

**Rafał Wiśniowski\*, Stanisław Stryczek\*, Jan Ziaja\***

## **TECHNOLOGIA BALASTOWANIA KOLUMN RUR OSŁONOWYCH WCIĄGANÝCH DO HORYZONTALNYCH PRZEWIERTÓW STEROWANYCH\*\***

### **1. WSTĘP**

Na świecie rokrocznie obserwuje się wzrost inwestycji wykorzystujących technologie bezwykopowe podczas budowy podziemnych instalacji rurowych. Jedną z coraz częściej stosowanych metod jest horyzontalny przewiert sterowany [1]. Istota aplikacji tej technologii polega na wykonaniu otworu pilotowego według ściśle zaprojektowanej trajektorii, a następnie jedno- lub wielokrotne poszerzenie istniejącego otworu do wymaganej końcowej średnicy. Etap końcowy prac to wciągnięcie do istniejącego otworu rury osłonowej.

Najważniejszym z poszczególnych etapów prac, związanych z wykonaniem horyzontalnego przewiertu sterowanego, jest instalacja rury osłonowej. Podczas tego procesu wymagana jest bowiem największa moc urządzenia.

Wielkość siły niezbędnej do instalacji rury osłonowej zależy od:

- trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego;
- ciężaru instalowanej rury osłonowej;
- wielkości współczynnika tarcia pomiędzy wciągany rurą osłonową a ścianą otworu kierunkowego;
- wielkości współczynnika tarcia pomiędzy wciągany rurą osłonową a podłożem, na którym leży zmontowany rurociąg;
- gęstości płuczki wiertniczej, oraz jej parametrów reologicznych;
- niestabilności i nierówności ściany otworu;
- stopnia oczyszczania otworu ze zwiercin.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Pracę wykonano w ramach badań statutowych WwNiG AGH

## 2. ROZKŁAD SIŁ WYSTĘPUJĄCYCH PRZY WCIĄGANIU RURY OSŁONOWEJ

Wielkość siły niezbędnej do realizacji procesu wciągania kolumny rur osłonowych określona jest wzorem:

$$T = T_{pow} + T_{otw} \quad (1)$$

gdzie:

- $T_w$  – siła potrzebna do realizacji procesu wciągnięcia rury osłonowej [N];
- $T_{pow}$  – siła niezbędna do pokonania oporów rurociągu leżącego na powierzchni terenu [N];
- $T_{otw}$  – siła niezbędna do pokonania oporów wewnątrz horyzontalnego przewiertu sterowanego [N].

Siła niezbędna do pokonania oporów rurociągu pomiędzy rurą a podłożem, na którym leży zmontowana kolumna rur osłonowych zależy od jej ułożenia. Rurociąg osłonowy po zmontowaniu (zgrzaniu lub zespawaniu), a przed wciągnięciem do otworu znajdować może się bowiem bezpośrednio na powierzchni terenu lub na rolkach prowadnikowych rozmieszczonych na podłożu gruntowym. Siła ta jest sumą składowej sił ciężkości oraz sił tarcia.

W przypadku gdy rurociąg leży na powierzchni ziemi, siła potrzebna do jego przeciągnięcia wynosi:

$$T_{pow} = q_r \int_0^L \sin \varepsilon_L dl + \mu q_r \int_0^L \cos \varepsilon_L dl \quad (2)$$

gdzie:

- $q_r$  – ciężar jednego metra rurociągu w powietrzu [N/m];
- $\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy instalowaną rurą osłonową a powierzchnią gruntu [-];
- $L$  – długość rurociągu [m];
- $\varepsilon_L$  – średni kąt nachylenia do płaszczyzny poziomej odcinka rurociągu o długości  $dl$  [°].

Gdy rurociąg znajduje się na płaskim terenie wzór (2) przyjmuje postać:

$$T_{pow} = \mu q_r L \quad (3)$$

Stosując natomiast technikę umieszczenia rurociągu na rolkach prowadzących, wartość siły tarcia występującej na rolkach podczas przeciągania kolumny rur osłonowych należy wyznaczać z zależności:

$$T_{pow} = q_r \int_0^L \sin \varepsilon_L dl + \frac{2f}{nd} q_r \int_0^L \cos \varepsilon_L dl \quad (4)$$

gdzie:

- $n$  – liczba rolek podpierających rurociąg [-],
- $f$  – współczynnik tarcia tocznego [m],
- $d$  – średnica pojedynczej rolki [m].

