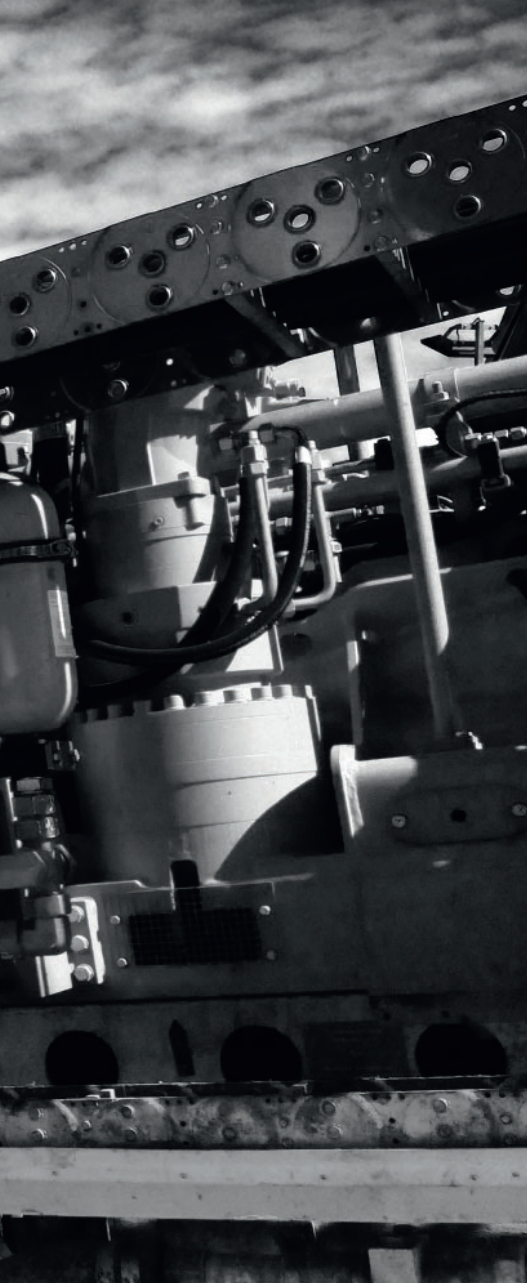




**BEZWYKOPOWA BUDOWA**

# PLANOWANIE I REALIZACJA PROJEKTÓW HDD

CZĘŚĆ IV: KATEGORYZACJA I SELEKCJA URZĄDZEŃ



**ROBERT OSIKOWICZ**  
ROE

(ur. 1966), absolwent Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Zajmuje się technologią wiercenia otworów kierunkowych i praktycznymi aplikacjami płynów wiertniczych w otworach różnego przeznaczenia. Jest autorem ponad 20 referatów wygłoszonych na międzynarodowych konferencjach technicznych, a także szeregu publikacji dotyczących konfiguracji sprzętu, optymalizacji techniki wiercenia, analiz rynku technologii bezwykopowych, zarządzania jakością i ryzykiem w działaniach wiertniczych, tworzenia harmonogramów i budżetów projektów. Od 2009 r. pracuje dla firmy Robert Osikowicz Engineering. Firma jest członkiem międzynarodowej branżowej organizacji wiertniczej Drilling Contractors Association (DCA-Europe).

Jakie są główne elementy wyposażenia stosowanego na powierzchni terenu i kryteria wyboru bazujące na możliwie precyzyjnym dostosowaniu urządzeń do stopnia złożoności projektu? Za dostarczenie sprzętu odpowiedniej klasy odpowiada spółka wiertnicza, jednak już na etapie tworzenia koncepcji technicznej, projektant i jego konsultacji powinni określić minimalne wymagania co do zaangażowanych urządzeń wiertniczych i systemów płuczkowych. Lepsze lub gorsze dopasowanie sprzętu rodzić będzie niższe lub wyższe ryzyko związane z niedotrzymaniem harmonogramu, niezyskaniem wymaganej jakości, czy przekroczeniem założonego budżetu

### KATEGORIE REALIZOWANYCH PROJEKTÓW WG WSKAŹNIKA HDI

Jak wynika z analizy statystycznej przeprowadzonych dotychczas w Polsce projektów HDD, istnieje wyraźna korelacja pomiędzy klasą projektu a wykorzystanym urządzeniem wiertniczym. Zaproponowany przez ROE wskaźnik trudności otworu HDI (*Hole Difficulty Index*) jest iloczynem średnicy rurociągu (cale) i długości instalacji (metry), przy czym długość otworu ma wyższy priorytet niż pole przekroju poprzecznego zabudowywanej rury. Poniżej wskazano na sześć kategorii realizowanych projektów HDD od bardzo małych (HDI poniżej 2.000) do ekstremalnych (HDI powyżej 40.000). Zaproponowane kategorie (przedziały) zostały wyodrębnione na podstawie doświadczenia autora i aktualnego poziomu techniki HDD w Polsce. Wskaźnik HDI należy traktować jako jeden z parametrów wpływających na ewaluację projektu. Do innych istotnych czynników wpływu należy zaliczyć: rodzaj pokonywanej przeszkody, warunki geologiczne i hydrologiczne, trajektorię otworu, zastane lub stworzone warunki zabudowy.

