

Rafał Wiśniowski*, Stanisław Stryczek*

PROJEKTOWANIE TRAJEKTORII HORYZONTALNEGO PRZEWIERTU STEROWANEGO**

1. WSTĘP

Na potrzeby inżynierii i ochrony środowiska coraz częściej wykorzystuje się horyzontalne przewiertu sterowane. Proces wykonywania sterowanego przewiertu horyzontalnego składa się z następujących etapów technologicznych: wiercenie otworu pilotowego, rozwiercanie powrotne (jedno- lub wielokrotne), instalacja rurociągu.

Wiercenie otworu pilotowego jest najistotniejszą fazą wykonywania otworu. Otwór pilotowy wykonuje się według założonego projektu przebiegu trajektorii. Jako narzędzie urabiające w gruntach i skałach słabo zwięzłych stosuje się asymetryczny świder hydromonitorowy lub świder gryzowy. Sterowanie trajektorią osi wierconego otworu polega na ciągłym lub okresowym pomiarze i weryfikacji położenia sondy znajdującej się w antymagnetycznym łączniku, umieszczonym bezpośrednio za narzędziem wierzącym. Korektę kierunku wiercenia uzyskuje się poprzez obrót żerdzi wiertniczych o kąt odpowiadający oczekiwanej zmianie.

W celu uzyskania przewidywanej końcowej średnicy otwór wiertniczy jest poszerzany jedno- lub wielokrotnie. Po wykonaniu otworu pilotowego w miejsce narzędzia wierzącego do znajdujących się w otworze wiertniczym żerdzi płuczkowych montuje się poszerzacz skrawający lub gryzowy. Wciągając następnie poszerzacz do otworu pilotowego powiększa się średnicę istniejącego otworu wiertniczego.

Ostatnim etapem wykonania sterowanego przewiertu horyzontalnego jest wciągnięcie rury osłonowej. W tym celu do znajdującego się w otworze przewodu wiertniczego dokręca się poszerzacz, łącznik obrotowy oraz głowicę wciągającą z wciąganą rurą. Zadaniem łącznika obrotowego (krętlika) jest zapobieganie przenoszenia obrotów i momentu obrotowego z żerdzi płuczkowych na wciąganą rurę osłonową.

Skuteczność aplikacji technologii HDD uwarunkowana jest poprawnością zaprojektowania i wykonania trajektorii otworu. Projektując przebieg trajektorii horyzontalnego przewiertu

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań własnych WWiG

sterowanego, należy wyznaczyć przestrzenne usytuowanie jej punktów charakterystycznych (początek i koniec krzywienia) oraz parametry odcinków prosto- i krzywoliniowych (długość, kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej, azymut, intensywność skrzywienia). Następnie z zadanym skokiem długości otworu (Δl) powinno się określić współrzędne przestrzenne punktów tworzących oś otworu, lub obliczyć wielkości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej (ε_L) i kąta azymutu (β_L) stycznej do trajektorii w wyznaczanych punktach.

Najczęściej przyjmowanym założeniem projektowym podczas ustalania przebiegu osi horyzontalnego przewiertu sterowanego jest wzajemne usytuowanie punktu końcowego względem początkowego. Założenie to wynika z istniejącej i przyjętej do obliczeń morfologii terenu i sprowadza się do apriorycznego ustalenia wartości przemieszczenia pionowego (H) oraz przemieszczenia poziomego (A) punktu końcowego względem punktu początkowego. Ilość i rodzaj dodatkowych danych projektowych (wielkości kątów wejścia i wyjścia, głębokość przejścia pod przeszkodą terenową, dopuszczalne wartości promieni krzywizny odcinków krzywoliniowych) oraz przyjęty algorytm obliczeń zależą od typu trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego i są pochodną takich czynników jak: warunki geologiczne i hydrogeologiczne, morfologiczne, istniejąca napowierzchniowa i podpowierzchniowa infrastruktura, oraz techniczne i technologiczne możliwości wykonania otworu.

Na podstawie przyjętych danych projektowych podejmuje się decyzję o rodzaju przestrzennego przebiegu trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego. Rozważa się następujące warianty projektowania [6]:

- projektowanie trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni dwuwymiarowej,
- projektowanie trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni trójwymiarowej.