Siłę wciągającą rurociągu na powierzchni można zatem zminimalizować poprzez ułożenie rurociągu na powierzchni pochyłej ( $\varepsilon < 0$ ), a w przypadku umieszczenia go na rolkach poprzez zwiększenie średnicy rolek ( $d$ ) i ich liczby ( $n$ ).

Opory przemieszczania ( $F_{otw}$ ) wciąganej rury osłonowej wewnątrz horyzontalnego przewiertu sterowanego są składową wielu czynników:

- sił tarcia, będących skutkiem przestrzennego przebiegu osi otworu kierunkowego oraz ciężaru kolumny rur osłonowych;
- sił tarcia zależnych od siły docisku wciąganej rury do ściany otworu generowanych 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 cutings effect*) oraz wytrącania się z płuczki wiertniczej obciążającej ją fazy stałej (efekt Boycott'a);
- sił tarcia wynikających z klinowania i wrzynania się rury osłonowej 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 rur okładzinowych.

W Katedrze 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 osłonowych.

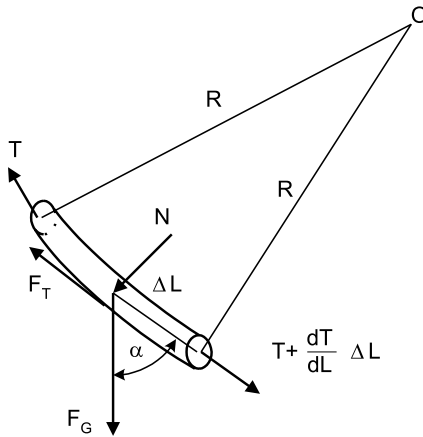
Podstawą powyższej metodyki jest założenie, że zmiana sił osiowych jest wprost proporcjonalna do wartości siły bocznej, wynikającej z ciężaru elementu przewodu wiertniczego i przestrzennego jej przebiegu, a miarą proporcjonalności jest nie współczynnik tarcia definiowany klasycznie, lecz współczynnik oporów przemieszczania kolumny rur.

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

- właściwości technologii stosowanej płuczki wiertniczej (gęstości, modelu reologicznego, parametrów reologicznych, parametrów hydraulicznych),
- rodzaju skał oraz ich parametrów fizykomechanicznych,
- materiału, z którego wykonana jest rura osłonowa,
- różnicy ciśnienia przepływającej płuczki i ciśnienia płynów wypełniających warstwy skalne,
- stopnia oczyszczania otworu kierunkowego ze zwiercin.

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. Metodykę jego wyznaczania przedstawiono w pracy [4].

Na rysunku 1 przedstawiono rozkład sił działających na element rury osłonowej podczas wciągania jej do horyzontalnego przewiertu sterowanego.



**Rys. 1.** Rozkład sił działających na ściskany element wciąganej kolumny rur

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

$$\left(T + \frac{dT}{dL} \Delta L\right) R - TR - F_T R + F_G \cos \alpha R = 0 \quad (5)$$

Po przekształceniu równanie (5) przyjmuje postać:

$$\frac{dT}{dL} \Delta L = -F_G \cos \alpha + F_T \quad (6)$$

Uwzględniając zależności:

$$F_T = \mu_e N \quad (7)$$

oraz:

$$F_G = q \Delta L \cos \alpha \quad (8)$$

uzyskuje się:

$$\frac{dT}{dL} = -q \cos \alpha + \mu_e \frac{N}{\Delta L} \quad (9)$$

gdzie:

- $\alpha$  – kąt odchylenia od pionu elementu wciąganej kolumny rur [ $^{\circ}$ ];
- $F_G$  – składowa siły ciężaru elementu wciąganej kolumny rur [N];
- $T$  – osiowa siła ściskająca element wciąganej kolumny rur [N];
- $F_T$  – siła tarcia elementu wciąganej kolumny rur o ścianę otworu wiertniczego [N];

$q$  – ciężar pierwszego metra instalowanej rury lub przewodu wiertniczego użytego do jej wciągania wyznaczany z uwzględnieniem sił wyporu [N/m];

$$q = q_r \left( 1 - \frac{\rho_p}{\rho_r} \right) \quad (10)$$

$q_r$  – ciężar pierwszego metra instalowanej rury lub przewodu wiertniczego użytego do jej wciągania wyznaczany w powietrzu [N/m];