Dla lepszego zrozumienia problemu selekcji i doboru sprzętu do analizowanego projektu, dostępne na rynku wiertnice HDD podzielono na dwa obszary: urządzenia kompaktowe i pełnowymiarowe. Dodatkowo w każdej z tych grup wydzielono po dwie klasy sprzętu: mini i midi wśród wiertnic kompaktowych oraz maxi i mega wśród wiertnic obsługujących przewód wiertniczy o długości pojedynczego kawałka powyżej 9 m. Drugą zmienną w dwuwymiarowej macierzy jest kategoria projektu

wynikająca z poziomu wskaźnika HDI. Ilość zrealizowanych projektów została oszacowana na podstawie aktualnych list rankingowych publikowanych regularnie przez firmę ROE na łamach „Inżynierii Bezwykopowej”. Łączna ilość projektów określonych jako średnie, duże, bardzo duże i ekstremalne nie przekracza dziesięciu procent. To wskazuje, że codziennością są projekty małe i bardzo małe, które można traktować jako rutynowe. Projekty większe (HDI powyżej 5.000 punktów) nie są tak powszechne, tym niemniej odpowiadają za ponad 50% wartości sprzedanych specjalistycznych usług. Na podstawie list projektów obejmujących lata 1991–2019 można wskazać najczęściej wykorzystywane konfiguracje sprzętowe. Należy założyć, że im wyższy udział danej klasy sprzętu w poszczególnych kategoriach projektów, tym lepsze dopasowanie sprzętu do wymagań projektowych, nie tylko pod względem technicznym, ale i finansowym. Zaproponowane parametry należy traktować jako orientacyjną wytyczną.

### KLUCZOWE KOMPONENTY SYSTEMÓW WIERTNICZYCH

Istnieje kilka podstawowych układów (podsystemów) wymaganych dla wykonywania robót wiertniczych w ramach budowy rurociągowych instalacji podziemnych:

- wiertnica kierunkowa służąca do wywierania sił osiowych (pchanie i ciągnięcie) na przewód wiertniczy oraz podtrzymywanie obrotów przewodu, a w konsekwencji do zapewnienia wymaganego momentu obrotowego;

Średnica Długość	6"	8"	10"	12"	16"	20"	24"	28"	32"	40"	
100	600	800	1.000	1.200	1.600	2.000	2.400	2.800	3.200	4.000	
200	1.200	1.600	2.000	2.400	3.200	4.000	4.800	5.600	6.400	8.000	
300	1.800	2.400	3.000	3.600	4.800	6.000	7.200	8.400	9.600	12.000	
400	2.400	3.200	4.000	4.800	6.400	8.000	9.600	11.200	12.800	16.000	
500	3.000	4.000	5.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	20.000	
600	3.600	4.800	6.000	7.200	9.600	12.000	14.400	16.800	19.200	24.000	
700	4.200	5.600	7.000	8.400	10.200	14.000	16.800	19.600	22.400	28.000	
800	4.800	6.400	8.000	9.600	12.800	16.000	19.200	22.400	25.600	32.000	
900	5.400	7.200	9.000	10.800	14.400	18.000	21.600	25.200	28.800	36.000	
1000	6.000	8.000	10.000	12.000	16.000	20.000	24.000	28.000	32.000	40.000	
1200	7.200	9.600	12.000	14.400	19.200	24.000	28.800	33.600	38.400	48.000	
1400	8.400	11.200	14.000	16.800	22.400	28.000	33.600	39.200	44.800	56.000	
1600	9.600	12.800	16.000	19.200	25.600	32.000	38.400	44.800	51.200	64.000	
1800	10.800	14.400	18.000	21.600	28.800	36.000	43.200	50.400	57.600	72.000	
2000	12.000	16.000	20.000	24.000	32.000	40.000	48.000	56.000	64.000	80.000	
2500	15.000	20.000	25.000	30.000	40.000	50.000	60.000	70.000	80.000	100.000	
<b>Klasa projektu</b>	Projekty bardzo małe HDI < 2.000		Projekty małe 2.000 < HDI < 5.000		Projekty średnie 5.000 < HDI < 10.000		Projekty duże 10.000 < HDI < 20.000		Projekty bardzo duże 20.000 < HDI < 40.000		Projekty ekstremalne HDI > 40.000

Tab. 1. | Ocena stopnia trudności instalacji HDI (Hole Difficulty Index) w funkcji długości (m) i średnicy instalowanego rurociągu (cale)

- układ płuczkowy służący do inicjowania i podtrzymywania obiegu płuczki wiertniczej;
- system nawigacji w otworze kierunkowym;
- przewód wiertniczy, narzędzia i osprzęt wgłębny umożliwiający bezpośrednio proces drążenia otworu;
- inne elementy niezbędne do realizacji projektów wiertniczych, takie jak: mobilne układy do kontrolowanego skręcania i rozkręcania połączeń gwintowych, stacje pchające, sprzęt pomocniczy w postaci dźwigów, koparek, samochodów specjalistycznych.

W niniejszym artykule przedmiotem naszego szczególnego zainteresowania będą urządzenia wiertnicze i stowarzyszone z nimi układy płuczkowe. W literaturze przedmiotu podstawowymi wyróżnikami charakteryzującymi systemy wiertnicze będą:

- siła ciągnięcia,
- siła pchania,
- moment obrotowy,
- prędkość obrotowa wrzeczona w funkcji momentu obrotowego,

- zainstalowana moc i typ napędu,
- wydatek pompy płuczkowej i maksymalne ciśnienie robocze,
- przepustowość stowarzyszonego z wiertnicą układu płuczkowego.

Na podstawie praktycznych doświadczeń rynku wiertniczego można określić potencjalny zasięg wiercenia (długość i głębokość otworu) oraz potencjalne zakresy średnic instalowanych rurociągów. Zakresy te będą różniły się pomiędzy sobą w zależności od napotkanych warunków geologicznych (formacje miękkie niespoiste, formacje spoiste, rumosz i lita skała). Należy jednak podkreślić, że uzyskanie założonych parametrów instalacji jest warunkowane zastosowaniem właściwej geometrii przewodu wiertniczego, typu narzędzi, technologii ich zastosowania i adekwatnych do skali przedsięwzięcia procedur wiertniczych.

## OSIĄGI SYSTEMÓW WIERTNICZYCH

Z uwagi na to, że urządzenie wiertnicze cechuje się obiektywnymi parametrami technologicznymi (siła osiowa, moment obrotowy

niezbędny dla podtrzymywania wymaganej prędkości rotacji oraz objętość płynu wiertniczego zatłaczanego w jednostce czasu), można pokusić się o opracowanie modelu korelującego poszczególne parametry pomiędzy sobą oraz ich synergiczne użycie w kontekście możliwości zrealizowania danego projektu. Jakkolwiek urządzenia wiertnicze są określane maksymalnymi teoretycznymi parametrami możliwymi do uzyskania z danego układu napędowego, to ich faktyczne możliwości są pochodną wykorzystywanego w praktyce zakresu parametrów.