Projektowanie trajektorii otworów kierunkowych w przestrzeni dwuwymiarowej, pozwala na ustalenie przebiegu sterowanego przewiertu horyzontalnego w jednej płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu w następujących alternatywnych odmianach:

- trajektorii będącej kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych,
- trajektorii o przebiegu krzywej łańcuchowej,
- trajektorii będącej nieregularną krzywą.

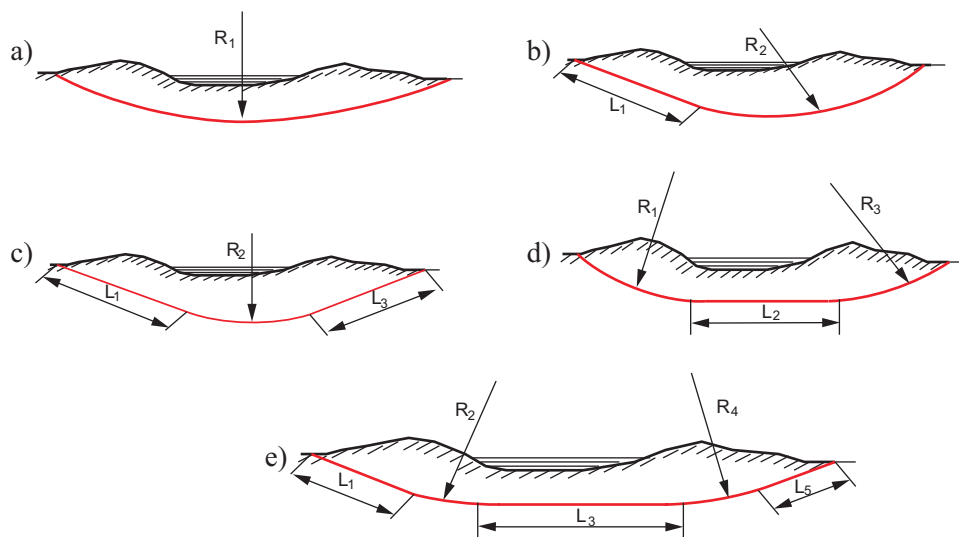
Procedura projektowa przebiegu trajektorii osi otworu kierunkowego w przestrzeni R^3 , umożliwia zaprojektowanie przestrzennie zorientowanej krzywej łączącej wprowadzone punkty docelowe.[4].

2. PODSTAWY MATEMATYCZNE PROJEKTOWANIA TRAJEKTORII BĘDĄCEJ KOMBINACJĄ ODCINKÓW PROSTO- I KRZYWOLINIOWYCH

Dobór rodzaju profilu trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego zależy od techniczno-technologicznych możliwości jego wykonania oraz wyników przeprowadzonej kompleksowej analizy ekonomicznej przedsięwzięcia [1], [2]. Aktualny poziom rozwoju techniki wiertniczej umożliwia wykonywanie otworów kierunkowych, których trajektoria

jest przestrzennie usytuowaną krzywą, jednakże w większości przypadków przebieg osi otworów kierunkowych projektuje się w jednej płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu. Tak zaprojektowana trajektoria osi otworu kierunkowego jest bowiem łatwiejsza i tańsza w wykonaniu [3].

Przebieg osi sterowanego przewiertu horizontalnego można zaprojektować jako odcinek krzywoliniowy o stałym promieniu krzywizny (rys. 1a), lub kombinację odcinków prostoliniowych i krzywoliniowych (rys. 1b–e).



Rys. 1. Profile osi horizontalnych przewiertów sterowanych będące kombinacją odcinków prostoliniowych i krzywoliniowych; a) łuk o stałym promieniu krzywizny; b) odcinek prostoliniowy i łuk o stałym promieniu krzywizny; c) odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy; d) łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy i łuk o stałym promieniu krzywizny; e) odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny, odcinek prostoliniowy, łuk o stałym promieniu krzywizny i odcinek prostoliniowy

Dla wszystkich trajektorii otworów kierunkowych będących kombinacją odcinków prostoliniowych i krzywoliniowych, wykonywanych w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu można wyznaczyć zależności ogólne.