$\rho_p$  – gęstość płuczki wypełniającej otwór wiertniczy [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_r$  – gęstość materiału, z którego wykonana jest rura okładzinowa lub przewód wiertniczy [kg/m<sup>3</sup>];

$\Delta L$  – długość elementu wciąganej kolumny rur [m];

$R$  – promień krzywizny osi otworu kierunkowego [m];

$\mu_e$  – 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:

$$N = \sqrt{\left( T \frac{d\alpha}{dL} \Delta L - q \Delta L \sin \alpha \right)^2 + \left( T \sin \alpha \frac{d\beta}{dL} \Delta L \right)^2} \quad (11)$$

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

Wartość i znak kąta odchylenia trajektorii od płaszczyzny poziomej  $\varepsilon$  są ściśle powiązane z wartością kąta odchylenia od pionu  $\alpha$ . Zależność tą opisuje równanie:

$$\varepsilon = \alpha - 90^\circ \quad (12)$$

Wstawiając równania (11) oraz (12) do wzoru (9) uzyskuje się:

$$\frac{dT}{dL} = q \sin \varepsilon + \mu_e \sqrt{\left( T \frac{d\varepsilon}{dL} - q \cos \varepsilon \right)^2 + \left( T \cos \varepsilon \frac{d\beta}{dL} \right)^2} \quad (13)$$

Podczas instalacji kolumny rur osłonowych w sterowanym przewiercie horyzontalnym wykorzystuje się przewód wiertniczy oraz przykręcony do niego poszerzacz, krętlik oraz głowicę do wciągania rur. Kolumna rur przymocowana jest do głowicy wciągającej

Znając przestrzenny przebieg osi otworu kierunkowego ( $\epsilon(L)$ ,  $\beta(L)$ ), ciężar jednego metra rur okładzinowych ( $q(L)$ ) oraz przyjmując wartość współczynnika oporów przemieszczania kolumny rur w otworze kierunkowym ( $\mu_e(L)$ ), można określić wartość osiowych sił  $T(L)$ , na każdym etapie wciągania kolumny rur osłonowych.

Wykorzystując wyprowadzone zależności w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH, opracowano metodykę pozwalającą na oszacowywanie sił niezbędnych do wciągnięcia kolumny rur osłonowych do horyzontalnego przewiertu sterowanego.

### 3. TECHNIKA I TECHNOLOGIA BALASTOWANIA KOLUMNY RUR OSŁONOWYCH

Do produkcji rur osłonowych wciąganych do horyzontalnych przewiertów sterowanych wykorzystuje się różne materiały. Do najczęściej stosowanych zaliczyć należy: stal, żeliwo sferoidalne, polietylen (niskiej, średniej i wysokiej gęstości), polipropylen, polichlorek winylu. Zestawienie wartości gęstości materiałów z których wykonywane są kolumny rur osłonowych wciągane do horyzontalnych przewiertów sterowanych podano w tabeli 1.

**Tabela 1**

Wartości gęstości materiałów z których wykonywane są kolumny rur osłonowych

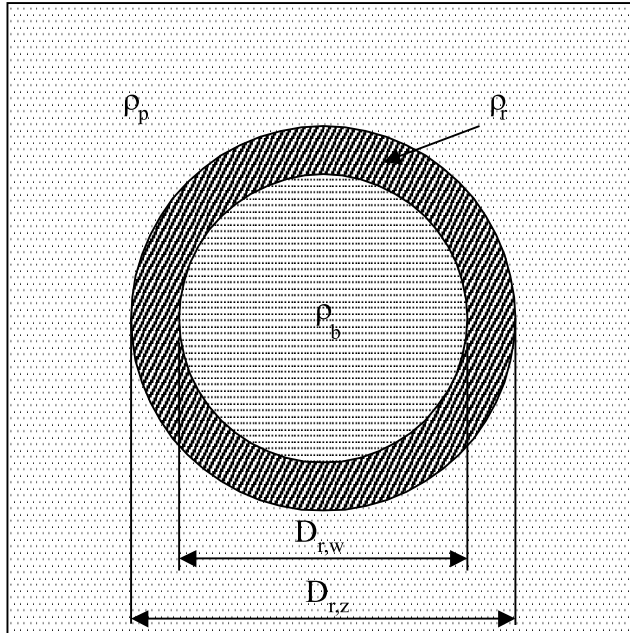
Rodzaj materiału	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
Stal	7700
HDPE	940÷965
MDPE	930÷940
LDPE	< 930
PCV	1380÷1400

W przypadku stosowania rur wykonanych z materiału o mniejszej gęstości niż gęstość płuczki wypełniającej otwór wiertniczy (rury polietylenowe), podczas wciągania kolumna rur trze o górną część ściany otworu (obliczona ze wzoru (10) wartość  $q$  ma znak ujemny).

