formacji. Narzędzie urabiające (skrawające, odspajające) – na skutek wywieranego nacisku na dno otworu i dostarczanych poprzez przewód obrotów – generuje moment roboczy, który sumuje się z momentem niezbędnym do obracania przewodem wiertniczym. Należy przy tym zaznaczyć, że moment obrotowy i siły osiowe są wprost proporcjonalne do masy przewodu, średnicy zwornika oraz współczynnika tarcia. Współczynnik tarcia jest funkcją jakości otworu, zawartości fazy stałej oraz kompozycji płynu wiertniczego. Wysokie obciążenia są na ogół konsekwencją braku prawidłowego oczyszczania otworu i niestabilności jego ściany na skutek na przykład szczelinowania hydraulicznego i migracji płuczki w niekontrolowany sposób poza otwór wiertniczy.

Dwa ostatnie analizowane w niniejszym artykule ryzyka wiążą się bezpośrednio ze stanami awaryjnymi: **zakleszczenie narzędzi w otworze** (19) oraz **zatrzymanie przewodu wiertniczego** (20). Mechaniczne zatrzymanie przewodu czy zakleszczenie zestawu narzędzi to bardzo poważne problemy występujące podczas wiercenia otworów kierunkowych o przebiegu horyzontalnym, które implikują długi czas nieproduktywny (NPT). Rury płuczkowe uznaje się za zakleszczone, jeśli nie można ich uwolnić i wyciągnąć z otworu bez ich uszkodzenia. Zasadniczo istnieją dwa

rodzaje zakleszczeń rur. Pierwszym z nich jest zakleszczenie rury pod wpływem różnicy ciśnień. Dzieje się tak, gdy występuje duża różnica ciśnień między ciśnieniem panującym w otworze a ciśnieniem w formacji. Drugim przypadkiem jest mechaniczne przychwycenie przewodu. Dla tego przypadku mogą istnieć trzy przyczyny: nieoczyszczony ze zwiercin otwór, przewężenia w otworze, przewód zatrzymany w rynnie wytworzonej przez obracające się zworniki (*key hole*). Poważnym sygnałem ostrzegawczym jest osiągnięcie poziomu obciążeń przekraczających o 100% obciążenia uznawane za normalne w danej sytuacji otworowej. Za stan awaryjny można uznać brak możliwości rotacji lub ograniczoną możliwość przesuwania przewodu wzdłuż osi otworu. Przewód wiertniczy ma ograniczenie rozciągania (wydłużania), które jest obliczane bezpośrednio na podstawie pola przekroju poprzecznego calizny rury i granicy plastyczności materiału. Ograniczenie skręcania rury jest obliczane w podobny sposób. Jeśli kolumna przewodu utyka, a urządzenie wiertnicze nie zareaguje wystarczająco szybko, możliwe jest wytworzenie znacznego naprężenia podczas podciągania lub momentu obrotowego podczas obracania, co może spowodować przekroczenie limitów mechanicznych.

METODY ODDZIAŁYWANIA NA ZIDENTYFIKOWANE POŚREDNIE RYZYKO PŁUCZKOWE

W tabeli nr 2 wskazano na możliwe przyczyny materializacji zidentyfikowanych zagrożeń, które są pośrednio powiązane z technologią płynów wiertniczych. Wskazano na potencjalne działania prewencyjne i czynności zaradcze. Każde z wymienionych ryzyk wpływa na podstawowe parametry projektu: zakres (cel), budżet i harmonogram.

