

BEZWYKOPOWA BUDOWA

KRYTERIA
WYBORUURZĄDZEŃ
HDD■ 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).

■ KAROL GWÓŹDŹ
ROE

(ur. 1995), absolwent Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Twórca programu HDD Rig Advisor, służącego do doboru wiertnic HDD. Od 2019 r. pracuje dla firmy Robert Osikowicz Engineering (ROE). W jego kręgu zainteresowań są między innymi: selekcja i dobór sprzętu oraz osprzętu HDD, technologia płynów wiertniczych oraz metody optymalizacji procesu wiertniczego.



Z TEKSTU DOWIESZ SIĘ:

- ✓ jakie dane należy posiadać przed rozpoczęciem realizacji projektu wiertniczego,
- ✓ które parametry procesu są kluczowe,
- ✓ co powinno objąć planowanie otworu wiertniczego o zwiększonym zasięgu.

WSTĘP

Horyzontalne wiercenie kierunkowe (HDD) stało się na przestrzeni ostatnich 30 lat najpopularniejszą bezwykopową techniką budowy infrastruktury podziemnej w naszym kraju. Jak wynika z powszechnie przyjętej definicji, jest to metoda polegająca na płuczkowym, kierunkowym wierceniu otworów z użyciem przewodu wiertniczego w celu instalacji podziemnych rurociągów, kabli lub dla osiągnięcia zdefiniowanego celu technicznego. Jest

to przy tym metoda kilkuetapowa. Znajduje zastosowanie dla realizacji projektów zlokalizowanych na lądzie, na wodzie, jak i na styku lądu z wodą. Elementem niezbędnym do zastosowania w praktyce techniki HDD jest dostęp do urządzenia wiertniczego, będącego podstawową maszyną roboczą. Urządzenie to jest odpowiedzialne za realizację operacji wiertniczych, polegających na mechaniczno-hydraulicznym procesie drążenia otworu, którego trajektoria ma przebieg zbliżony do horyzontalnego.

KONTEKST PROJEKTU WIERTNICZEGO

Celem przedłożonego zadania będzie wykonywanie czynności wiertniczych, mających na celu wywiercenie otworu o określonej trajektorii i geometrii w zastanych warunkach geologicznych oraz instalacji w wytworzonym tunelu prefabrykowanego na placu budowy rurociągu. Przy tak postawionym problemie, przed rozpoczęciem robót wiertniczych, powinny być znane wy-

konawcy co najmniej następujące dane:

- topografia terenu i rozciągłość pokonywanych przeszkód;
- długość i maksymalna głębokość otworu;
- przebieg trajektorii uwzględniający kąty, promienie łuków i długości poszczególnych sekcji;
- przykrycie nad osią otworu w newralgicznych miejscach;
- geometria i materiał zaprojektowanej rury;
- warunki geologiczne i hydrologiczne;
- warunki lokalizacyjne obejmujące obszar przeznaczony na prace konstrukcyjne, drogi dojazdowe i istniejącą w pobliżu podziemną infrastrukturę techniczną;
- dostęp do terenu nadległego nad trasą wiercenia;
- miejsce zaopatrzenia w wodę technologiczną.

Na tej podstawie wykonawca robót wiertniczych powinien rozwiązać następujące problemy technologiczne:

- określenie spodziewanych obciążeń przewodu wiertniczego do wszystkich kluczowych faz robót, jakimi są: wiercenie pilotowe, poszerzanie otworu do ostatecznej średnicy oraz instalacja rurociągu (wiązki rurociągów) w wywierconym otworze;
- wskazanie minimalnych wymagań wobec zaangażowanego sprzętu i osprzętu wiertniczego;
- wskazanie minimalnych parametrów hydrauliki otworowej;
- stworzenie programu działań wiertniczych (plan i strategia działania) dla wszystkich etapów prac.

W jaki sposób wybrać optymalną wiertnicę, kierując się zarówno wskazaniem technologicznymi, jak i ekonomiką procesu



WIERTNICE HDD

Urządzenia wiertnicze mogą służyć do przeprowadzania zarówno krótkich, jak i bardzo długich instalacji (od kilkudziesięciu do kilku tysięcy metrów). Średnice zabudowywanych rurociągów wahać mogą się od kilku do blisko sześćdziesięciu cali. Zatem, w jaki sposób wybrać optymalną wiertnicę, kierując się zarówno wskazaniami technologicznymi, jak i ekonomiką procesu? W naszych wcześniejszych publikacjach dokonaliśmy podziału urządzeń wiertniczych HDD na cztery klasy (od najniższej): MINI, MIDI, MAXI i MEGA. Dwie niższe klasy reprezentowane są współcześnie przez konstrukcje kompaktowe o limitowanej do 6 m długości wykorzystywanego przewodu wiertniczego, natomiast dwie wyższe klasy obejmują konstrukcje pełnowymiarowe, posługujące się przewodem wiertniczym o długości pojedynczej rury płuczkowej do 10 m. Na potrzeby niniejszego opracowania podzieliśmy dwie niższe klasy na dodatkowe podkategorie w celu lepszego odwzorowania stanu rynku. W tab. 1 zaprezentowano podstawowe parametry dostępnych maszyn. Różnią się gabarytami, zainstalowaną mocą, no-

minalnymi parametrami mechanicznymi i hydraulicznymi, a w konsekwencji potencjalnym zakresem możliwego stosowania w kontekście długości otworu i średnicy instalowanego rurociągu.

Kombinacja podstawowych parametrów wiertnic (siła osiowa, moment obrotowy, strumień przepływu płuczki) – z zastosowanym rodzajem systemu nawigacji w otworze – pozwala na określenie limitów stosowania poszczególnych klas sprzętu. Limity te wynikają zarówno z analizy statystycznej przypadków rzeczywistych (case study), jak i z kalkulacji opartych na zasadach modelowania obciążeń przewodu wiertniczego TORQUE and DRAG. Kupując sprzęt wiertniczy, jego właściciel powinien wiedzieć:

- jak długie otwory będzie w stanie wywiercić bezpiecznie, dysponując określonym typem osprzętu wgłębnego?
- do jakiej średnicy będzie mógł bezpiecznie poszerzyć otwór w zidentyfikowanych warunkach geologicznych, stosując dostępny wydatek pompy płuczkowej?
- o jakich gabarytach rurociąg można bezpiecznie zainstalować w prawidłowo przygotowanym otworze?

Klasa urządzenia	Siła ciągnięcia pchania	Moment obrotowy	Pompa płuczkowa zintegrowana	Pompa płuczkowa zewnętrzna	Średnica przewodu wiertniczego	Długość odcinka przewodu	Promień krzywizny otworu	Moc urządzenia
	kN	kNm	l/min	l/min	cale (mm)	m	m	kW
MINI 1	do 150	<8	100-250		1-2 ½"	1,5-3	>30	<120
MINI 2	150-300	8-15	250-500		2 7/8" - 3 ½"	3-4,5	>60	100-150
MIDI 1	300-450	15-25	500-800		3 ½" - 5"	4,5-6	>120	150-220
MIDI 2	450-900	35-50	700-1000	>1500	5"	5-9	>200	200-300
MAXI	1000-2500	60-120		>2500	5 ½" - 6 5/8"	>9	>250	300-500
MEGA	>2500	>120		>3500	6 5/8" - 7 5/8"	>9	>300	500-1000

TAB. 1. | Podstawowe parametry urządzeń wiertniczych HDD

FUNKCJE URZĄDZENIA WIERTNICZEGO

Wyłonione na podstawie dotychczasowego doświadczenia lub wskazane na podstawie prac analitycznych urządzenie wiertnicze HDD jest odpowiedzialne zasadniczo za kilka podstawowych funkcji: wprawianie w ruch posuwisty i obrotowy przewodu wiertniczego oraz załączanie do jego wnętrza płynu wiertniczego. Siła działająca wzdłuż osi przewodu wiertniczego jest następstwem prowadzonej akcji wiertniczej. W fazie wiercenia pilotowego przewód jest ściskany i zginany (siła pchania, naporu, nacisku), w fazie poszerzania, kalibracji i instalacji przewód jest na ogół rozciągany i zginany (siła ciągnięcia / siła instalacyjna). Siła osiowa jest zabezpieczana przez urządzenia robocze. Występujący permanentnie lub okresowo ruch obrotowy przewodu wymaga także zabezpieczenia po stronie wiertnicy adekwatnego momentu obrotowego. Z powyższego wynika, że przewód jest także skręcany, a więc pozostaje w bardzo złożonym stanie naprężeń.

