

Rafał Wiśniowski\*, Jan Ziaja\*

**ANALIZA SIŁ TARCIA PODCZAS WIERCENIA  
OTWORU PILOTOWEGO  
HORYZONTALNEGO PRZEWIERTU STEROWANEGO\*\***

**1. WSTĘP**

Horyzontalne przewierty sterowane są coraz częściej stosowaną bezwykopową technologią wykonywania podziemnych instalacji rurowych. Osobliwością technologiczną tej metody jest odwiercenie otworu pilotowego według ściśle zaprojektowanej trajektorii, a następnie jedno- lub wielokrotne poszerzenie istniejącego otworu do wymaganej końcowej średnicy. Etap finalny prac to wciągnięcie do istniejącego otworu rury osłonowej.

Jednym z najważniejszych etapów prac, warunkujących pozytywną realizację całej inwestycji, jest odwiercenie otworu pilotowego.

Wielkość siły niezbędnej do realizacji procesu wiercenia określana jest wzorem

$$F_w \quad F_S \quad F_T \quad (1)$$

gdzie:

- $F_w$  – siła potrzebna do realizacji procesu wiercenia otworu pilotowego, N,
- $F_S$  – siła niezbędna do zwiercania ośrodka gruntowego lub skały, N,
- $F_T$  – siła tarcia przewodu wiertniczego o dolną część ściany horyzontalnego przewiertu sterowanego, N.

Wartość siły  $F_S$  zależy od:

- rodzaju ośrodka gruntowego lub skały, ich właściwości fizycznych, chemicznych i parametrów mechanicznych;
- typu narzędzia wierzącego (świder hydromonitorowy, skrzydłowy, gryzowy, diamentowy);
- stosowanej technologii wiercenia (wciskanie, wiercenie obrotowe, udarowe, urabianie hydrauliczne, technologie mieszane).

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Praca powstała w ramach badań statutowych w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii

Siła tarcia przewodu wiertniczego o dolną część ściany horyzontalnego przewiertu sterowanego  $F_S$  jest funkcją:

- trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego;
- ciężaru przewodu wiertniczego;
- wielkości współczynnika tarcia pomiędzy przewodem wiertniczym a ścianą otworu kierunkowego;
- gęstości płuczki wiertniczej oraz jej parametrów reologicznych;
- niestabilności i nierówności ściany otworu;
- stopnia oczyszczania otworu ze zwiercin.

## 2. WYZNACZANIE WARTOŚCI SIŁ TARCIA PRZEWODU WIERTNICZEGO O ŚCIANĘ HORYZONTALNEGO PRZEWIERTU STEROWANEGO

Oporu przemieszczania odcinka kolumny rur (przewodu wiertniczego) w horyzontalnym przewiercie sterowanym są składową wielu czynników:

- sił tarcia, będących skutkiem przestrzennego przebiegu osi otworu kierunkowego oraz ciężaru kolumny rur płuczkowych;
- sił tarcia zależnych od siły docisku przewodu wiertniczego do ściany otworu powstałej w wyniku oddziaływania ciśnień hydrostatycznych i hydrodynamicznych płynu wypełniającego otwór wiertniczy;
- sił tarcia powstałych na skutek nieprawidłowego oczyszczania otworu kierunkowego ze zwiercina w tym: osadzania zwiercin na dolnej części ściany otworu kierunkowego (*Bad cuttings effect*) oraz wytrącania się z płuczki wiertniczej obciążającej ją fazy stałej (efekt Boycotta);
- sił tarcia wynikających z klinowania i wrzynania się zworników rur płuczkowych w ścianę otworu, uzależnionych od rodzaju i parametrów wytrzymałościowych skał wchodzących w skład ściany otworu, lokalnych zmian średnicy (obecność kawern lub przewężeń, związanych z wyciskaniem skał plastycznych) oraz od sztywności kolumny przewodu wiertniczego lub rur okładzinowych.