Nr ryzyka	Ryzyko	Przyczyna	Działania prewencyjne	Środki zaradcze	Strategia działania
13	Niski postęp wiercenia	Warunki geologiczne Niedopasowanie osprzętu wgłębnego (konfiguracja BHA) Niedopasowanie technologii wiercenia Niewłaściwa hydraulika otworowa	Prawidłowa analiza treści projektu i raportu geologicznego Rzetelny program technologiczny Selekcja narzędzi i metod działania Zapewnienie hydrauliki dla oczyszczania czoła narzędzia Dopasowanie kompozycji płynu wiertniczego do przewiercanej formacji Analiza case study	Zmiana narzędzia Zmiana techniki wiercenia (parametry procesu) Weryfikacja założeń hydrauliki otworowej i koncepcji płuczkowej Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Kontrola Akceptacja Plan rezerwowy
14	Niedotrzymanie harmonogramu	Warunki geologiczne Niski postęp wiercenia Niedopasowanie urządzeń i techniki wiercenia Wadliwy harmonogram Logistyka, transport Nadmierny czas nieproduktywny Kompetencje personelu	Prawidłowa konfiguracja sprzętu i BHA Realistyczne planowanie operacji wiertniczych Budowanie kompetencji załogi Analiza case study Wprowadzenie specjalistycznego nadzoru	Regularne mityngi techniczne Weryfikacja istniejących procedur technicznych Optymalizacja technologii wiercenia	Unikanie Kontrola Dystrybucja
15	Niestabilna ściana otworu	Warunki geologiczne Niedopasowanie osprzętu wgłębnego Niewłaściwe parametry płuczki Niedopasowanie technologii wiercenia Niewłaściwa hydraulika otworowa	Prawidłowa konfiguracja sprzętu i BHA Realistyczne planowanie operacji wiertniczych Rzetelny projekt technologiczny Bilansowanie przepływów i fazy stałej	Weryfikacja procedur wiertniczych Przerabianie i kalibracja otworu Modyfikacja programu płuczkowego	Kontrola Plan rezerwowy
16	Wysoki moment obrotowy	Warunki geologiczne Niewłaściwe oczyszczanie otworu ze zwiercin Brak monitoringu obciążeń Parametry płuczki	Śledzenie trendu T&D Bilansowanie przepływów i fazy stałej Rzetelny program płuczkowy	Cyrkulowanie Wycofanie zestawu narzędzi Przerabianie otworu	Unikanie Kontrola
17	Wysoka siła osiowa pchanie i ciągnięcie	Warunki geologiczne Niewłaściwe oczyszczanie otworu ze zwiercin Brak monitoringu obciążeń Parametry płuczki	Śledzenie trendu T&D Bilansowanie przepływów i fazy stałej Rzetelny program płuczkowy	Cyrkulowanie Wycofanie zestawu narzędzi Przerabianie otworu	Unikanie Kontrola
18	Wysoka siła instalacyjna	Niska jakość otworu wiertniczego Brak balastowania na poziomie optymalnym Rzeczywista trajektoria różna od projektowanej awarie sprzętu Nieplanowane przerwy w procesie	Prawidłowa ocena jakości otworu Przeprowadzenie rzetelnego bilansu masy Dodatkowy marsz kalibrujący Przygotowanie instalacji do balastowania	Stosowanie stacji pchających Wycofanie rurociągu z otworu Przerabianie i kalibracja otworu Modyfikacja właściwości smarnych płuczki	Kontrola Plan rezerwowy
19	Zakleszczenie narzędzi w otworze	Błędne procedury wiertnicze Niestabilna ściana otworu Nieprawidłowe usuwanie zwiercin z otworu Niski postęp wiercenia	Prawidłowy program technologiczny Monitoring trendu T&D Bilansowanie fazy stałej Bilansowanie płynu wiertniczego Szkolenie załogi	Mobilizacja sprzętu o wyższych parametrach mechanicznych Instrumentacja w otworze	Unikanie Kontrola Plan rezerwowy
20	Zatrzymanie przewodu wiertniczego	Niestabilna ściana otworu Wadliwe procedury wiertnicze Nadmierne zmiany kątowe Niski postęp wiercenia Brak prawidłowej cyrkulacji i usuwania zwiercin z otworu	Prawidłowa analiza T&D Prawidłowe procedury wiertnicze Kontrola bilansu masowego i objętościowego Szkolenie załogi	Instrumentacja w otworze Wprowadzenie dodatków smarnych do płuczki Mobilizacja wiertnicy o wyższych parametrach mechanicznych	Unikanie Kontrola Plan rezerwowy

TAB. 2. | Zarządzanie pośrednim ryzykiem płuczkowym

Płyny wiertnicze to potencjalne źródło komplikacji technicznych, ale zarazem też klucz do rozwiązania największych problemów związanych z wierceniem



OPTIMALIZACJA PODEJŚCIA DO PŁYNÓW WIERTNICZYCH

Jak już wspomniano na wstępie, płyny wiertnicze to potencjalne źródło komplikacji technicznych, ale zarazem też klucz do rozwiązania największych problemów związanych z wierceniem. We współczesnym świecie instalacji rurociągowych wiertnicy nieustannie zmagają się z mniej lub bardziej złożonymi sytuacjami. Opóźnienia i rosnące koszty mogą wynikać z różnych powodów, które stanowią wyzwanie nawet dla najbardziej doświadczonych profesjonalistów.