Analiza umożliwiająca estymację sił osiowych i momentu obrotowego, generowanych na skutek kontaktu pomiędzy elementami przewodu wiertniczego i narzędziami a ścianą otworu, powinna być przeprowadzona na etapie planowania projektu. Podstawowym źródłem obciążeń jest tarcie wynikające z istnienia siły kontaktowej. Wartość mierzonych sił i momentu obrotowego jest funkcją: masy i geometrii przewodu wiertniczego, zastosowanych narzędzi, parametrów pracy, geometrii i jakości otworu, typu płynu wiertniczego, ilości fazy stałej zawieszanej trwale i zakumulowanej na dnie otworu.

KLUCZOWE PARAMETRY PROCESU

W tab. 2 wskazano na 16 parametrów, które mają wpływ na przebieg robót wiertniczych. Parametry te związane są ściśle z założeniami technicznymi projektu, z zaangażowanym sprzętem, narzędziami wgłębnymi, inżynierią płuczkową i decyzjami wynikającymi z bieżącej oceny sytuacji. Jak wynika z lektury danych zawartych w tabeli, istotność poszczególnych parametrów

może ulegać zmianie i zależy od fazy robót. Oznacza to, że wybór urządzenia jest silnie powiązany nie tylko z potencjalnymi obciążeniami występującymi w fazie instalacji (jak to wynika z lektury wytycznych branżowych), ale powinien uwzględniać pozostałe etapy prac. Wysoki wydatek energetyczny może mieć miejsce także w fazie wiercenia pilotowego (w przypadku otworów o istotnych długościach) lub w fazie poszerzania (w przypadku otworów o dużych średnicach). Ponadto, czas trwania wysokich obciążeń w trakcie tworzenia otworu jest znacząco wyższy niż czas samego procesu instalacji.

Producenci podają kilka parametrów charakteryzujących urządzenia wiertnicze. Rzadko jednak nadmienią, że nie udostępniają parametrów jednocześnie na maksymalnym poziomie. Jeśli wystąpi wysoka siła ciągnięcia, to nie jest dostępny wysoki moment obrotowy. Jeśli chcemy użyć maksymalnego wydatku pompy płuczkowej przy

wysokim ciśnieniu tłoczenia, to uzyskamy go przy limitowanym poziomie sił osiowych i momentu obrotowego. Jeśli wybieramy wysoką prędkość rotacji przewodu, to przy ograniczonym momencie. Wszystko to z racji niezabezpieczenia wymaganej mocy dla wszystkich funkcji urządzenia działających jednocześnie. Zatem, specyfikacje techniczne mówią wiele, ale nie wszystko.

ANALIZA T&D

Przewód wiertniczy o określonym ciężarze spoczywa na dnie otworu. Aby go przesunąć w dół lub w górę otworu, należy przyłożyć siłę większą niż charakterystyczna dla danych warunków otworowych siła tarcia (*DRAG*). Z kolei moment obrotowy przewodu wiertniczego można zdefiniować jako siłę obrotową (*TORQUE*), wymaganą do pokonania wszystkich sił tarcia między kolumną przewodu wiertniczego a formacją podczas jego rotacji w otworze. Dla uzyskania postę-

Faza projektu	Wiercenie pilotowe	Poszerzanie otworu	Instalacja rurociągu
Krytyczne parametry procesu wiertniczego	Stopień istotności		
Parametry trajektorii	***	**	**
Formacja geologiczna	***	***	**
Siła ciągnięcia	*	**	***
Siła pchania	**	**	*
Moment obrotowy	***	***	*
Geometria przewodu wiertniczego	***	** (PULL) *** (PUSH)	**
Geometria narzędzia	**	***	**
Typ narzędzia	***	***	*
Stabilizacja narzędzi w otworze	**	***	**
Wydatek pompy płuczkowej	**	***	*
Spadek ciśnienia w dyszach narzędzia	***	**	*
Przepustowość obiegu płuczkowego	**	***	*
Kompozycja płynu wiertniczego	***	***	**
Parametry płynu wiertniczego	***	***	**
Obroty przewodu wiertniczego	**	***	*
Obroty narzędzia	***	***	*
Rejestracja i analiza danych w czasie rzeczywistym	***	***	***

TAB. 2. | Stopień istotności parametrów procesu w poszczególnych fazach projektu HDD (w skali od * do ***)

pu wiercenia siłę osiową i moment obrotowy, niezbędne do manipulowania przewodem, należy powiększyć o wartość potrzebną do odspojenia (zwiercenia) formacji. Ta składowa obciążeń jest tym większa, im bardziej skomplikowane jest przewiercane podłoże. Lite skały wymagają znacznie większej energii do ich zwiercenia niż spoiste gliny, a te z kolei są trudniej urabialne niż grunty piaszczyste.

Jednym z głównych wyzwań w wierceniu otworów kierunkowych HDD jest dostarczanie energii z powierzchni, poprzez przewód wiertniczy, do narzędzia. Chodzi tutaj zarówno o energię mechaniczną (nacisk, moment obrotowy), jak i energię hydrauliczną (wynikającą z przyspieszania strugi płuczki w dyszach narzędzia). Lepsza wydajność energetyczna oznacza wyższą wydajność wiercenia. Skuteczność przewodu wiertniczego w dostarczaniu tej energii jest bezpośrednio związana z wielkością tarcia, jakie napotyka rura płuczki od powierzchni terenu do dna otworu. Tarcie to powstaje w wyniku istnienia siły kontaktu między przewodem wiertniczym a ścianą drążonego otworu.

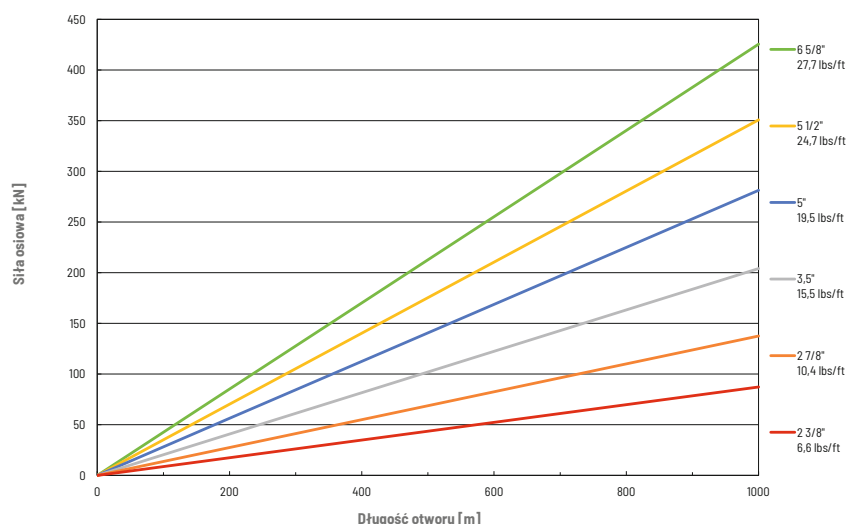
Siła docisku jest tworzona na dwa sposoby. W przypadku gdy przewód wiertniczy jest naprężony (napinany), siła kontaktowa jest wytwarzana przez przeciąganie przewodu wiertniczego przez zakrzywioną trajektorię otworu. Wielkość siły docisku w tym przypadku jest związana z ciężarem przewodu i intensywnością skrzywienia osi otworu. Rzeczywisty ciężar przewodu zanurzonego w płuczce jest pomniejszany o siłę wyporu oraz powiększany o ciężar płuczki pozostającej wewnątrz kolumny przewodu. W obszarach, w których przewód wiertniczy jest ściskany, wybozczenie przewodu wiertniczego powoduje zwiększenie siły docisku do ściany.