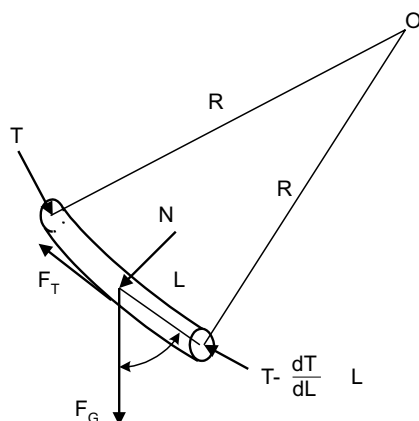
W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano metodykę pozwalającą na oszacowywanie wartości sił tarcia oraz sił osiowych powstających w przemieszczanej w otworze wiertniczym kolumnie rur płuczkowych. Podstawą powyższej metodyki jest założenie, że zmiana sił osiowych jest wprost proporcjonalna do wartości siły bocznej, wynikającej z ciężaru elementu przewodu wiertniczego i przestrzennego jej przebiegu, a miarą proporcjonalności jest nie współczynnik tarcia definiowany klasycznie, lecz współczynnik oporów przemieszczania kolumny rur.

Wartość współczynnika oporów przemieszczania kolumny rur w otworze kierunkowym zależeć będzie:

- od właściwości technologii stosowanej płuczki wiertniczej (gęstości, modelu reologicznego, parametrów reologicznych, parametrów hydraulicznych),
- rodzaju skał oraz ich parametrów fizykomechanicznych,
- różnicy ciśnienia przepływającej płuczki i ciśnienia płynów wypełniających warstwy skalne,
- stopnia oczyszczania otworu kierunkowego ze zwiercin,
- rodzaju i stopnia wybożenia kolumny rur, jej sztywności oraz kierunku przemieszczania.

Współczynnik oporów przemieszczania przewodu wiertniczego w otworze kierunkowym należy interpretować jako ekwiwalentną wartość współczynnika tarcia, uwzględniającego wszystkie dynamiczne zjawiska fizyczne zachodzące podczas przemieszczania kolumny rur w otworze kierunkowym. Metodę jego wyznaczenia przedstawiono w pracy [4].

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład sił działających na element przewodu wiertniczego podczas wiercenia otworu pilotowego horyzontalnego przewiertu sterowanego.



Rys. 1. Rozkład sił działających na ściskany element przewodu wiertniczego

Rozważając zależności przedstawione na rysunku 1 można napisać równanie momentów sił względem punktu O

$$T - \frac{dT}{dL} L R - TR - F_T R - F_G \cos R = 0 \quad (2)$$

Po przekształceniu równanie (2) przyjmuje postać

$$\frac{dT}{dL} L = F_T - F_G \cos \quad (3)$$

Uwzględniając zależności

$$F_T = e N \quad (4)$$

oraz

$$F_G = q L \cos \quad (5)$$

uzyskuje się

$$\frac{dT}{dL} = e \frac{N}{L} - q \cos \quad (6)$$

gdzie:

- kąt odchylenia od pionu elementu przewodu wiertniczego, [°];
- $F_G$  – składowa siły ciężaru elementu przewodu wiertniczego, [N];
- $T$  – osiowa siła ściskająca element przewodu wiertniczego, [N];
- $F_T$  – siła tarcia elementu przewodu wiertniczego o ścianę otworu wiertniczego, [N];
- $q$  – ciężar pierwszego metra przewodu wiertniczego, [N/m];
- $L$  – długość elementu przewodu wiertniczego, [m];
- $R$  – promień krzywizny osi otworu kierunkowego, [m];
- $e$  – ekwiwalentna wartość współczynnika tarcia, [–];
- $N$  – siła boczna, [N].

Wartość siły bocznej należy wyznaczać, rozważając trajektorię otworu kierunkowego w układzie przestrzennym. W każdym punkcie krzywej opisującej przebieg osi otworu kierunkowego określić można jednoznacznie trzy proste wzajemnie prostopadłe (prosta styczna, prosta binormalna, prosta normalna główna) i trzy płaszczyzny wzajemnie prostopadłe (płaszczyzna normalna, płaszczyzna ściśle styczna, płaszczyzna prostująca) tworzące tzw. trójścian Freneta [2, 3].