Dostępne na rynku konstrukcje wiertnic różnią się między sobą typem zabudowy, rodzajem napędu wrzeczona głowicy, mocą zainstalowanych silników, sposobem transportu na miejsce projektu oraz stopniem zaawansowania i przepustowością systemu płuczkowego. W kontekście transportu i możliwości przemieszczania się wiertnic wyróżniamy urządzenia samojezdne, wyposażone najczęściej w mechanizm gąsienicowy, dający możliwość poruszania się po placu budowy i pozbawione cech mobilności wiertnice wymagające do ich montażu urządzeń dodatkowych, np. dźwigów.

Skala projektu		Ilość udokumentowanych przypadków	Klasa urządzenia wiertniczego			
			Kompaktowe < 300 kN mini	Kompaktowe 300–800 kN midi	Pełnowymiarowe 1000–2500 kN maxi	Pełnowymiarowe > 2500 kN mega
Projekty bardzo małe	HDI < 2.000	Nieokreślona	85%	15%	0	0
Projekty małe	2.000 < HDI < 5.000	Nieokreślona	60%	35%	5%	0
Projekty średnie	5.000 < HDI < 10.000	200	12%	66%	20%	2%
Projekty duże	10.000 < HDI < 20.000	100	0	22%	72%	6%
Projekty bardzo duże	20.000 < HDI < 40.000	30	0	0	73%	27%
Projekty ekstremalne	HDI > 40.000	2	0	0	0	100%
Stopień dopasowania urządzenia do klasy projektu			Nieodpowiednie	Dostateczne	Dobre	Bardzo dobre

Tab. 2. | Procentowy udział zdefiniowanych klas urządzeń wiertniczych w różnych kategoriach projektów zrealizowanych w Polsce

Mobilność wiertnic samojezdnych jest cechą, którą można wykorzystać do umieszczenia na obszarze roboczym, do którego dostęp jest ograniczony. Pełnowymiarowe wiertnice klasy maxi i mega, z racji swojej masy i gabarytów, wymagają dobrej jakości dróg dojazdowych i utwardzonych placów maszynowych.

*Jak wynika z analizy statystycznej przeprowadzonych dotychczas w Polsce projektów HDD, istnieje wyraźna korelacja pomiędzy klasą projektu a wykorzystanym urządzeniem wiertniczym*

Napęd dla wiertnic zapewnia w większości przypadków silnik wysokoprężny, natomiast poszczególne podzespoły mogą korzystać z napędu hydraulicznego, mechanicznego, elektrycznego lub pneumatycznego. Do podstawowych podzespołów systemu wierzącego zaliczają się:

- stalowa ramowa konstrukcja;
- system kotwiący niezbędny dla przejmowania powstałych w trakcie operacji wiert-

niczych obciążeń osiowych i momentów skręcających;

- ruchome sanie z zamontowanym wrzecionem (napęd górny);
- system podawania i odbioru elementów przewodu wiertniczego, wykorzystujący automatyczny podajnik – magazynek (w urządzeniach kompaktowych) lub urządzenie dźwigowe (popularne w większych wiertnicach);
- system imadeł – szczęk dolnych (w bardziej zaawansowanych urządzeniach dolnych i górnych), służący do skręcania z kontrolowanym momentem zworników przewodu i bezpiecznego rozcinania połączeń gwintowych;
- system wytwarzania mocy mechanicznej;
- systemy przekazywania napędu do poszczególnych podzespołów wiertnicy;
- system sterujący posuwem wrzeciona (zębatka, łańcuch lub siłownik hydrauliczny);
- system sterujący obrotem wrzeciona;
- system rejestrujący parametry pracy;
- pulpit sterowniczy w kajucie wiertacza z bezpośrednim dostępem do większości funkcji urządzenia;
- szeroko rozumiany system płuczkowy obejmujący pompy, zbiorniki, armaturę, rurociągi, urządzenia mechanicznego rozdziału faz;
- przewód wiertniczy;
- narzędzia, centralizatory, stabilizatory i inny specjalistyczny osprzęt wstępny;
- system nawigacji w otworze kierunkowym

(wraz ze stowarzyszonym powierzchniowym układem pomiarowym);

- systemy dokonujące pomiarów wstępnych.

Urządzenia kompaktowe dostępne są w zasadzie wyłącznie na podwoziu gąsienicowym. W urządzeniach klasy powyżej 1000 kN mamy do wyboru znacznie więcej opcji, w tym podwozie kołowe, konstrukcje ramowe i kilkuczęściowe konstrukcje modułowe. Zespół napędowy może być z wiertnicą zintegrowany lub też rozdzielony i umieszczony w zewnętrznych kontenerach.

Współczesne wiertnice posiadają zaawansowane funkcje automatyzacji procesu wiercenia, dające możliwość określenia stałych parametrów pracy lub stałego postępu. System sterowania pompą płuczkową wysokiego ciśnienia pozwala na precyzyjne ustawienia założonego wydatku tłoczenia i kontrolę całkowitego spadku ciśnienia w układzie cyrkulacyjnym. Pulpit wiertacza jest nie tylko miejscem manualnej obsługi funkcji roboczych wiertnicy. Dzięki trybom półautomatycznym lub automatycznym można zdefiniować (zadać) optymalny zakres każdego z parametrów pracy. Parametry krytyczne z punktu widzenia procesu wiertniczego i funkcjonowania urządzenia mogą być nie tylko rejestrowane i wyświetlane w czasie rzeczywistym, ale także archiwizowane. Dostęp do gromadzonych danych możliwy jest zarówno w miejscu lokalizacji projektu, ale także dzięki odpowied-