Podczas wiercenia otworów pilotowych często występuje trudność w utrzymaniu zadanego kierunku i inklinacji. Niemożność stworzenia gładkiej trajektorii może generować znaczną dotkliwość w postaci dużych sił kontaktowych między zwornikiem rury płuczki a ścianą. Te wysokie siły skutkują znacznym momentem obrotowym, oporem i potencjalnie niestatecznością ściany otworu. Otwory HDD wymagają wier-

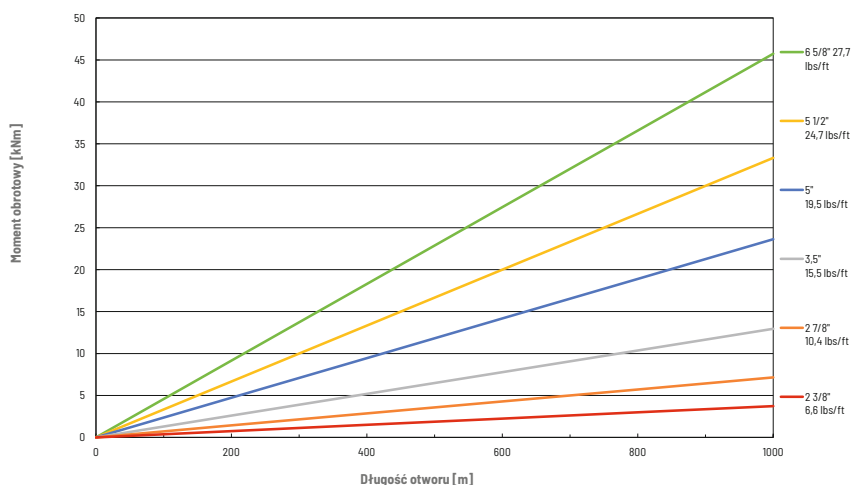
cenia niektórych sekcji z dużą intensywnością zmian kątowych na jednostkę długości otworu. Dzieje się tak w sekcjach łuków pionowych i poziomych, co skutkuje wyższym tarcie niż na odcinkach prostych. Z powyższego można wyprowadzić wniosek, że im mniejsza suma zmian kątowych w otworze i większe promienie zastosowanych krzywizn, tym niższe tarcie jednostkowe.

Tarcie pomiędzy dwiema powierzchniami jest determinowane przez niestabilizowany współczynnik tarcia μ . Ten współczynnik kalkulowany jest na styku dwóch powierzchni i zależy w znacznym stopniu od rodzaju używanej płuczki wiertniczej. Płyn wiertni-

czy o wyższej smarności i niskiej zawartości fazy stałej spowoduje niższy współczynnik tarcia μ . Z kolei płyn wiertniczy o niższej smarności i wysokiej koncentracji zwiercin spowoduje wyższy współczynnik. W rzeczywistych projektach typowa wartość współczynnika μ na kontakcie pomiędzy przewodem wiertniczym a ścianą otwartego otworu pozostaje zwykle w przedziale od 0,3 do 0,6. Niestabilna ściana otworu, pozostawione w otworze zwierciny prowadzą do wzrostu współczynnika tarcia, a co za tym idzie do wzrostu obciążeń rejestrowanych na przewodzie. Manipulacja współczynnikiem tarcia jest możliwa poprzez osiągnięcie wymaga-



RYS. 1. | Wartość siły osiowej potrzebnej do przesuwania przewodu wiertniczego metodą ciągnąc bez rotacji w funkcji geometrii przewodu wiertniczego dla $\mu=1$



RYS. 2. | Wartość momentu obrotowego potrzebnego do rotacji przewodu wiertniczego w funkcji geometrii przewodu wiertniczego dla $\mu=1$

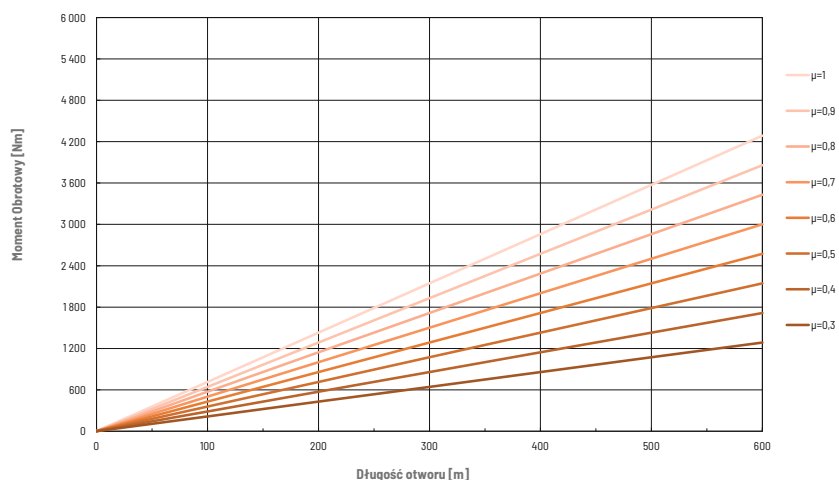
nego poziomu jakości otworu, a także (choć w mniejszym stopniu) poprzez obróbkę chemiczną płuczki.

Na etapie wiercenia pilotowego i podczas niektórych operacji poszerzania w trybie PUSH (pchając narzędzie) należy wziąć pod uwagę nieuchronny efekt wyboczenia. Jak wynika z obserwacji realnych projektów, wyboczenie zaczyna się przy przekroczeniu krytycznej siły naporu, będącej funkcją geometrii przewodu (średnica, grubość ścianki rury) i geometrii otworu (średnica, inklinacja). Wyboczenie reprezentuje zjawisko szkodliwe, które zmniejsza wydajność wiercenia poprzez zwiększenie momentu obrotowego, oporu, poziomu vibracji, przy jednoczesnym zmniejszeniu postępu i skuteczności wiercenia. Wraz ze wzrostem wyboczenia większość energii przyłożonej do przewodu na powierzchni jest tracona na tarcie przed dotarciem do narzędzia.

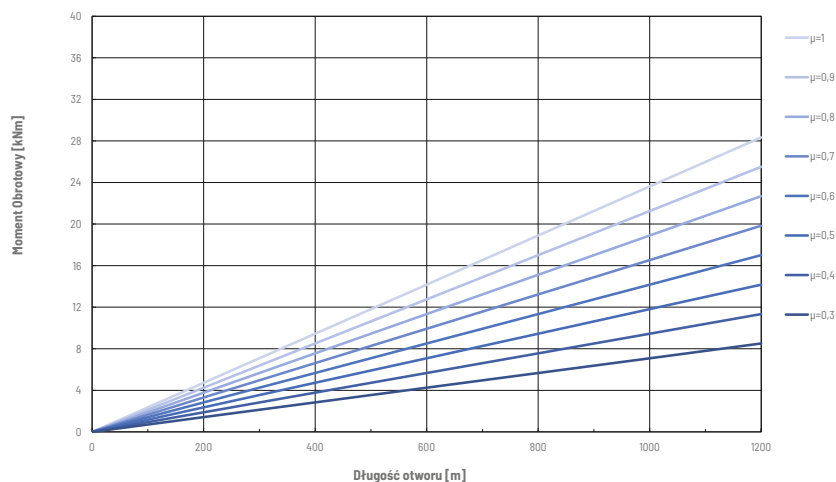
Wynik analizy T&D jest kluczowy z punktu widzenia prawidłowego doboru urządzenia wiertniczego. Urządzenia kompaktowe klasy MINI i MIDI wykorzystują najczęściej przewód wiertniczy o zdefiniowanej przez producenta średnicy i ciężarze jednostkowym. Urządzenia pełnowymiarowe klasy MAXI i MEGA mogą stosować wymiennie różne średnice przewodów, dostosowując je do specyfikacji aktualnego projektu.