Wartość siły bocznej wynosi

$$N = \sqrt{\left(T \frac{d}{dL} L - q L \sin^2 \right)^2 + \left(T \sin \frac{d}{dL} L\right)^2} \quad (7)$$

Podczas wiercenia horyzontalnych przewiertów sterowanych wielkościami charakteryzującymi przestrzenne usytuowanie osi otworu są: dodatni lub ujemny kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej ( $\alpha$ ), azymut ( $\beta$ ) oraz długość otworu ( $L$ ).

Wartość i znak kąta odchylenia trajektorii od płaszczyzny poziomej jest ściśle powiązana z wartością kąta odchylenia od pionu  $\alpha$ . Zależność tę opisuje równanie

$$\alpha = -90^\circ \quad (8)$$

Wstawiając równania (4), (5), (6), (7) oraz (8) do wzoru (3) uzyskuje się

$$\frac{dT}{dL} = q \sin \alpha + e \sqrt{\left(T \frac{d}{dL} - q \cos^2 \right)^2 + \left(T \cos \frac{d}{dL}\right)^2} \quad (9)$$

Znając przestrzenny przebieg osi otworu kierunkowego ( $\alpha(L)$ ,  $\beta(L)$ ), ciężar jednego metra rur okładzinowych ( $q(L)$ ) oraz przyjmując wartość współczynnika oporów przemieszczania kolumny rur w otworze kierunkowym ( $e(L)$ ), można określić wartość osiowych sił rozciągających  $T(L)$ , na każdym etapie zapuszczania lub wyciągania kolumny rur. Dla realizacji tego zagadnienia proponuje się rozwiązać numeryczne równanie różniczkowe (9), wykorzystując metodę Rungego–Kuty czwartego rzędu. Podstawy teoretyczne numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych zawarto w pracy [1].

Szukając rozwiązania równania różniczkowego (9) w przedziale  $L \in \langle 0, L_n \rangle$  z warunkiem początkowym  $T_0 = T(L_0) = T(0) = 0$ , należy wyznaczyć wartości funkcji  $T_i$  w poszczególnych krokach iteracji.

W celu wyznaczenia wartości funkcji  $T$  w  $i$ -tym kroku iteracji, równanie (9) przekształca się do postaci

$$T_i - T_{i-1} = \int_{L_{i-1}}^{L_i} f(L, T_i) dL \quad (14)$$

gdzie

$$f(L, T_i) = q \sin \left[ e \sqrt{ T_i \frac{d}{dL} - q \cos^2 T_i \cos \frac{d}{dL} } \right] \quad (15)$$

Wartość całki występującej w równaniu (14) określa się z zależności

$$\int_{L_{i-1}}^{L_i} f(L, T_i) dL = \frac{k_1 - 2k_2 - 2k_3 - k_4}{6} \quad (16)$$

gdzie:

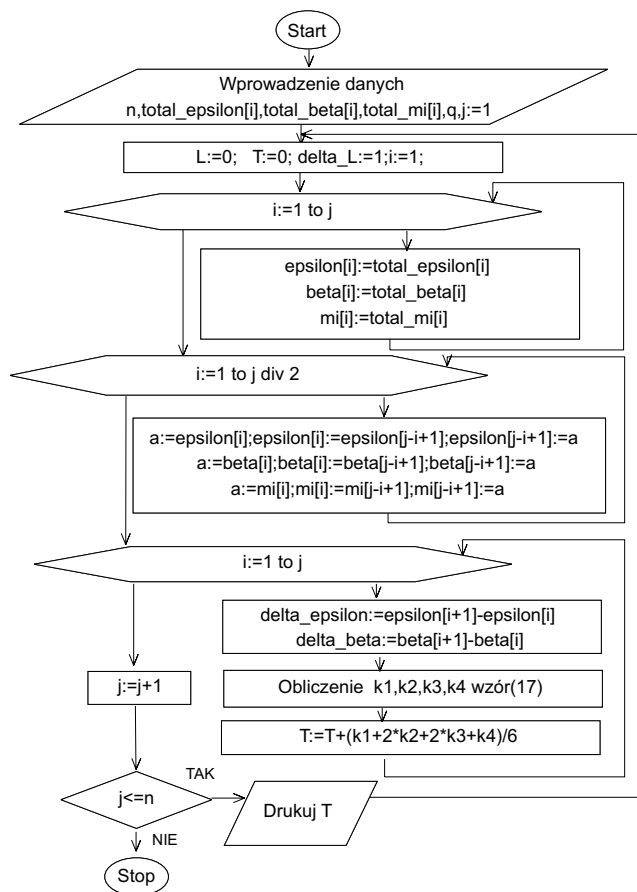
$$\begin{aligned} k_1 &= L f(L_i, T_i) \\ k_2 &= L f(L_i, \frac{1}{2} L, T_i) - \frac{1}{2} k_1 \\ k_3 &= L f(L_i, \frac{1}{2} L, T_1) - \frac{1}{2} k_2 \\ k_4 &= L f(L_i, L, T_i) - k_3 \end{aligned} \quad (17)$$