Elementy wyposażenia układu wiertniczego	Klasa rządzenia wiertniczego			
	Kompaktowe < 300 kN mini	Kompaktowe 300-800 kN midi	Pełnowymiarowe 1000-2500 kN maxi	Pełnowymiarowe > 2500 kN mega
Wiertnica	samojezdna na podwoziu gąsienicowym	samojezdna na podwoziu gąsienicowym	konstrukcja na gąsienicach, na kołach lub konstrukcja ramowa	konstrukcja na kołach, konstrukcja ramowa lub konstrukcja modułowa
Stacja pchająca ( <i>pipe pusher</i> )	nie	nie	opcjonalnie dla HDI > 30.000 i średnicy rurociągu stalowego od DN700	opcjonalnie dla HDI > 40.000 i średnicy rurociągu stalowego od DN700
Wysokociśnieniowa pompa płuczkowa	zintegrowana z wiertnicą do 500 l/min	zintegrowana z wiertnicą do 1000 l/min lub oddzielna do 2000 l/min	oddzielna do 3000 l/min	dwie oddzielne pompy do 5000 l/min
System separacji faz	opcjonalny przepustowość do 1000 l/min	tak przepustowość do 2000 l/min	tak przepustowość do 3500 l/min	tak przepustowość do 5000 l/min
System przygotowania i kondycjonowania płuczki	tak pojemność do 10 m <sup>3</sup>	tak pojemność do 20 m <sup>3</sup>	tak pojemność do 40 m <sup>3</sup>	tak pojemność do 60 m <sup>3</sup>
Zbiorniki buforowe i zapasowe	nie	opcjonalnie	tak	tak
Pompy szlamowe (transfer płuczki)	opcjonalnie	tak	tak	tak
Mobilny unit do skręcania i rozkręcania połączeń gwintowych	opcjonalnie 15-30 kNm	opcjonalnie 50-80 kNm	tak 80-120 kNm	tak 120-180 kNm
Klucze manualne (tongi)	tak	tak	tak	tak
Zaplecze kontenerowe budowy	opcjonalne	opcjonalne	tak	tak
System nawigacji magnetycznej lub żyrokompasowej	opcjonalnie	opcjonalnie	tak	tak
Przewód wiertniczy	do 4,5 m długości do 89 mm średnicy calizny	do 6,1 m długości do 127 mm średnicy calizny	do 10 m długości do 168 mm średnicy calizny	do 10 m długości do 193 mm średnicy calizny
Zakres typowych połączeń gwintowych	2 3/8" IF - 3 1/2" IF	3 1/2" IF - 4 1/2" IF	5 1/2" FH - 6 5/8" FH	6 5/8" FHDS - 6 5/8" H90 DS
Świder do wiercenia pilotowego	do 8 1/2" (216 mm)	do 12 1/4" (311 mm)	do 16" (406 mm)	do 20" (508 mm)
Średnica poszerzania otworu	do 28" (711 mm)	do 40" (1016 mm)	do 54" (1371 mm)	do 72" (1828 mm)
Typowy zakres średnic rurociągów	3-20"	6-28"	12- 40"	20-56"
Typowy zakres długości instalacji	do 500 m	300-1000 m	400-1500 m	600-2000 m
Typowy zakres głębokości instalacji	do 20 m	10-30 m	15-50 m	20-100 m
Wymagana powierzchnia placu maszynowego	500 m <sup>2</sup>	2000 m <sup>2</sup>	4000 m <sup>2</sup>	6000 m <sup>2</sup>
Ilość personelu na zmianę roboczą	3-4 osoby	5-7 osób	7-10 osób	8-12 osób

Tab. 3. | Podstawowe elementy systemów wiertniczych z podziałem na klasy urządzeń

mu oprogramowaniu może być udostępniony zdalnie uprawnionym (autoryzowanym) użytkownikom sieci.

Uzupełnieniem dla podstawowej konfiguracji placu maszynowego jest sprzęt mobilizowany po stronie rurociągowej przewiertu. Za prefabrykację rurociągu stalowego odpowiada na ogół generalny wykonawca inwestycji. Rurociągi z tworzyw sztucznych mogą być przygotowywane przez spółkę wiertniczą wyposażoną w adekwatny do średnicy rurociągu sprzęt do jego zgrzewania, posiadającą przy tym przeszkolony do wykonywania tych prac personel. Po stronie rurowej wykonuje się

czynności związane ze skręcaniem i rozkręcaniem narzędzi wiertniczych. Jest to ponadto miejsce dokładania kolejnych kawałków przewodu w trakcie operacji poszerzania otworu. W urządzeniach klasy od 450 kN wwyż wykorzystuje się mobilny zestaw do skręcania przewodu z momentem kontrolowanym. Pompa szlamowa o dużej wysokości podnoszenia jest wykorzystywana do przesyłu płuczki ze strony rurociągowej (*pipe side*) na stronę wiertniczą (*rig side*). Transfer odbywa się uprzednio przygotowanym rurociągiem o średnicy od 6 do 8". W przypadkach szczególnych na stronie rurowej instaluje się dodatkowe urządzenie

wiertnicze wspierające operacje wiertnicze pracujące w tandemie z wiertnicą podstawową. Jego główną rolą jest napinanie przewodu i asekuracja narzędzi wiertniczych. Ponadto, opcjonalnie w trakcie wielkoskalowych projektów, zastosowanie może znaleźć stacja pchająca (*pipe pusher*), służąca jako zabezpieczenie instalacji rurociągów stalowych o średnicy powyżej 24".