Przyjmując układ odniesienia oraz definiując wielkość i znak kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej stycznej do trajektorii osi otworu wiertniczego (rys. 2) ustala się:

- przemieszczenie pionowe punktu końcowego względem punktu początkowego sterowanego przewiertu horizontalnego:

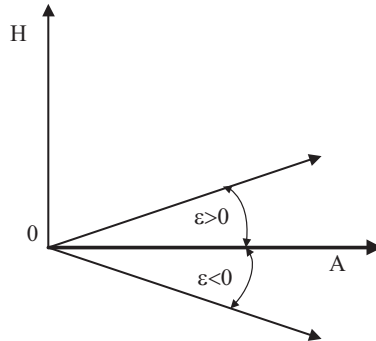
$$H = \sum_{j=1}^n H_j \quad (1)$$

- przemieszczenie poziome punktu końcowego względem punktu początkowego sterowanego przewiertu horizontalnego:

$$A = \sum_{j=2}^n A_j \quad (2)$$

- długość trajektorii sterowanego przewiertu horizontalnego:

$$L = \sum_{j=1}^n L_j \quad (3)$$



Rys. 2. Zależności geometryczne stosowane przy projektowaniu trajektorii horizontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni R^2

W celu określenia przebiegu odcinków krzywoliniowych wyznacza się:

- promień krzywizny:

$$R_j = \frac{180}{\pi \cdot DLS_j} \quad (4)$$

- kąt przestrzennego skrzywienia

$$\delta_j = \varepsilon_j - \varepsilon_{j-1} \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (5a)$$

$$\delta_j = \varepsilon_{j-1} - \varepsilon_j \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (5b)$$

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę pionową:

$$H_j = R_j \cdot (\cos \varepsilon_{j-1} - \cos \varepsilon_j) \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (6a)$$

$$H_j = R_j \cdot (\cos \varepsilon_j - \cos \varepsilon_{j-1}) \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (6b)$$

- rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę poziomą:

$$A_j = R_j \cdot (\sin \varepsilon_j - \sin \varepsilon_{j-1}) \quad \text{dla } \varepsilon_j > \varepsilon_{j-1} \quad (7a)$$

$$A_j = R_j \cdot (\sin \varepsilon_{j-1} - \sin \varepsilon_j) \quad \text{dla } \varepsilon_j < \varepsilon_{j-1} \quad (7b)$$

– długość odcinka:

$$L_j = \frac{\pi}{180} \cdot \delta_j \cdot R_j \quad (8)$$

Dla odcinków prostoliniowych określa się:

– rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę pionową:

$$H_j = L_j \cdot \sin \varepsilon_j \quad (9)$$

– rzut odcinka trajektorii osi otworu na płaszczyznę poziomą:

$$A_j = L_j \cdot \cos \varepsilon_j \quad (10)$$

– długość odcinka:

$$L_j = \sqrt{A_j^2 + H_j^2} \quad (11)$$

gdzie:

A_j – rzut j-tego odcinka na kierunek poziomy, [m];

DLS_j – intensywność przestrzennego skrzywienia j-tego krzywoliniowego odcinka otworu kierunkowego, [°/m];

δ_j – kąt przestrzennego skrzywienia ustalany pomiędzy j-tym a j-1-ym punkcie charakterystycznym;

ε_j – kąt odchylenia od płaszczyzny poziomej trajektorii osi przewiertu horyzontalnego w j-tym punkcie charakterystycznym, [°];

H_j – rzut j-tego odcinka na kierunek poziomy, [m];

L_j – długość j-tego odcinka, [m];

R_j – promień krzywizny j-tego odcinka;

Analizując poszczególne typy profili trajektorii osi horyzontalnych przewiertów sterowanych przewiertów horyzontalnych w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH wyprowadzono dodatkowe zależności matematyczne oraz opracowano algorytmy umożliwiające przeprowadzanie wielowariantowych symulacji przebiegu osi otworu kierunkowego [5].

Mając wyznaczone punkty charakterystyczne $P_j(A_j, H_j)$ dowolnego typu trajektorii osi otworu kierunkowego, wykonywanego w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu, można z zadaniem skokiem długości otworu (Δl) określić współrzędne przestrzenne punktów pośrednich P_L , znajdujących się pomiędzy punktami charakterystycznymi oraz wielkości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej (ε_L) i kąta azymutu (β_L) stycznej do trajektorii w punktach pośrednich.

W tym celu niezbędne jest przyjęcie globalnego lewoskrętnego kartezjańskiego układu współrzędnych w punkcie początkowym otworu, oraz orientacja poszczególnych jego osi w kierunkach: OX – geograficznym wschodnim, OY – geograficznym północnym, OZ – pionowym.

Konieczne jest również określenie azymutu płaszczyzny (β) w której przebiegać będzie projektowana trajektoria. Kąt ten jest wielkością stałą dla całej trajektorii ($\beta_L = \beta$).