Algorytm obliczeń siły osiowej w przewodzie wiertniczym przedstawiono na rysunku 2.

Główne punkty proponowanego algorytmu należy scharakteryzować następująco:

1. Po przyjęciu ciężaru jednostkowego ( $q$ ) żerdzi wiertniczych, ilości danych pomiaru trajektorii osi przewiertu sterowanego ( $n$ ), wczytuje się dane pomiarowe trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego licząc od wrzeciona głowicy wiercącej (punktu wejścia) do punktu wyjścia:  $total\_epsilon[i]$ ,  $total\_beta[i]$ ,  $total\_mi[i]$ , gdzie  $i \in [1, n]$ .
2. Następnie ustala się długość otworu od wrzeciona głowicy do narzędzia wierzącego ( $j$ ), i zapisuje wartości lokalnej trajektorii:  $epsilon[i]$ ,  $beta[i]$ ,  $mi[i]$ , gdzie  $i \in [1, j]$ .
3. Odwraca się lokalną trajektorię, dokonując przeliczeń, oznaczając odcinki otworu od narzędzia wierzącego do wrzeciona głowicy.
4. Dla tak przyjętej lokalnej trajektorii oblicza się wartość siły  $T$  niezbędnej do wywarcia przez wrzeciono głowicy wiercącej.
5. Następnie zwiększa się wartość długości otworu ( $j := j + 1$ ) i sprawdza warunek  $j = n$ .

6. W przypadku spełnienia warunku  $j = n$  drukuje się wartość siły osiowej  $T$  odpowiadającej dowierceni horyzontalnego przewiertu sterowanego do głębokości  $j$ , a następnie powtarza się obliczenia od pkt. 2 do pkt. 5.
7. W przypadku niespełnienia warunku  $j = n$  kończy się obliczenia.



Rys. 2. Wyznaczanie wartości siły nacisku niezbędnej na pokonanie oporów tarcia przewiertu wiertniczego o ścianę otworu podczas wiercenia horyzontalnego przewiertu sterowanego