## SYSTEMY PŁUCZKOWE

HDD jest metodą wykorzystującą płyn wiertniczy jako niezbędny składnik procesu, dlate-

go każde urządzenie wyposażone jest w jedną lub dwie tłokowe pompy wysokociśnieniowe. Pompa płuczka jest zintegrowana z wiertnicą (*on board*) w niemal wszystkich urządzeniach klasy do 800 kN. Jest wówczas zasilana z tego samego silnika spalinowego co funkcje posuwu i obrotu. W przypadku większych maszyn producenci oddzielają płuczkową pompę wysokiego ciśnienia i jej napęd od podstawowej wiertnicy. Preferowana jest przy tym zabudowa kontenerowa, ułatwiająca transport i ograniczająca emisję hałasu. Pompy tłokowe charakteryzują się teoretyczną wydajnością od około 100 l/min (dla najmniejszych modeli) do około 3000 l/min. Zakres możliwych do aplikacji ciśnień roboczych mieści się najczęściej w przedziale pomiędzy 40 a 120 bar.

Naturalnym uzupełnieniem pomp płuczkowych są układy produkcji i kondycjonowania płynu. Ich konstrukcja i dostępne pojemności zbiorników są powiązane z klasą urządzenia wiertniczego. Powszechnie stosuje się napędy spalinowe w kompaktowych wiertnicach klasy mini oraz napędy elektryczne w urządzeniach o sile ciągnięcia powyżej 450 kN. Dla urządzeń klasy 150–200 kN dostępne są też układy oczyszczania płuczki wiertniczej o wydajnościach (przepustowościach) około 500 l/min. Dla urządzeń wiertniczych o sile ciągnięcia od 300 kN wzwyż zamknięty obieg płuczki powinien być normą i standardowym sposobem postępowania spółki wiertniczej. Dzięki

prawidłowemu zamknięciu obiegu płuczki firma jest w stanie realizować bardziej złożone zadania, wymagające dużych objętości płuczki zatłaczanej do otworu. Z zamykaniem obiegu płuczki, wyrażającego się wprowadzeniem do układu sit wibracyjnych, hydrocyklonów, pomp szlamowych czy nawet zaawansowanych technicznie szybkoobrotowych wirówek dekantacyjnych, wiąże się szereg potencjalnych zalet i korzyści:

- zastosowanie prawidłowej techniki wiertniczej,
- utrzymywanie koncentracji fazy stałej na pożądanym poziomie,
- wyższa jakość otworu wynikająca z ustabilizowanych parametrów płynu wiertniczego,
- drastyczna redukcja konsumpcji wody i materiałów płuczkowych,
- możliwość powszechnego stosowania systemów inhibitowanych,
- ograniczenie przestojów wynikających z braku wody technologicznej,
- ograniczenie przestojów wynikające z ograniczenia czasu przygotowania płuczki,
- drastyczne obniżenie kosztów utylizacji szlamu.

Wydajność (przepustowość) systemu separacji powinna być skorelowana z planowanymi przepływami i klasą urządzenia wiertniczego. Oznacza to, że nominalna wydajność systemu powinna być o co najmniej 20% wyższa niż

potencjalny wydatek pompy płuczki. Inwestycja w zamknięty obieg płuczki jest kosztem, który firma powinna uwzględnić w strategii i planie swojego rozwoju. Koszty utylizacji odpadów wiertniczych wzrastają regularnie z roku na rok i przekraczają obecnie nakłady na produkcję płuczki (sposób funkcjonowania zamkniętego obiegu płuczki został szczegółowo omówiony w cyklu czterech artykułów opublikowanych na łamach „Inżynierii Bezwykopowej” w numerach od 1/2016 do 4/2016).

## KRYTERIA DOBORU URZĄDZEŃ WIERTNICZYCH

W literaturze przedmiotu istnieje kilka możliwych algorytmów wykorzystywanych dla rozwiązania tego problemu. Najbardziej rozsądnym podejściem wydaje się zadanie kilku kluczowych pytań i sformułowanie na nie odpowiedzi:

- Czy jesteśmy w stanie wywiercić otwór pilotowy po założonej trajektorii z wystarczającą dokładnością?
- Czy jesteśmy w stanie poszerzyć otwór do wymaganej średnicy w zastanych warunkach geologicznych?
- Czy jesteśmy w stanie zainstalować rurociąg przy obciążeniach niższych niż rekomendowane dla wiertnicy i samego rurociągu?
- Czy jesteśmy w stanie zapewnić system kotwicy dla maszyny wiertniczej zdolny do

Siła ciągnięcia [kN]	Moment obrotowy [kNm]	Wydatek pompy [l/min]	Optymalna długość otworu [m]	Optymalna średnica rurociągu [mm]	Użyteczny zakres HDI	Maksymalna wartość HDI
50	2	100	30-100	50-200	100-600	1.000
100	5	200	50-300	100-400	600-3.000	4.000
200	12	500	100-500	150-450	2.000-6.000	8.000
400	20	800	250-600	200-500	3.000-10.000	12.000
600	35	1200	300-800	250-600	4.000-12.000	15.000
800	45	1600	350-1000	300-700	5.000-15.000	20.000
1000	60	2000	400-1200	300-800	6.000-25.000	30.000
1500	75	2200	500-1200	300-800	8.000-30.000	35.000
2000	90	2500	500-1300	400-900	10.000-35.000	40.000
2500	100	3000	600-1500	400-1000	12.000-40.000	50.000
3000	120	4000	700-1800	500-1200	15.000-50.000	60.000
4000	150	5000	800-2000	500-1400	20.000-60.000	75.000

Tab. 4. | Zakres stosowania urządzeń wiertniczych i stowarzyszonych z nimi systemów płuczkowych

przeniesienia maksymalnych spodziewanych obciążeń wynikających z zastosowanych sił osiowych i momentów obrotowych?