W celu obniżenia wielkości siły wciągającej celowe jest więc wówczas zwiększenie ciężaru wciąganych rur poprzez wypełnienie ich wnętrza płynem balastującym.

Na rysunku 2 przedstawiono przekrój przez balastowaną kolumnę rur osłonowych

W wyniku przeprowadzenia procesu balastowania kolumny rur osłonowych wnętrze rurociągu wykonanego z materiału o gęstości  $\rho_r$ , wypełnia płyn o gęstości  $\rho_b$  (ciecz balastująca, powietrze), natomiast całość zanurzona jest w obciążonej urobkiem płuczce o gęstości  $\rho_p$ .



**Rys. 2.** Przekrój przez balastowaną kolumnę rur osłonowych zanurzoną w płucze wiertniczej

Optymalną wartość gęstości cieczy balastującej można wyznaczyć analizując rozkład sił działających na kolumnę przedstawioną na rysunku 2. Uwzględniając prawo wyporu uzyskuje się:

$$\rho_b = \rho_p \frac{D_{r,z}^2}{D_{r,w}^2} - \rho_r \left( \frac{D_{r,z}^2}{D_{r,w}^2} - 1 \right) \quad (14)$$

lub:

$$\rho_b = (\rho_p - \rho_r) \frac{D_{r,z}^2}{D_{r,w}^2} + \rho_r \quad (14a)$$

gdzie:

- $\rho_b$  – gęstość cieczy balastującej [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $D_{r,z}$  – średnica zewnętrzna instalowanej kolumny rur [m];
- $D_{r,w}$  – średnica wewnętrzna instalowanej kolumny rur [m].

Proponowana przez autorów artykułu technologia wprowadzania cieczy balastującej do rury osłonowej polega na zatłaczaniu cieczy przez wąż strażacki umieszczony wewnątrz całej instalowanej kolumny rur i przymocowany do pierwszej rury zgrzanej z głowicą wciągającą. Stosując tą technologię stopniowo napełnia się wciągającą do otworu część rurocią-

gu, unikając konieczności napełnienia od początku procesu instalacji całej kolumny rur (niepotrzebnego obciążania części napowierzchniowej).

W trakcie przeprowadzania instalacji kolumny rur osłonowych należy skorelować strumień objętości włączanej cieczy balastującej z prędkością wciągania rur do horyzontalnego przewiertu sterowanego. Minimalną wartość strumienia objętości włączanej cieczy powinno obliczać się ze wzoru:

$$Q = v_{inst} \frac{\pi D_{r,w}^2}{4} \quad (15)$$

Balastując rury o dużych średnicach niezbędne jest więc włączanie do nich dużych objętości cieczy. Stosowana w praktyce sterowanych wierceń horyzontalnych wydajność pomp płuczkowych ( $Q_{max}$ ) może okazać się niewystarczająca przy możliwej do uzyskania prędkości wciągania rury osłonowej ( $v_{inst}$ ).

W takiej sytuacji proponuje się wykorzystywać jedno z dwóch następujących rozwiązań technologicznych:

- 1) ograniczyć prędkość wciągania kolumny rur do wartości:

$$v_{inst} = \frac{4Q_{max}}{\pi D_{r,w}^2} \quad (16)$$

- 2) zmniejszyć przestrzeń tłoczony cieczy balastującej poprzez wprowadzenie do instalowanej rury dodatkowego rurociągu balastującego o maksymalnej wartości średnicy wewnętrznej (rys. 3) określanej wzorem:

$$d_{t,w}^2 = \frac{4Q_{max}}{\pi v_{inst}} \quad (16a)$$

Wprowadzenie dodatkowego rurociągu jest rozwiązaniem korzystniejszym gdyż wymaga zatłoczenia sumarycznie mniejszej objętości cieczy obciążającej. Pozwala również na obniżenie gęstości cieczy balastującej. Wymaganą gęstość cieczy wypełniającej rurociąg balastujący instalowaną kolumnę rur należy wyznaczać z zależności:

$$\rho_b = \rho_p \frac{D_{r,z}^2}{d_{t,w}^2} - \rho_r \left( \frac{D_{r,z}^2 - D_{r,w}^2}{d_{t,w}^2} \right) - \rho_t \left( \frac{d_{t,z}^2}{d_{t,w}^2} - 1 \right) \quad (17)$$