Geometria przewodu determinuje minimalne promienie krzywizny, w jakich może on bezpiecznie funkcjonować (tab. 1). Geometria przewodu determinuje także maksymalny zasięg wiercenia, jaki można potencjalnie uzyskać. Im większa średnica przewodu, im większa grubość ścianki, im większa średnica zwrnika – tym większa jest sztywność kolumny przewodu. Konsekwencją takiego rozumowania jest możliwość uzyskania większego zasięgu wiercenia za pomocą przewodu o większej średnicy. Jednak skutkiem takiego wyboru jest konieczność desygnowania urządzenia dysponującego większą siłą pchania / ciągnięcia i wyższym momentem obrotowym.

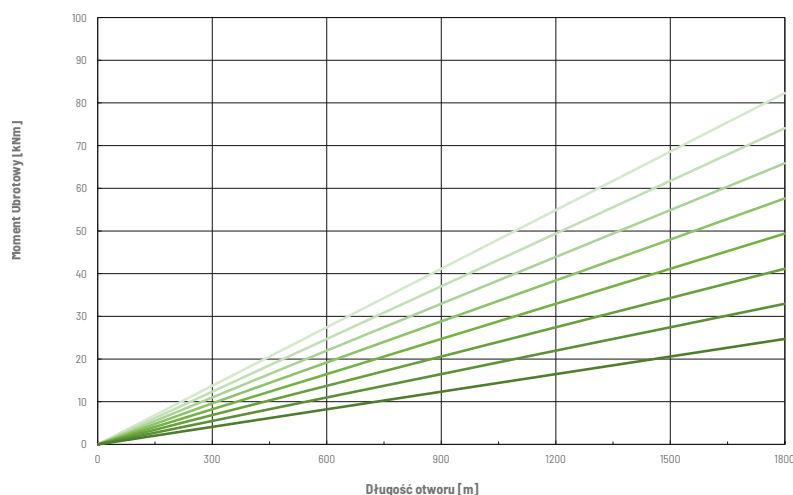
Na rys. 1 pokazano siłę ciągnięcia potrzebną do przesuwania bez rotacji przewodu wiertniczego o określonej geometrii w prostym, horyzontalnym otworze. Wybrano przy tym sześć typowych geometrii przewodu



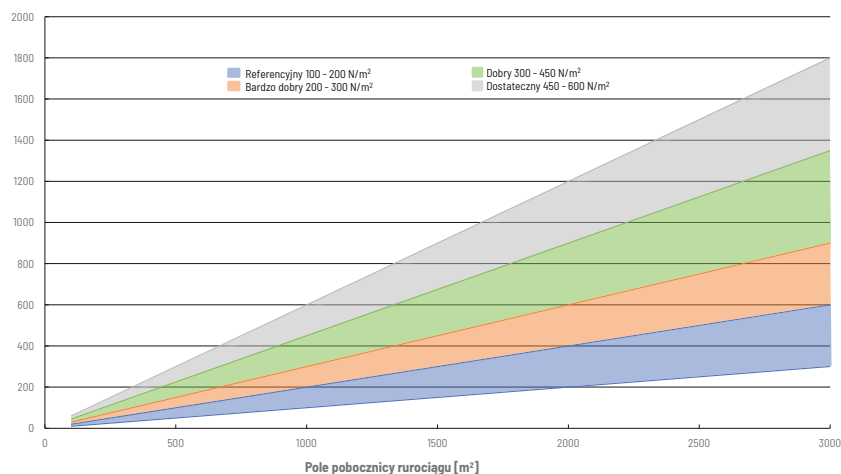
RYŚ. 3.1 Wartość momentu obrotowego generowanego przez przewód wiertniczy o średnicy 2 7/8" (10,4 lbs/ft) w funkcji długości otworu i współczynnika tarcia



RYŚ. 4.1 Wartość momentu obrotowego generowanego przez przewód wiertniczy o średnicy 5" (19,5 lbs/ft) w funkcji długości otworu i współczynnika tarcia



RYŚ. 5.1 Wartość momentu obrotowego generowanego przez przewód wiertniczy o średnicy 6 5/8" (27,7 lbs/ft) w funkcji długości otworu i współczynnika tarcia



RYS. 6. | Rozkład potencjalnych sił instalacyjnych w funkcji pola pobocznicy rurociągu

wiertniczego charakteryzowanych przez średnicę calizny rury płuczkowej i przez jej ciężar jednostkowy. Symulację przeprowadzono przy założeniu wypełnienia otworu płuczką o ciężarze właściwym $1,20 \text{ G/cm}^3$ i wnętrza przewodu płuczką o ciężarze właściwym $1,15 \text{ G/cm}^3$. Siła pchania kolumny przewodu jest wyższa od siły ciągnięcia ze względu na obserwowany efekt wybożenia i generowane dodatkowe tarcie na skutek silnego kontaktu zworników przewodu ze ścianą otworu.

Na rys. 2 pokazano z kolei moment obrotowy wymagany do rotacji przewodu wiertniczego o określonej geometrii w prostym, horyzontalnym otworze. Symulację przeprowadzono dla sześciu zdefiniowanych geometrii przewodu, przy założeniu wypełnienia otworu płuczką o ciężarze właściwym $1,20 \text{ G/cm}^3$ i wnętrza przewodu płuczką o ciężarze właściwym $1,15 \text{ G/cm}^3$. Założony w niniejszej analizie promień obrotu wynosi połowę średnicy zwornika rury płuczkowej.

Zarówno wartość sił pchania / ciągnięcia, jak i momentu obrotowego wymaganego do manipulacji przewodem wiertniczym, jest silnie powiązana (w zależności liniowej) ze współczynnikiem tarcia. Jego wartości są niezależne od inklinacji otworu i zależą od krętości otworu, gładkości ściany otworu i smarności płuczki. Jak wspomniano wcześniej, efekt wybożenia wzmacnia moment obrotowy i opór (siłę osiową). Stosuje się zasadę, która uznaje za nieprawidłowy technicznie opór, który staje się większy

niż ciężar kolumny przewodu wiertniczego. Oznacza to w praktyce wystąpienie współczynnika tarcia na poziomie $\mu > 1$.

Rysunki nr 3, 4 i 5 symulują wartość momentu obrotowego dla trzech typowych średnic przewodu wiertniczego stosowanego w technice HDD. Zakres współczynnika tarcia został wybrany z przedziału od 0,3 do 1. W ujęciu fizycznym współczynnik tarcia jest bezwymiarową wartością skalarną, która opisuje stosunek sił tarcia pomiędzy dwoma ciałami (obiektami). Im wyższy współczynnik tarcia, tym większa siła opiera się ruchowi obiektu. Jednak w praktyce wiertniczej współczynnik tarcia jest znacznie bardziej skomplikowany. Obejmuje on wszelkie niepewności i niedoskonałości w otworze.

Wyliczony analitycznie lub ustalony za pomocą diagramów moment obrotowy *off bottom*, wynikający z wykorzystania przewodu o określonej geometrii i długości, należy powiększyć o moment będący rezultatem akcji wiertniczej narzędzia na spodzie otworu. Moment obrotowy wymagany do pracy narzędzia jest pochodną po średnicy narzędzia, nacisku na formację oraz parametrów jego konstrukcyjnych (stopnia agresywności). Dostęp do wymaganego momentu obrotowego na narzędziu determinuje postęp wiercenia w formacjach wymagających akcji mechanicznej. Całkowity moment obrotowy mierzony na powierzchni składa się z kilku komponentów. Ich wyodrębnienie i zrozumienie, w jaki sposób moment obrotowy narasta w otworze, jest jednym z podstawo-

wych elementów procedury zarządzania projektem wiertniczym. Właściwe modelowanie pozwala nie tylko dobrać do zaprojektowanej trajektorii otworu najlepszą konfigurację: urządzenie wiertnicze – geometria przewodu. Pozwala też wykonać projekt w pożądanym zakresie ekonomicznym, przy dopuszczalnym poziomie ryzyka.