## KRYTERIUM ZDOLNOŚCI DO WYTWORZENIA OTWORU

Podstawową przeszkodą dla wiercenia długich otworów kierunkowych jest TARCIE. Jest ono zdefiniowane jako siła przeciwstawiająca się ruchowi obiektów. Siła ta jest zatem zawsze skierowana przeciwnie do prędkości. Zjawisko oporów ruchu w otworze wiertniczym ma charakter skomplikowany, gdyż w grę wchodzi mechanizmy różnego rodzaju: zjawiska związane z tarcieniem posuwistym, tarcieniem tocznym i tarcieniem w płynie wiertniczym. Jeżeli będziemy przesuwali względem siebie dwie stykające się powierzchnie (przewód wiertniczy i ściana otworu), to zaobserwujemy zjawisko tarcia posuwistego, czyli fakt, że ruch ten wymaga stałego działania siły. Również wówczas, kiedy będziemy obracali przewodem wiertniczym wokół jego osi, ten ruch także będzie wymagał stałej siły. Przyczyną tego rodzaju tarcia są nierówności na trących powierzchniach. W typowych sytuacjach tarcia posuwistego stosunek siły tarcia  $T$  do nacisku  $N$  trących powierzchni jest stały. Jego wartość nazywana jest współczynnikiem tarcia.

$$\mu = T/N$$

Każda aktywność w otworze kierunkowym wytwarza moment obrotowy i siły osiowe (*torque and drag*). Nie ma przy tym znaczenia, czy jesteśmy w fazie wiercenia, zapuszczania casingu czy też instalacji rurociągu produktowego. Dla projektów o HDI powyżej 10.000 punktów analiza spodziewanych obciążeń notowanych na przewodzie wiertniczym powinna być standardowym działaniem. Obejmuje ona kalkulacje zarówno momentu obrotowego, jak i sił osiowych w trzech stanach:

- wiercenie otworu (*on bottom*);
- stany związane z cyrkulowaniem i marszowaniem w otworze (*off bottom*);
- instalacja rurociągu (*pipeline pulling*).

W pierwszym przypadku, poza obciążeniem generowanym przez sam przewód, a wynikającym z jego masy i obecności w kierunkowym

(zakrzywionym) otworze, mamy do czynienia także z obciążeniem będącym skutkiem urabiania (skrawania, kruszenia, odpajania) formacji. Narzędzie urabiające w następstwie 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, kształtu i stopnia skomplikowania trajektorii (intensywności zmian kątowych na jednostkę długości otworu) oraz współczynnika tarcia. Doświadczenia kierunkowego wiertnictwa rurociągowego pozwalają na przyjęcie założenia, że współczynnik tarcia będzie znajdował się w przedziale od 0,3 do 0,9. Współczynnik tarcia jest funkcją jakości otworu (stanu technicznego), otoczenia geologicznego, składu chemicznego płuczki i zawartości w niej fazy stałej. Współczynnik tarcia niższy niż 0,5 oznacza dobrą jakość otworu, współczynnik tarcia wyższy niż 0,9 oznacza jakość niedostateczną lub wręcz nieakceptowalną. Kalkulacje wstępne przeprowadza się dla kilku wariantów zdarzeń, w których symuluje się jakość otworu wiertniczego przez manipulację współczynnikiem tarcia.

Podsumowując, siła osiowa (DRAG) jest konsekwencją ruchu posuwistego przewodu wiertniczego i wynika z jego wyciągania z otworu lub zapuszczania do otworu. Po zbliżeniu do ściany i rozpoczęciu fazy wiercenia siła jest powiększana także o efektywny nacisk narzędzia urabiającego wywierany na formację na czole otworu.

$$T = \mu N_{DP}$$

Roboczy moment obrotowy (*torque*) może zostać określony jako siła wymagana do trwałego obracania przewodem wiertniczym i ewentualnie grupą narzędzi wgłębnych. W uproszczonym modelu moment będzie definiowany jako:

$$M = \mu N_{DP} r + \mu N_{TOOL} D/2,$$

gdzie:

$\mu$  – współczynnik tarcia (wielkość niemianowana)

$M$  – moment obrotowy [Nm]

$T$  – siła tarcia posuwistego [N]

$N_{DP}$  – siła dociskająca (siła kontaktowa) wynikająca z ciężaru przewodu wiertniczego i obecności płynu wiertniczego wewnątrz i na zewnątrz przewodu [N]

$N_{TOOL}$  – siła dociskająca (siła kontaktowa) wynikająca z ciężaru zestawu [N]

$r$  – promień obrotu interpretowany jako połowa średnicy zwornika obracanego przewodu [m]

$D$  – średnica narzędzia [m]

T&D jest naszym orężem w działalności wiertniczej. Dobre zrozumienie mechanizmów związanych z tarcieniem w otworze pozwoli skutecznie zaplanować i zrealizować roboty wiertnicze.

## KRYTERIUM SKUTECZNEJ INSTALACJI

Na etapie finalizacji projektu przeprowadzamy analizę mającą wskazać na potencjalne ryzyka wynikające z zabudowy rurociągu w otworze wiertniczym. Analiza powinna rozstrzygać co najmniej trzy kwestie:

- Czy siła instalacyjna niezbędna dla pokonania tarcia (przyłożona do głowicy ciągnącej) mieści się w dopuszczalnym zakresie obciążeń dla danego rurociągu? Pytanie to ma szczególne znaczenie w kontekście rurociągów wykonanych z tworzyw sztucznych.
- Czy wiertnica z osprzętem będzie w stanie dostarczyć siłę wystarczającą do bezpiecznej instalacji rurociągu, pozostając w zgodzie z poprzednim punktem?
- Jaki współczynnik bezpieczeństwa uznamy za satysfakcjonujący i jednocześnie racjonalny w kontekście analizowanego projektu?

W analizie technicznej musimy wskazać na maksymalną oczekiwaną siłę ciągnięcia, mogącą wystąpić podczas operacji instalacji rurociągu. Siłę tę ustalamy, mając na uwadze geometrię otworu, jego stan techniczny, wyposażenie wgłębne (przewód wiertniczy, narzędzie prowadzące, złącze obrotowe), geometrię rurociągu, średni ciężar właściwy szlamu wiertniczego w otworze, metodę balastowania wnętrza instalowanej rury, skład płynu wiertniczego mający wpływ na współczynnik tarcia rejestrowany na kontakcie rurociągu ze

ścianą wywierconego tunelu.