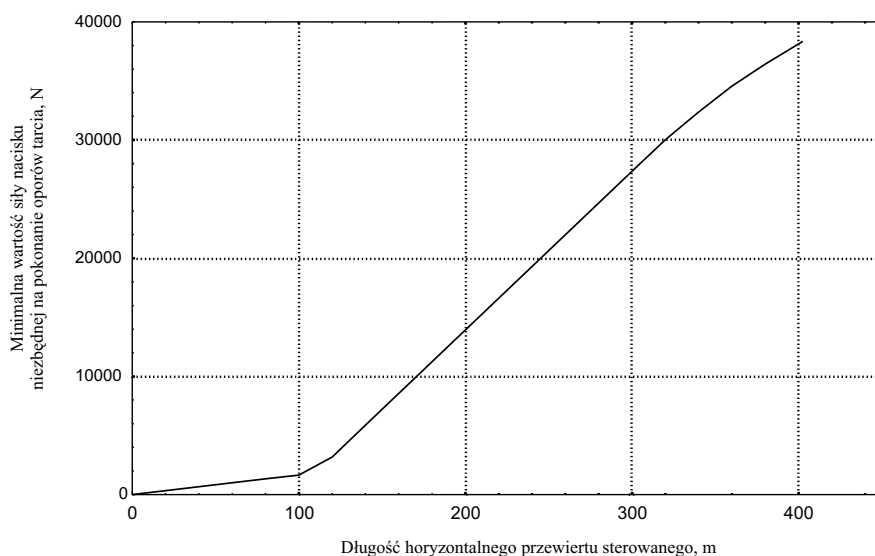
### 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Dla danych zaprojektowanej trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego oraz przewidywanych zmian wartości ekwiwalentnego współczynnika tarcia, zamieszczonych w tabeli 1 dokonano obliczeń minimalnej wartości siły nacisku niezbędnej na pokonanie oporów tarcia przewiertu wiertniczego o ścianę wierzonego otworu. Do obliczeń przyjęto ponadto ciężar pierwszego metra żerdzi wiertniczych  $q = 228,9 \text{ N/m}$ , pomijając wpływ wyporności płuczki na zmianę ciężaru przewiertu wiertniczego. Wyniki obliczeń zestawiono na rysunku 3.

**Tabela 1**

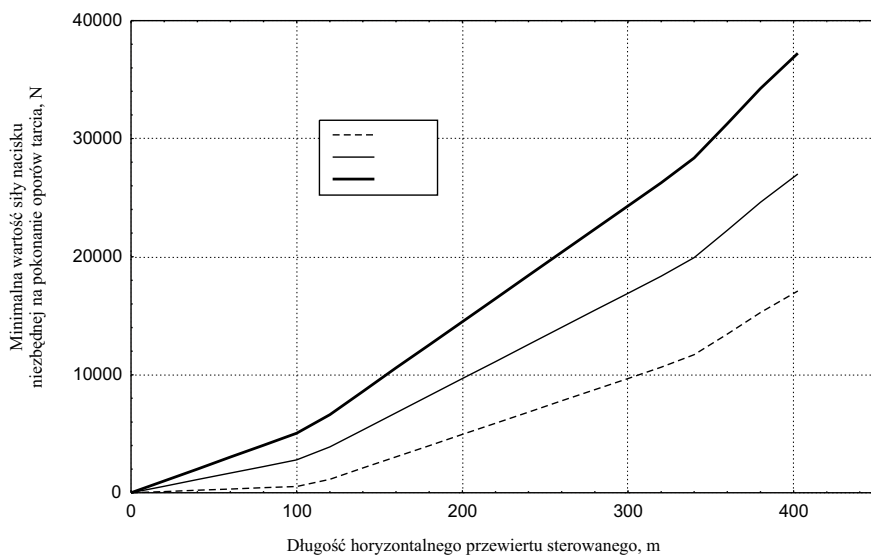
Przestrzenny przebieg osi sterowanego przewiertu horyzontalnego