W niniejszym artykule omówiliśmy najczęstsze sytuacje kryzysowe i określiliśmy sposoby ich prewencyjnego wykluczenia lub też metody ograniczenia ich negatywnych skutków.

Kompleksowy program stosowania płynów wiertniczych w danym projekcie powinien skutecznie rozwiązywać typowe problemy omówione powyżej. Integrując zadania takie jak: programowanie parametrów płynu i hydrauliki otworowej, kontrola ciśnień wgłębnych i bilansowanie przepływów, zarządzanie fazą stałą, kontrola tarcia w otworze, uzyskujemy efekt synergii, która to pomaga usprawnić operacje, ograniczać opóźnienia i kontrolować koszty. Wybór odpowiedniej firmy zarządzającej płynem wiertniczym może odciążyć firmę wiertniczą od wszystkich czynności powiązanych z płuczką i pozwolić jej skupić się na efektywnym wierceniu otworu. Specjalistyczna firma płuczkowa powinna lepiej od spółki wiertniczej rozumieć cykl życia płynu w trakcie projektu i przygotować się na zarządzanie zdecy-

dowaną większością potencjalnych ryzyk technologicznych.

Dobrze zaplanowany proces projektowania płynów wiertniczych może przynieść firmie wiertniczej wiele korzyści: satysfakcjonujący postęp wiercenia, skuteczny transport zwiercin, skutecznie oczyszczoną płuczkę, niższe koszty utylizacji oraz mniejsze zużycie sprzętu i osprzętu wiertniczego. Jednak zdecydowanie największą korzyścią jest pomoc w wykonaniu otworu zgodnie z planem przy jak najmniejszej ilości nieproduktywnego czasu. Dobra komunikacja i współpraca między inżynierem płuczkowym i załogą wiertniczą jest niezbędna do zrealizowania założonego planu wiercenia. **I**

LITERATURA

- [1] Baker Hughes Inteq: Drilling Fluids Reference Manual, 2007 Edition.
- [2] Bourgoynne Adam, Chenever Martin: Applied Drilling Engineering, Society of Petroleum Engineers 1986.
- [3] Bridges Samuel, Robinson Leon: A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing, Elsevier Science 2020.
- [4] Caenn Ryan: Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Elsevier Science 2011.
- [5] Gaboide Gilles, Nguyen Jean Paul: Drilling Data Handbook, Editions Technip 2013.
- [6] Hafezi Salar: Real-time Detection of Drilling Problems and Issues During Drilling by Listing and Using Their Signs Both on the Surface and Downhole, Norwegian University of Science and Technology 2023.
- [7] HDD Consortium: Good Practice Guidelines, Fourth Edition 2017.
- [8] Hossain M.E., Islam M.R.: Drilling Engineering. Problems and Solutions. Scrivener Publishing 2018.
- [9] Osikowicz Robert: Wprowadzenie do inżynierii płynów wiertniczych cz. I, II, III i IV, „Inżynieria Bezwykopowa” 4/2023, 1/2024, 2/2024, 3/2024.
- [10] Robello Samuel: Formulas and Calculations for Drilling Operations, Scrivener Publishing 2010.
- [11] Skalle Pal: Drilling Fluid Engineering, Pål Skalle & Ventus Publishing ApS 2011.
- [12] Stryczek Stanisław i inni: Poradnik Górnik Naftowego. Tom II. Wiertnictwo, Stowarzyszenie Naukowo-Techniczne Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków 2015.

Dobrze zaplanowany proces projektowania płynów wiertniczych może przynieść firmie wiertniczej wiele korzyści: satysfakcjonujący postęp wiercenia, skuteczny transport zwiercin, skutecznie oczyszczoną płuczkę, niższe koszty utylizacji oraz mniejsze zużycie sprzętu i osprzętu wiertniczego