Jak wspomniano już wcześniej, tarcie posuwiste ma dwie odmiany: tarcie statyczne i tarcie dynamiczne. Z przypadkiem tarcia statycznego mamy do czynienia wtedy, gdy zaczynamy przesuwać rurociąg. W odróżnieniu od niego tarcie dynamiczne zachodzi już podczas ruchu rurociągu. Ponieważ najczęściej trudniej jest ruszyć ciało z miejsca, niż później podtrzymywać jego prędkość, w większości przypadków tarcie statyczne jest większe od dynamicznego.

Zakładając w dużym uproszczeniu, że otwór wiertniczy składa się z sekwencji sekcji zbliżonych do prostych i sekcji zakrzywionych (wierconych po łuku), siłę niezbędną do pokonania tarcia można przybliżyć za pomocą kilku formuł:

#### FORMUŁA BAZUJĄCA NA ANALIZIE FIZYCZNEJ (ROE)

Siła  $F_p$  potrzebna do pokonania tarcia na odcinkach prostych:

$$F_p = \mu N L + F_F$$

Siła  $F_c$  potrzebna do pokonania tarcia na odcinkach zakrzywionych:

$$F_c = \epsilon \mu (\mu N L) + FF,$$

gdzie:

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego

$\alpha$  – kąt krzywizny otworu [rad]

$N$  – jednostkowa siła kontaktowa (normalna) pomiędzy rurą i jej otoczeniem [N/m]

$\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą i jej otoczeniem [-]

$L$  – długość odcinka [m]

$F_F$  – tarcie pochodzące od ruchu rurociągu w szlamie wiertniczym [N]

Siła kontaktowa (wynikająca z siły wyporu)

$$N_h = \pi D_z^2 / 4 \gamma_{MUD} - \pi (D_z^2 - D_w^2) / 4 \gamma_{PIPE} - \pi (D_1^2 - D_z^2) / 4 \gamma_{IZOL} - \pi D_w^2 / 4 \gamma_{BAL}$$

$D_1$  – średnica zewnętrzna rurociągu z izolacją [m]

$D_z$  – średnica zewnętrzna rurociągu bez izolacji [m]

$D_w$  – średnica wewnętrzna rurociągu [m]

$\gamma_{MUD}$  – ciężar właściwy płuczki w otworze [N/m<sup>3</sup>]

$\gamma_{IZOL}$  – ciężar właściwy materiału izolacji [N/m<sup>3</sup>]

$\gamma_{PIPE}$  – ciężar właściwy materiału rury [N/m<sup>3</sup>]

$\gamma_{BAL}$  – ciężar właściwy cieczy balastującej [N/m<sup>3</sup>]

#### FORMUŁA BAZUJĄCA NA ANALIZIE STATYSTYCZNEJ (DCA)

Jest to próba estymacji potencjalnej siły instalacyjnej bazującej na geometrii rurociągu i sekwencji współczynników korekcyjnych. Poniżej zaprezentowano skrócony wyciąg z analizy. Kalkulacje te należy traktować jako szacunkowe i służące szacowaniu zakresu sił dla końcowego etapu instalacji. Kluczem do poprawności stosowania tej formuły jest prawidłowe określenie współczynnika  $k$ , w którym zawarte są warunki zabudowy i geometria otworu.

$$F = \pi L D_z f,$$

gdzie:

$F$  – siła ciągnięcia [kN]

$L$  – długość otworu [m]

$D_z$  – średnica zewnętrzna rurociągu [m]

$f$  – współczynnik korekcyjny (wartość średnia)

Po określeniu teoretycznej siły instalacyjnej należy rozważyć przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa, jaki powinien być uwzględniony przy doborze urządzenia wiertniczego, któremu powierzamy przeprowadzenie skutecznej instalacji. Normy branżowe i rekomendacje firm doradczych wskazują na przedział od 1,5 do 3. Im analizowany projekt jest bardziej skompli-

kowany i kosztowny, tym wyższy współczynnik bezpieczeństwa powinien być przyjęty przy podejmowaniu decyzji technicznych i biznesowych. Z kolei, im niższy przyjęty i wdrożony współczynnik bezpieczeństwa (mniejsze urządzenie wiertnicze), tym wyższe wymagania należy postawić wobec jakości otworu.

*Podstawową przeszkodą dla wiercenia długich otworów kierunkowych jest tarcie. Jest ono zdefiniowane jako siła przeciwstawiająca się ruchowi obiektów*

#### KRYTERIUM ZAPEWNIENIA DOSTATECZNEJ MOCY

Przeprowadzenie analizy T&D dla wszystkich etapów projektu (wiercenie pilotowe, poszerzanie, kalibracja, instalacja) należy uznać za warunek konieczny dla określenia parametrów mechanicznych i hydraulicznych, jakie musi zapewnić mobilizowany system wiertniczy. Analiza T&D nałożona na wymagania związane z jakością otworu i uzyskiwanym postępem wiercenia będzie więc kryterium weryfikującym przydatność zaproponowanych rozwiązań w zakresie nie tylko sprzętu i osprzętu wiertniczego, ale, co nie mniej ważne, w obszarze wyboru strategii postępowania i technologii wiercenia. Trajektorie otworów powinny być tak zaplanowane, aby minimalizować zarówno siły osiowe, jak i moment obrotowy. Zwłaszcza zdolność do ope-

Parametr	Współczynnik	Zakres (opis)	
Materiał rury	$f_m$	0,3 (HDPE)	0,4 (stal)
Średnica otworu	$f_r$	0,5 (mała)	0,3 (duża)
Suma kątów	$f_w$	0,3 (<15 stopni)	0,5 (>30 stopni)
Przeszkody podziemne	$f_h$	0,5 (bardzo prawdopodobne)	0,3 (mało prawdopodobne)
Balastowanie	$f_b$	0,3 (optymalne)	0,5 (nieoptymalne)
Warunki tarcia gruntu	$f_\mu$	0,5 (trudne)	0,3 (standardowe)

Tab. 5. | Wartość współczynnika korekcyjnego (dla metody DCA) z podziałem na poszczególne parametry