MD [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	$\varepsilon$ [°]	$\beta$ [°]	$\mu$ [-]
<b>SP:0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-10</b>	<b>30</b>	0,25
20	9,85	17,06	-3,47	-10	30	
40	19,7	34,11	-6,95	-10	30	
60	29,54	51,17	-10,42	-10	30	
80	39,39	68,23	-13,89	-10	30	
<b>KOP1:100</b>	<b>49,24</b>	<b>85,29</b>	<b>-17,36</b>	<b>-10</b>	<b>30</b>	0,35
102	50,23	86,99	-17,69	-8,85	30	
104	51,22	88,71	-17,98	-7,71	30	
106	52,21	90,43	-18,22	-6,56	30	
108	53,2	92,15	-18,43	-5,42	30	
110	54,2	93,88	-18,6	-4,27	30	
112	55,2	95,6	-18,73	-3,12	30	
114	56,2	97,34	-18,82	-1,98	30	
116	57,2	99,07	-18,87	-0,83	30	
<b>HP1:117,45</b>	<b>57,92</b>	<b>100,32</b>	<b>-18,88</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	0,55
120	59,2	102,53	-18,88	0	30	
140	69,2	119,85	-18,88	0	30	
160	79,2	137,17	-18,88	0	30	
180	89,2	154,49	-18,88	0	30	
200	99,2	171,81	-18,88	0	30	
220	109,2	189,13	-18,88	0	30	
240	119,2	206,45	-18,88	0	30	
260	129,2	223,77	-18,88	0	30	
280	139,2	241,09	-18,88	0	30	
300	149,2	258,41	-18,88	0	30	
320	159,2	275,73	-18,88	0	30	
<b>KOP2:331,13</b>	<b>164,76</b>	<b>285,38</b>	<b>-18,88</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	0,35
332	165,2	286,13	-18,88	0,5	30	
334	166,2	287,87	-18,84	1,64	30	
336	167,2	289,6	-18,76	2,79	30	
338	168,2	291,33	-18,64	3,94	30	
340	169,19	293,05	-18,49	5,08	30	
342	170,19	294,78	-18,29	6,23	30	
344	171,18	296,5	-18,05	7,37	30	
346	172,17	298,21	-17,78	8,52	30	
348	173,16	299,92	-17,46	9,67	30	
<b>HP2:348,58</b>	<b>173,45</b>	<b>300,42</b>	<b>-17,36</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	0,20
360	179,07	310,16	-15,38	10	30	
380	188,92	327,21	-11,9	10	30	
400	198,76	344,27	-8,43	10	30	
<b>TP:402,51</b>	<b>200</b>	<b>346,41</b>	<b>-8</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	



**Rys. 3.** Wyniki obliczeń minimalnej wartości siły nacisku niezbędnej na pokonanie oporów tarcia przewodu wiertniczego o ścianę otworu podczas wiercenia horizontalnego przewiertu sterowanego o trajektorii wg tabeli 1

Dodatkowo dokonano symulacji wpływu średniej wartości ekwiwalentnego współczynnika tarcia w otworze wiertniczym na wartość prognozowanych sił (rys. 4).



**Rys. 4.** Wpływ średniej wartości ekwiwalentnego współczynnika tarcia w otworze wiertniczym na wartość prognozowanych sił nacisku niezbędnych na pokonanie oporów tarcia przewodu wiertniczego o ścianę otworu podczas wiercenia horizontalnego przewiertu sterowanego o trajektorii wg tabeli 1



#### 4. PODSUMOWANIE

Opory przemieszczania przewodu wiertniczego w horyzontalnym przewiercie sterowanym są składową wielu czynników. Zależą bowiem od właściwości kolumny rur, technologii stosowanej płuczki wiertniczej (gęstości, modelu reologicznego, parametrów reologicznych, parametrów hydraulicznych), rodzaju skał oraz ich parametrów fizyko mechanicznych, różnicy ciśnienia przepływającej płuczki i ciśnienia płynów wypełniających przewiercane grunty i skały, stopnia oczyszczania otworu kierunkowego ze zwiercin, sztywności, rodzaju i stopnia wyboczenia kolumny rur, oraz kierunku jej przemieszczania w otworze wiertniczym.

Znajomość wielkości sił przemieszczania przewodu wiertniczego podczas wiercenia otworu pilotowego horyzontalnego przewiertu sterowanego pozwala na właściwy dobór urządzenia wiertniczego oraz umożliwia racjonalne zaprojektowanie technologii wiercenia.

W celu prognozy wielkości siły nacisku niezbędnej na pokonanie oporów tarcia przewodu wiertniczego o ścianę otworu należy stosować przedstawione w artykule zależności oraz opracowany algorytm obliczeniowy

#### LITERATURA

- [1] Białas S., Olajosy A.: *Różnicowe metody rozwiązywania równań różniczkowych*. Kraków, Wyd. AGH 1987
- [2] Michell: *Horizontal Drilling*. Michell Box 1492 Golden CO 80402
- [3] Trajdos T.: *Matematyka, cz. III*. Warszawa, WNT 1977
- [4] Wiśniowski R., Ziaja J.: *Metodyka wyznaczania ekwiwalentnej wartości współczynnika tarcia w otworach kierunkowych*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 21/1, 2004