POTENCJALNE OBCIĄŻENIA INSTALACYJNE

Analiza spodziewanych sił instalacyjnych dla danego projektu jest punktem wyjściowym dla doboru odpowiedniego sprzętu wiertniczego. Warunkiem koniecznym, chociaż niewystarczającym, jest sprawdzenie czy wiertnica z osprzętem będzie w stanie dostarczyć siłę (moc) wystarczającą do bezpiecznej instalacji rurociągu? Skuteczna siła instalacyjna musi być większa od tarcia wynikającego z interakcji zestawu wiertniczego i rurociągu ze ścianą otworu. Szacowanie sił instalacyjnych – podobnie jak szacowanie obciążeń przewodu – można wykonać, stosując model fizyczny bazujący na sile kontaktowej, współczynniku tarcia i współczynnikach korygujących związanych z parametrami trajektorii otworu. Zalecane jest przy takim podejściu zastosowanie współczynnika bezpieczeństwa nie mniejszego niż 1,5. Każdorazowo należy poszukiwać rozwiązań wariantowych obniżających spodziewany zakres sił instalacyjnych. Korzystne efekty przynosi balastowanie rurociągów wodą lub szlamem wiertniczym. Wybór metody balastowania jest uzależniony od typu materiału, geometrii rurociągu i warunków otworowych. Bazując na danych pozyskanych w trakcie realizacji rzeczywistych projektów, można postawić tezę, że jednostkowa końcowa siła instalacyjna, kalkulowana jako iloraz siły mierzonej na urządzeniu wiertniczym do pola pobocznicy rurociągu, będzie pozostawać w zakresie od 100 do 500 N/m^2 .

Na rys. 7 wskazano cztery obszary wynikające z instalacji rurociągów metodą HDD. Obszar niebieski reprezentuje wyniki referencyjne mieszczące się w przedziale od 100 do 200 N/m^2 pola powierzchni bocznej rurociągu. Obszar pomarańczowy reprezentuje wyniki bardzo dobre z zakresu od 200 do 300 N/m^2 .

Czas trwania wysokich obciążeń w trakcie tworzenia otworu jest znacząco wyższy niż czas samego procesu instalacji.



Obszar zielony reprezentuje wyniki uznane za dobre z zakresu od 300 do 450 N/m². Obszar w kolorze szarym oznacza wyniki dostateczne (dopuszczalne), które zawierają się w przedziale od 450 do 600 N/m².

Z wykresu możemy korzystać w następujący sposób:

- zakładamy pole poboczniczy rurociągu na poziomie 1500 m² (700 m@DN700) i spodziewany poziom obciążenia 300 N/m² (wynik bardzo dobry) - wyznaczamy graficznie końcową siłę instalacyjną wynoszącą 450 kN;
- dysponując maksymalną siłą 600 kN możemy wykonać instalację rury o poboczniczy od około 1000 m² (1000 m@DN300) zakładając dostateczny poziom jakości do blisko 3000 m² (900 m@DN1000) zakładając referencyjny poziom jakości;
- do instalacji wielkośrednicowych rurociągów DN1200-1400 na dystansie powyżej 1000 m powinniśmy zabezpieczyć siłę powyżej 1500 kN.

PROJEKTY NIESTANDARDOWE

Analiza T&D jest uważana za czynnik określający poziom ryzyka dla danego projektu. Jest z nią ściśle związana zdolność do wywiercenia otworu o zadanej geometrii. Modelowanie T&D jest wymagane w planowaniu długich i bardzo długich otworów, ponieważ pomaga przewidywać i zapobiegać problemom związanym z procesem wiertniczym.

Projektowanie (planowanie) otworu wiertniczego o zwiększonym zasięgu (wykraczającym poza dotychczasowe doświadczenia lokalnego rynku) powinno objąć:

- szczegółowe rozpoznanie warunków geologicznych ujęte w Dokumentacji Geologicznej;
- ustalenie optymalnej trajektorii bazującej

na zasadzie minimalnych obciążeń mechanicznych;

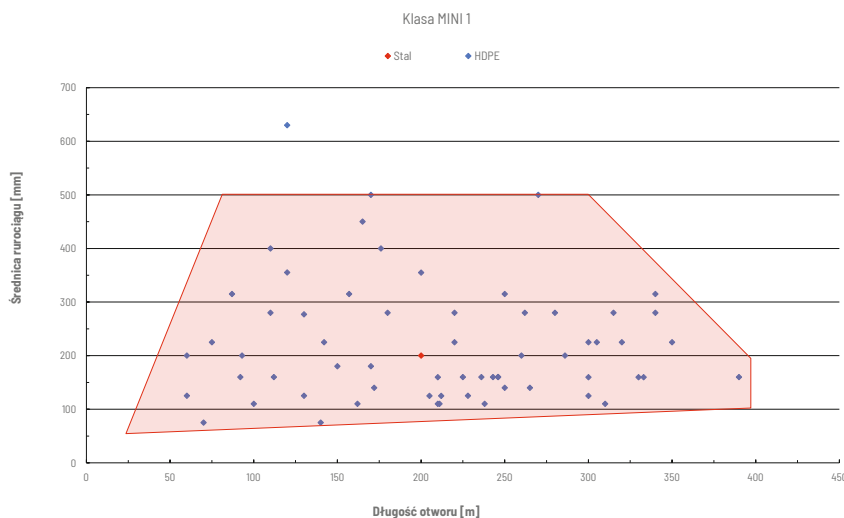
- zapewnienie bezpiecznej równowagi ciśnień pomiędzy ciśnieniem dennym a ciśnieniem dopuszczalnym, wynikającym z jakości nadległych warstw;
- selekcja systemu nawigacji zapewniającego wymaganą dokładność pomiaru i zasięg głębokościowy;
- określenie przewidywanych obciążeń kolumny przewodu;
- wybór techniki wiercenia;
- krytyczny dobór elementów przewodu wiertniczego;
- dobór typu i średnicy narzędzia;
- weryfikację stanu technicznego każdego elementu przewodu;
- ustalanie limitów operacyjnych wiertnicy HDD;
- zaprogramowanie parametrów płynu wiertniczego;
- ustalenie parametrów hydrauliki otworowej;
- określenie maksymalnego poziomu fazy stałej w cyrkulującej płuczce;
- określenie minimalnego akceptowalnego

postępu wiercenia;

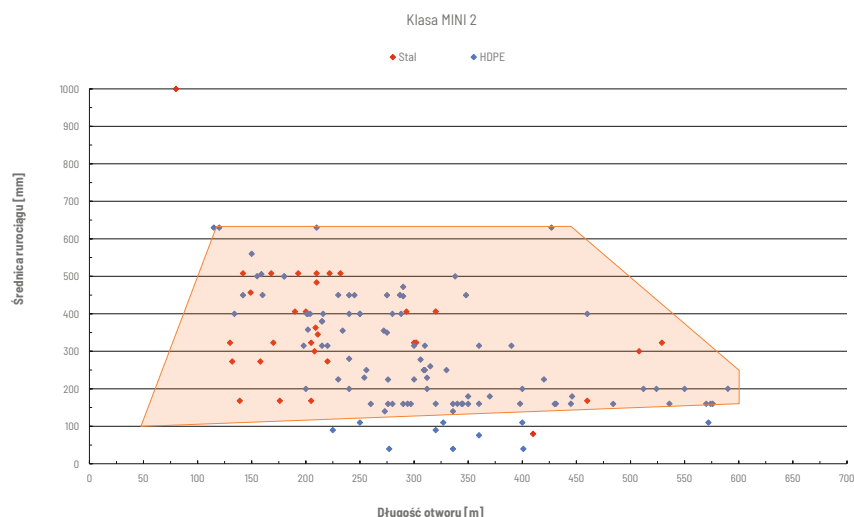
- wybór modelu oceny jakości wierzonego otworu;
- ustalenie sposobu monitorowania procesu.

Podczas planowania skomplikowanej trajektorii otworu skupiamy się na momencie obrotowym i oporze, jaki stawia kolumna przewodu. Jeśli parametry te nie są dokładnie oszacowane, przewód wiertniczy może ulec uszkodzeniu. Najważniejszym czynnikiem wpływającym na moment obrotowy i siłę oporu, oprócz warunków geologicznych, jest suma krzywizn (zmian kątowych) rejestrowanych w trakcie wiercenia otworu. Jeśli przewód wiertniczy w wyniku symulacji procesu wiercenia wydaje się zagrożony, trajektorię należy przeprojektować, korzystając z większych promieni lokalnych krzywizn, tym samym redukując parametr DLS.