Kalkulowany parametr	Rejestrowane czynniki wpływu				Zależność
Moc potrzebna do przesuwania przewodu wiertniczego	siła osiowa $T$		prędkość poruszania się przewodu w otworze $v$		iloczyn $T v$
Moc potrzebna do obracania przewodu wiertniczego	moment obrotowy $M_{DP}$		prędkość kątowna przewodu $\omega$		iloczyn $M_{DP} \omega$
Moc potrzebna do obracania narzędzia off bottom	moment obrotowy $M_{TOOL}$		prędkość kątowna narzędzia $\omega$		iloczyn $M_{TOOL} \omega$
Moc potrzebna do pracy narzędzia na spodzie otworu (urabianie formacji - on bottom)	nacisk na czoło narzędzia $P$	średnica narzędzia $D$	prędkość obrotowa narzędzia $n$	stała narzędzia wiertniczego uzależniona od jego typu i zwiercalności formacji $k$	iloczyn $k P^a D^b n$ a, b – wykładniki potęgowe zależne od rodzaju użytego narzędzia
Moc hydrauliczna pompy	strumień przepływu płuczki $Q$		spadek ciśnienia w układzie $\Delta p$		iloczyn $Q \Delta p$

Tab. 6. | Czynniki wpływające na zapotrzebowanie na moc mechaniczną i hydrauliczną w procesie HDD

rowania przewodem w trybie wiercenia orientowanego jest kluczowa z punktu widzenia osiągnięcia celu wiercenia pilotowego. Wysokie siły osiowe i wysoki (nadmierny) moment obrotowy najczęściej zdarzają się jednocześnie i są wynikiem niskiej jakości wierzonego otworu, niestabilnej i zdeformowanej ściany czy też nadmiernej ilości pozostawionych w otworze zwiercin. Dopuszczanie do nadmiernego poziomu obciążeń może skutkować komplikacjami i/lub awariami technicznymi zarówno po stronie sprzętu zlokalizowanego na powierzchni, jak i osprzętu wgłębego.

Symulacja zaprogramowanego procesu wiercenia to także sprawdzenie naszych działań pod względem bilansu energetycznego (bilansu dostępnej mocy). W ramach tej procedury należy prześledzić potencjalną konsumpcję energii w kontekście operowania urządzeniem wiertniczym, pompą wysokociśnieniową i stowarzyszonym z nią obiegiem płuczki. W tab. 5 podano podstawowe czynniki wpływu na konsumpcję energii w procesie HDD.

Dla realizacji zadania polegającego na wierceniu otworu i zabudowaniu w nim rurociągu lub wiązki rurociągów niezbędne jest spełnienie kilku warunków brzegowych. Jednym z nich jest zmobilizowanie w odpowiednim zakresie sprzętu wiertniczego, obejmującego zarówno wiertnicę HDD, jak i zaplecze płuczkowe.

Jak starano się uzasadnić w niniejszej pracy, dysponowanie sprzętem o odpowiednim zakresie dostępnych parametrów przekłada

się na sprawność w działaniu, jakość produktu i wysoki poziom bezpieczeństwa projektu. Omawiane współczynniki bezpieczeństwa, jakimi powinniśmy się posługiwać na etapie planowania i selekcji, będą musiały być powiązane z:

- warunkami geologicznymi,
- stopniem złożoności trajektorii,
- przewidywaną techniką i technologią wiercenia,
- doświadczeniem kontraktora,
- jakością wdrożonych procedur wiertniczych.

## PODSUMOWANIE

Wybór odpowiedniego sprzętu wiertniczego jest podobny do wyboru kontraktora wiertniczego. Możemy wybrać opcję bezpieczną, choć droższą. Możemy też wybrać opcję spełniającą bez żadnej rezerwy stawiane wymagania, ale za to konkurencyjną cenowo. Wybór urządzenia o zbyt małej mocy może utrudnić, a w pewnych wypadkach wykluczyć możliwość realizacji zadania. Wybór urządzenia o przewymiarowanych parametrach znacząco może wpłynąć na koszty operacyjne i obniżyć rentowność projektu. Jest to dylemat nietatwy do rozstrzygnięcia. Na etapie tworzenia dokumentacji projektowej problem wymogów stawianych wobec mobilizowanego sprzętu jest najczęściej pomijany. Z kolei na etapie przetargu od potencjalnego wykonawcy robót wiertniczych (WRB) wymaga się referencji w zakresie

realizacji projektów o podobnej skali. Generalny wykonawca (GW) czy też inwestor mogą nie mieć kompetencji w zakresie oceny przydatności posiadanych przez spółkę wiertniczą urządzeń. Gdyby jednak nawet takie kompetencje posiadali, nie uznaliby zapewne, że jest to argument decydujący o wyborze oferenta. Tym argumentem, dla większości analizowanych projektów, jest cena. A przecież mogłoby być inaczej. To wykonawca robót wiertniczych mógłby być gwarantem zakończenia inwestycji z powodzeniem, w ramach założonego budżetu, harmonogramu i w zgodzie ze standardami technicznymi. To na poziomie WRB dokonuje się najbardziej wnikliwej oceny jakości i wykonalności projektu. To tutaj decyduje się o zmobilizowaniu najbardziej optymalnej konfiguracji urządzeń. Intencją autora niniejszego artykułu było nie tylko sformułowanie kilku pytań skłaniających do refleksji. Jeśli na skutek tej lektury pojawi się potrzeba wykonania szeregu przedprojektowych analiz i symulacji, jego rola będzie dobrze spełniona. |

W najbliższych numerach kwartalnika „Inżynieria Bezwykopowa” zostaną opublikowane kolejne części artykułu poświęcone następującym zagadnieniom:

**Część 5:** Konfiguracja wyposażenia wgłębego

**Część 6:** Programy technologiczne i technika wiercenia

**Część 7:** Dokumentacja i raporty. Wymagania kompetencyjne

**Część 8:** Zarządzanie projektem. Harmonogram i budżet