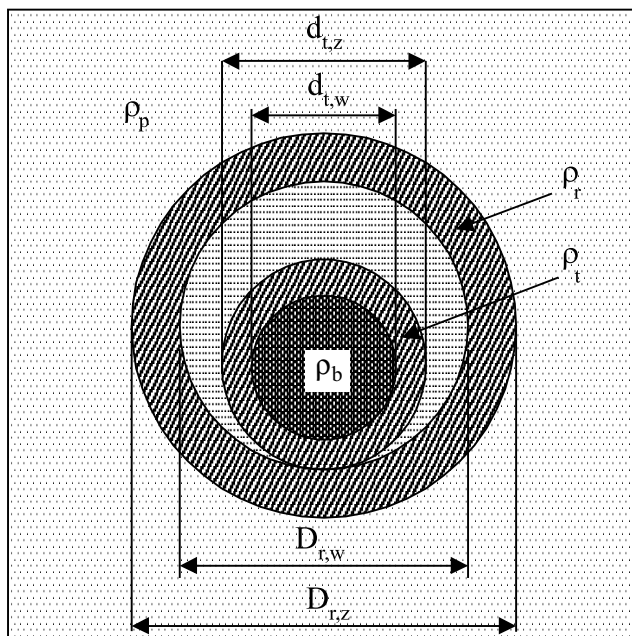
lub:

$$\rho_b = (\rho_p - \rho_r) \frac{D_{r,z}^2}{d_{t,w}^2} + \rho_r \left( \frac{D_{r,w}^2}{d_{t,w}^2} \right) - \rho_t \left( \frac{d_{t,z}^2}{d_{t,w}^2} - 1 \right) \quad (17a)$$

gdzie:

- $\rho_t$  – gęstość materiału, z którego wykonany jest dodatkowy (wewnętrzny) rurociąg balastujący [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $d_{t,z}$  – średnica zewnętrzna dodatkowego rurociągu balastującego [m];
- $d_{t,w}$  – średnica wewnętrzna dodatkowego rurociągu balastującego [m].





Rys. 3. Przekrój przez kolumnę rur osłonowych zanurzoną w płuczce wiertniczej z umieszczonym wewnątrz rurowciągiem balastującym

#### 4. PODSUMOWANIE

Opory przemieszczania wciąganej rury osłonowej do horyzontalnego przewiertu sterowanego są składową dwóch wielkości:

- 1) oporów przemieszczania części instalowanej kolumny, znajdującej się na powierzchni terenu,
- 2) oporów przemieszczania elementu kolumny wewnątrz otworu wypełnionego płuczka wiertniczą.

Sumaryczna wielkość sił tarcia zależy od ciężaru kolumny rur, technologii posadowienia kolumny rur na powierzchni terenu, właściwości stosowanej płuczki wiertniczej (gęstości, modelu reologicznego, parametrów reologicznych), rodzaju i parametrów fizykomechanicznych skał oraz stopnia oczyszczania otworu kierunkowego ze zwiercin.

W celu wyznaczenia sił niezbędnych do wciągnięcia kolumny rur osłonowych do horyzontalnego przewiertu sterowanego należy stosować wyprowadzone w artykule zależności.

Podczas instalacji kolumny rur okładzinowych wykonanej z polietylenu, należy przeprowadzać proces jej balastowania. Obciążania instalowanej kolumny rur powinno się przeprowadzać korelując strumień włączanej cieczy z prędkością wciągania rur. W celu optymalizacji procesu zaleca się stosowanie dodatkowego rurowciągu balastującego, umieszczonego wewnątrz instalowanej rury osłonowej. Wymaganą gęstość cieczy balastującej należy wyznaczać z zależności przedstawionych w artykule.

## LITERATURA

- [1] Willoughby D.: *Horizontal Directional Drilling Utility and Pipeline Applications*. New York, McGraw-Hill 2005
- [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*. *Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH)*, R. 21/1, 2004