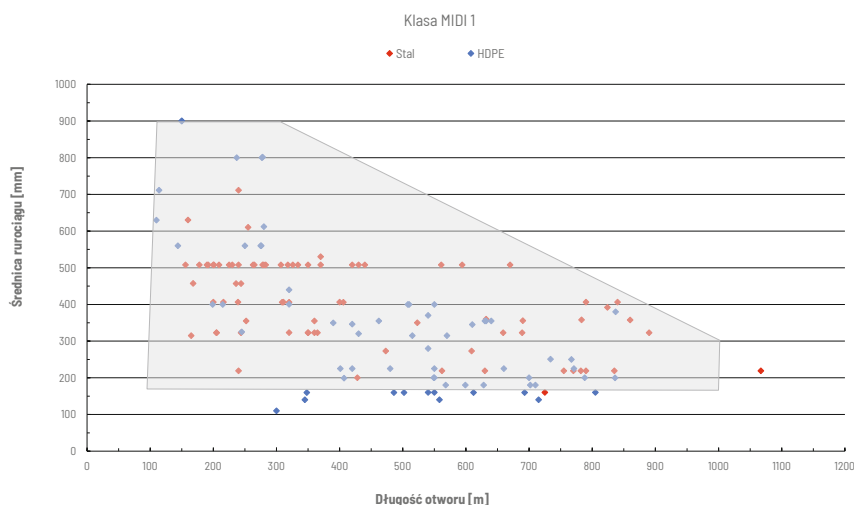
Istnieje wiele potencjalnych przyczyn nadmiernych obciążeń przewodu. Należą do nich między innymi: ciasny otwór, deformacje ścian (kawernowanie), pęcznienie warstw ilastych, lokalne dysze otworowe (pułapki zakumulowanych zwiercin), wręby, migracja przewodu poza otwór (key hole). Niestabilność otworu to niepożądany przypadek, który występuje, gdy pierwotny rozmiar i kształt otworu nie są dobrze zachowane. Pojawia się wraz z brakiem równowagi między wytrzymałością formacji a naprężeniem w ścianie podczas wiercenia. Często może wynikać ze skutków oddziaływania płuczki wiertniczej, w tym braku kontroli ci-



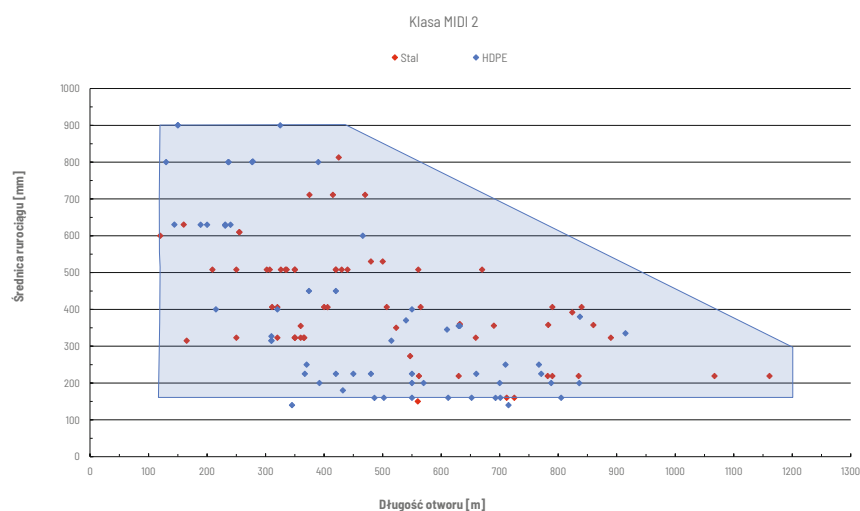
RYS. 7. Rozkład projektów realizowanych przez urządzenie klasy do 150 kN siły ciągnięcia



RYS. 8. | Rozkład projektów realizowanych przez urządzenia klasy do 300 kN siły ciągnięcia



RYS. 9. | Rozkład projektów realizowanych przez urządzenia klasy do 450 kN siły ciągnięcia



RYS. 10. | Rozkład projektów realizowanych przez urządzenia klasy do 900 kN siły ciągnięcia

śnień węglanych.

Na etapie selekcji urządzeń wiertniczych desygnowanych do realizacji skomplikowanych projektów powinno się zakładać większy zapas bezpieczeństwa wobec wymaganych minimalnych parametrów systemu wiertniczego. Przewód wiertniczy – wykorzystywany w takich projektach – powinien być nowy lub posiadać certyfikaty potwierdzające aktualny stan techniczny zgodnie z wymaganiami przemysłu wiertniczego.

ANALIZA STATYSTYCZNA

W niniejszym rozdziale zaprezentowano w formie graficznej rozkłady projektów HDD w Polsce (konfiguracja długość x średnica rurociągu) z podziałem na sześć wyodrębnionych klas urządzeń wiertniczych. Zastosowano przy tym zasadę, że na grafice dotyczącej danej klasy znajdują się też najlepsze rezultaty osiągnięte przez mniejsze urządzenia. Źródłem wyników jest baza projektów opracowana przez ROE, licząca obecnie ponad 600 pozycji.

Na rys. 7 wskazano kolorem czerwonym obszar typowych aplikacji najmniejszych urządzeń. Potencjalna długość otworu wynosi około 300–400 m, choć w praktyce maszyny tej klasy realizują przewierthy na dystansie do 200 m. Maksymalne średnice rurociągów, zainstalowanych w trakcie historycznych projektów, mieszczą się w przedziale od 400 do 500 mm. Liczba projektów wziętych pod uwagę wynosi 64. Są to w zasadzie wyłącznie projekty, w których instalowano rurociągi z HDPE.

Na rys. 8 wskazano kolorem pomarańczowym obszar zastosowania urządzeń segmentu MINI 2. Potencjalna długość wierconego otworu przekracza w tej klasie 500 m, maksymalne średnice rurociągów wykonanych z HDPE mieszczą się w przedziale od 500 do 630 mm. Rurociągi stalowe spotykane tutaj pozostają w zakresie średnic od 160 do 500 mm. Liczba projektów poddanych analizie wynosi 137. Kształt zakreślonego obszaru jest stosunkowo podobny do ustalonego dla klasy MINI 1.

Na rys. 9 wskazano kolorem szarym obszar zastosowania urządzeń segmentu MIDI 1. Potencjalna długość wierconego otworu

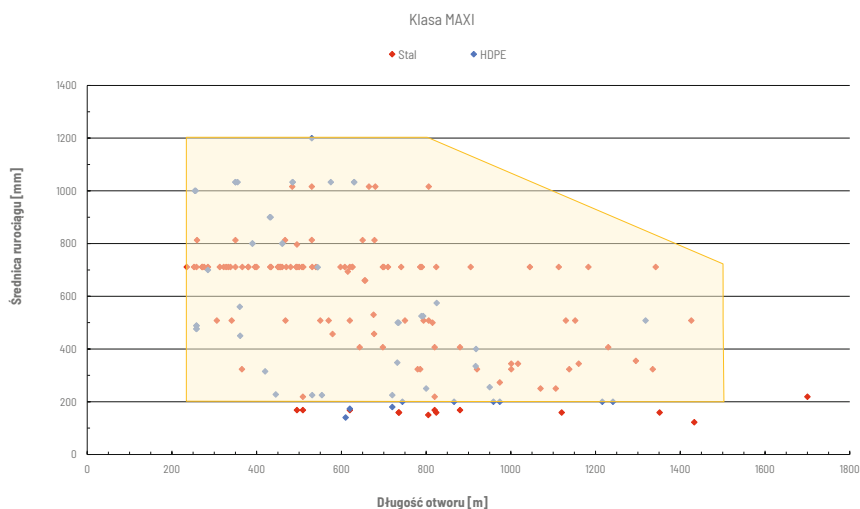
osiąga w tej klasie około 900 m, maksymalne średnice rurociągów wykonanych z HDPE mieszczą się w przedziale od 630 do 800 mm. Rurociągi stalowe spotykane są tutaj w zakresie od 200 do 500 mm. Liczba projektów wziętych pod uwagę wynosi 141.

Wyższa klasa MIDI to stosunkowo uniwersalna, choć w nikłym stopniu reprezentowana obecnie w Polsce. Szacuje się, że maksymalna średnica rurociągu z polietylenu wynosi dla niej 900 mm, a rozmiar rurociągu stalowego limitowany jest do około 700 mm. Urządzenia z tego segmentu instalują także rury żeliwne i hybrydowe. W przypadku dobrze skonfigurowanego osprzętu możliwe są instalacje o długości powyżej 1 km. Liczba zareportowanych projektów to 119, w tym wiele wykonanych maszynami 400 i 450 kN, a więc należącymi do niższej klasy.

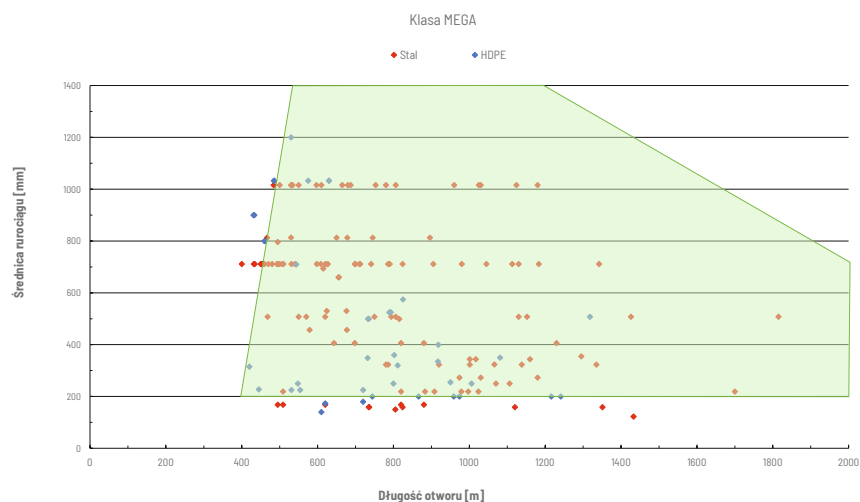
Urządzenia klasy MAXI są odpowiedzialne za większość najważniejszych instalacji rur stalowych w Polsce. Zasięg wiercenia pojedynczym urządzeniem został określony tutaj na około 1500 m. Jest to idealny sprzęt dedykowany rurociągom z zakresu średnic od DN700 do DN1000, możliwe wydają się także instalacje rur o średnicy 1200 mm na dystansach do około 800 m. Liczba zareportowanych projektów to 166. Zdecydowana większość dotyczy instalacji rurociągów stalowych w szerokim spektrum średnic.

Na rys. 12 zaprezentowano kolorem zielonym obszar potencjalnego wykorzystania maszyn o największych możliwościach mechanicznych. Sprzęt tej klasy predestynowany jest do wykonywania bardzo długich instalacji (powyżej 1500 m). Zakres potencjalnych wielkość średnicowych aplikacji sięga rurociągów o średnicy 1400 mm. Ze 163 projektów, zaprezentowanych na rys. 12, 33 odpowiada maszynom o sile ciągnięcia od 3000 do 5000 kN, pozostałe przypadki zostały zaczerpnięte z segmentu MAXI. Zakłada się bowiem, że sprzęt operujący tą samą średnicą przewodu wiertniczego jest w stanie realizować podobne geometrie otworów, będąc ograniczony jedynie dostępnym momentem, siłą naporu i efektem wybooczenia ściskanego przewodu wiertniczego.

Obwiednia wyników rzeczywistych przyjmuje dla wszystkich klas urządzeń kształt zbliżony do trapezu. Perspektywa rozsze-



RYS. 11. | Rozkład projektów realizowanych przez urządzenia klasy od 1000 do 2500 kN siły ciągnięcia



RYS. 12. | Rozkład projektów realizowanych przez urządzenia klasy MEGA

zenia zakresu stosowania w kierunku większych długości i większych średnic napotyka na określone przeszkody natury obiektywnej i subiektywnej. Czynniki obiektywne odnoszą się głównie do formacji geologicznej. Czynniki subiektywne obejmują parametry wiertnicze, parametry projektowe i określone warunki operacyjne.

LIMITY STOSOWANIA URZĄDZEŃ HDD

Jak wynika z przeprowadzonej w poprzednim rozdziale analizy statystycznej, każdą z wyodrębnionych klas urządzeń można scharakteryzować granicznymi parametrami pracy. Należą do nich bez wątpienia:

potencjalny zasięg wiercenia, maksymalna średnica możliwego do wykonania otworu oraz maksymalna zalecana średnica rurociągu. Rozróżniono przy tym standardowe i złożone (trudne) warunki geologiczne oraz dwa typowe materiały, z jakich prefabrykowane są rurociągi: HDPE i stal. Dane natury empirycznej zawarte w tab. 3 zostały przy okazji skonfrontowane z oficjalnymi danymi producentów urządzeń. Jak się okazało, większość producentów wiertnic uchyla się od udostępnienia tego typu informacji. Głównym powodem, jaki podają, jest brak możliwości odniesienia się do konkretnych warunków zabudowy. Nie brzmi to jednak przekonywująco.

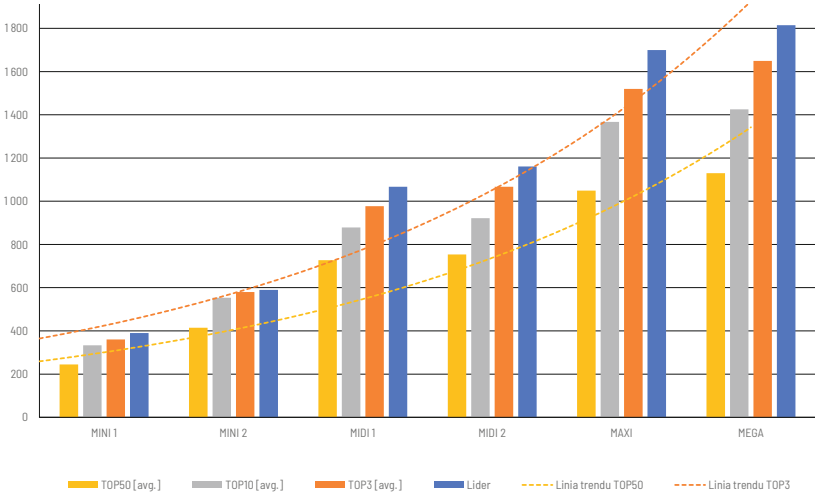
Poniżej zaprezentowano dwa wykresy

Parametr techniczny	Klasa urządzenia wiertniczego					
	MINI 1	MINI 2	MIDI 1	MIDI 2	MAXI	MEGA
Standardowe warunki geologiczne						
Zasięg wiercenia	400 m	600 m	1000 m	1200 m	1800 m	2400 m
Średnica otworu	28"	36"	40"	44"	60"	72"
Złożone (trudne) warunki geologiczne						
Zasięg wiercenia	250 m	400 m	700 m	1000 m	1500 m	2000 m
Średnica otworu	20"	30"	36"	40"	56"	72"
Typowy zasięg głębokościowy						
TVD	< 10 m	5–20 m	10–25 m	15–30 m	20–50 m	30–100 m
Maksymalna średnica dedykowanego rurociągu						
HDPE	500 mm	600 mm	700 mm	800 mm	1200 mm	1400 mm
stal	200 mm	300 mm	500 mm	700 mm	1200 mm	1400 mm

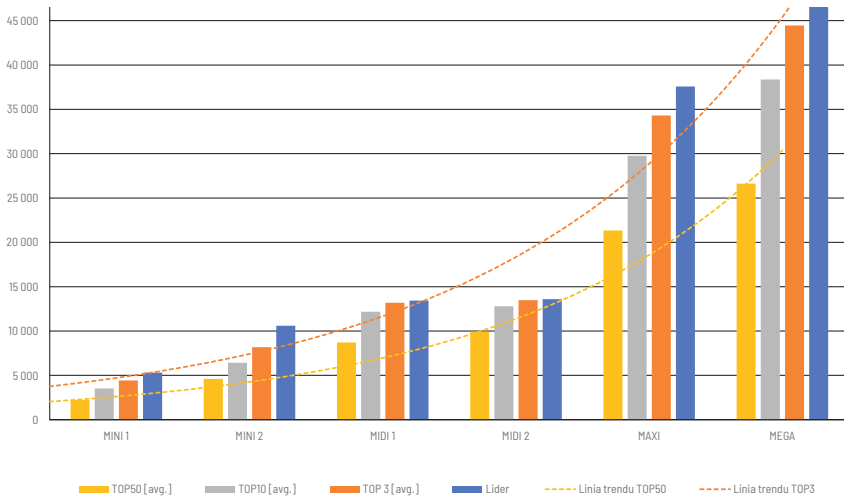
TAB. 3. | Potencjalne zasięgi wiercenia i zdolność do tworzenia otworu o zdefiniowanej średnicy

wskazujące na aktualne osiągnięcia poszczególnych klas urządzeń wiertniczych. Pierwszy wykres dotyczy długości wiercenia (długości instalacji), drugi parametru HDI (iloczynu długości otworu i średnicy rurociągu). Zastosowano przy tym cztery wskaźniki dla każdej klasy: najlepszy wynik (kolor niebieski), średnia z trzech najlepszych wyników (kolor pomarańczowy), średnia z dziesięciu najlepszych wyników (kolor szary), średnia z najlepszych pięćdziesięciu wyników (kolor żółty). Poprowadzono dwie linie trendu. Kolorem pomarańczowym oznaczono maksymalny spodziewany zasięg dla danej klasy urządzeń, kolorem żółtym z kolei – typowy zasięg, którego możemy oczekiwać od danej klasy wiertnic.

Z wykresów możemy wywnioskować, że dwie klasy uzyskują wyniki nieco gorsze, niż wynika to z estymacji i obserwacji rynku europejskiego. Są to klasa MIDI 2 (siła ciągnięcia 450–900 kN) oraz klasa MEGA (siła ciągnięcia od 3000 kN wzwyż). Wynika to prawdopodobnie z faktu, że liczba aktywnych urządzeń pozostających w tych zakresach jest stosunkowo niewielka. Brak jest wciąż projektów o ekstremalnych parametrach instalacji ($L > 2000$ m i $HDI > 50\,000$), które potwierdziłyby konieczność wykorzystania najsilniejszych wiertnic. Ponadto brak jest współcześnie aplikacji rurociągów o średnicach z zakresu od 48" do 56". Z kolei kategorie urządzeń MINI,



RYS. 13. | Praktycznie uzyskiwane długości instalacji HDD z podziałem na klasy urządzeń



RYS. 14. | Skala realizowanych projektów wyrażona wskaźnikiem HDI z podziałem na klasy urządzeń

MIDI 1 i MAXI uzyskują wyniki ponadprzeciętne, co świadczy o ich właściwym dopasowaniu do zaprojektowanych dla nich zadań. Najwyższe wyniki kategorii MIDI 1 pochodzą z lat 1995–2010, kiedy to maszyny tej klasy miały dominujący udział w realizacji projektów sektora paliwowego.

łowe planowanie powinno być więc wdrożone. Istotne wydaje się w tym aspekcie kryterium produktywności i niezawodności zaangażowanego sprzętu. Produktywność rozumiana jest tutaj jako zdolność systemu wiertniczego do wytworzenia otworu o określonej objętości w jednostce czasu. Ilość

pojemność wewnętrzna), albo instalacja wymagającego rurociągu. Elementami wspierającymi dobrze skonfigurowane urządzenie wiertnicze będą: adekwatne do skali zadania kompetencje zaangażowanego personelu, wysoka jakość zastosowanego przewodu, optymalnie dobrane narzędzia wgłębnicze

Aby prawidłowo dobrać urządzenie wiertnicze, należy kierować się wynikiem analizy T&D



KRYTERIUM EKONOMICZNE I ORGANIZACYJNE

Poza omówionymi szczegółowo kryteriami wyboru natury projektowej i technologicznej warto zastanowić się także nad czynnikami mającymi wpływ na efektywność ekonomiczną. W tym obszarze należy rozważyć wydajne i efektywne prowadzenie operacji wiertniczych w celu zapewnienia maksymalnych zysków. Zaplanuj projekt, a następnie pracuj zgodnie z planem. Brak dostosowania się do tej zasady może skutkować stratą czasu i pieniędzy. Problemy z realizacją projektów są często wynikiem braku solidnego planowania lub odejścia od planu już po rozpoczęciu robót wiertniczych. Wiele raportowanych problemów wynika z wybrania drogi na skróty, która ma zaoszczędzić czas, a w efekcie powoduje opóźnienia. Opóźnienia równają się straconemu czasowi, co oznacza utratę przychodów.

Jak powyższe uwagi mają się do wyboru wiertnicy HDD? Urządzenie nie powinno być ani za małe, ani wyraźnie za duże w kontekście planowanego projektu. Każdy kontraktor powinien szczegółowo rozpoznać dzienne koszty zaangażowania każdego z elementów systemu wiertniczego. Większa wiertnica oznacza co prawda pewność wykonania zadania (niskie ryzyko operacyjne), ale też wiąże się z większymi kosztami jej wykorzystania. Im droższy zastosowany system wiertniczy, tym bardziej szczegó-

wymaganych jednostek czasu przekłada się na harmonogram i wycenę projektu. Jeśli system wiertniczy tworzy otwór z wystarczającą (zaplanowaną) wydajnością, przy kontrolowanym dziennym poziomie kosztów, kontraktor wiertniczy zarabia. Jeśli wydajność systemu wiertniczego okaże się zbyt niska, zaplanowany harmonogram zostaje przekroczony, a kontraktor wydaje więcej niż zaplanował. Ograniczenie do minimum czasu nieproduktywnego – wynikającego z przyczyn organizacyjnych, logistycznych i sprzętowych – należy do podstawowych zadań spółki wiertniczej.

PODSUMOWANIE

Wybór urządzenia do przedłożonego projektu wydaje się czynnością rutynową. Doświadczone firmy wiertnicze stosunkowo dobrze rozpoznają zagrożenia wynikające z geologii, geometrii przekroczenia czy parametrów rurociągu. Istotnymi pozatechnicznymi czynnikami wpływającymi na wybór mogą być: dostępność urządzenia, koszt jego pozyskania, budżet projektu. W każdym przypadku należy przewidzieć urządzenie charakteryzujące się bezpiecznym zapasem mocy, gwarantujące pełną kontrolę nad pozostającym w otworze przewodem wiertniczym. W zależności od specyfiki projektu najtrudniejszą fazą może okazać się albo wiercenie pilotowe (otwory o dalekim zasięgu), albo poszerzanie otworu (duża

i powiązana z nimi hydraulika otworowa, dokładność systemu nawigacji, minimalizacja nieplanowanych krzywizn w otworze oraz wybór strategii gwarantującej spełnienie krytycznych funkcji płynu wiertniczego. **I**

LITERATURA

- [1] Drilling Contractors Association (DCA): Technical Guidelines. 4th Edition – Aachen 2016
- [2] Drilling Data Handbook: 9th Edition, Houston 2009
- [3] HDD Consortium: Horizontal Directional Drilling. Good Practice Guidelines. 4th Edition 2017
- [4] IADC Drilling Manual: 11th Edition, Houston 2000
- [5] Izba Gospodarcza Gazownictwa: standard techniczny ST-IGG-3301:2021
- [6] Gwóźdź K.: Analiza obciążeń instalacyjnych. VI Konferencja Techniczna ROE 2021
- [7] Osikowicz R.: 30 lat HDD w Polsce. Listy rankingowe. Inżynieria Bezwykopowa 2/2021
- [8] Osikowicz R.: Planowanie i realizacja projektów HDD. Część I – XI. Inżynieria Bezwykopowa 2018–2021
- [9] Osikowicz R.: Optymalizacja procesu wiertniczego na przykładzie projektów HDD – czerwiec 2019
- [10] Raporty technologiczne firmy ROE dla projektów HDD zrealizowanych w latach 2010–2022