Wartości kąta od płaszczyzny poziomej (ε_L) stycznej do trajektorii w punkcie pośrednim P_L znajdującym się pomiędzy punktami charakterystycznymi P_{j-1} oraz P_j w odległości od początku otworu L_L , mierzonej wzdłuż trajektorii, określa się z zależności:

- dla punktu P_L leżącego na odcinku prostoliniowym, ($\varepsilon_j = \varepsilon_{j-1}$):

$$\varepsilon_L = \varepsilon_j \quad (12a)$$

- dla punktu P_L leżącego na odcinku krzywoliniowym, ($\varepsilon_j > \varepsilon_{j-1}$):

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \quad (12b)$$

Współrzędne przestrzenne punktu pośredniego P_L znajdującego się pomiędzy punktami charakterystycznymi P_{j-1} oraz P_j , proponuję wyznaczać ze wzorów:

- dla punktu P_L leżącego na odcinku prostoliniowym ($\varepsilon_j = \varepsilon_{j-1}$):

$$X_L = \left[\sum_{i=1}^{j-1} A_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \cos \varepsilon_j \right] \cdot \sin \beta \quad (13a)$$

$$Y_L = \left[\sum_{i=1}^{j-1} A_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \cos \varepsilon_j \right] \cdot \cos \beta \quad (14a)$$

$$Z_L = \sum_{i=1}^{j-1} H_i + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot \sin \varepsilon_j \quad (15a)$$

- dla punktu P_L leżącego na odcinku krzywoliniowym, dla którego ($\varepsilon_j > \varepsilon_{j-1}$):

$$X_L = \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} A_i + R_j \cdot \left[\sin \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) - \sin \varepsilon_{j-1} \right] \right\} \cdot \sin \beta \quad (13b)$$

$$Y_L = \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} A_i + R_j \cdot \left[\sin \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) - \sin \varepsilon_{j-1} \right] \right\} \cdot \cos \beta \quad (14b)$$

$$Z_L = \sum_{i=1}^{j-1} H_i + R_j \cdot \left[\cos \varepsilon_{j-1} - \cos \left(\varepsilon_{j-1} + \left(L_L - \sum_{i=1}^{j-1} L_i \right) \cdot DLS_j \right) \right] \quad (15b)$$

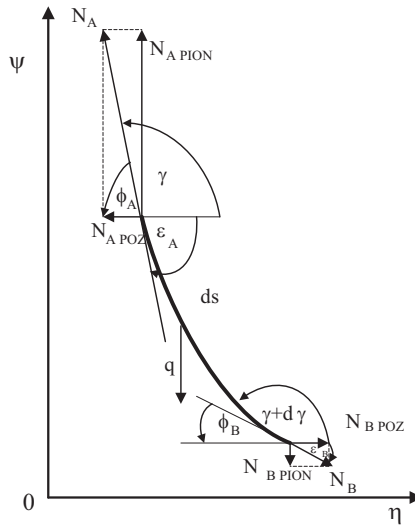
Algorytm i przykład obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu wierconego w jednej płaszczyźnie i będącej kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych przedstawiono w pracy [5].

3. PODSTAWY MATEMATYCZNE PROJEKTOWANIA TRAJEKTORII O PRZEBIEGU KRZYWEJ ŁAŃCUCHOWEJ

Jedną z koncepcji projektowania przebiegu trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu może być przyjęcie naturalnego ugięcia kolumny rur okładzinowych [7]. Uwzględniając fakt, że jeden wymiar kolumny rur okładzinowych (długość) jest niewspółmiernie większy od drugiego (średnica), proponowaną konstrukcję można rozpatrywać jako linię zamocowaną na dwóch podporach o różniących się wysokościach. Jako pierwsza podporę, przyjmuje się punkt początkowy otworu, drugą zaś stanowi punkt docelowy, znajdujący się na głębokości H_k względem punktu początkowego i w odległości A_k od prostej pionowej przechodzącej przez punkt początkowy horyzontalnego przewiertu sterowanego.

W przyjętym modelu cięgna zakłada się, że sztywność poprzeczna zginania i skręcania jest znikomo mała w porównaniu ze sztywnością wzdłużną, co dla kolumny rur okładzinowych nie jest prawdą i może powodować nieznaczące odstępstwa wartości obliczonych od wartości rzeczywistych.

W celu określenia zależności pomiędzy kształtem i długością swobodnie zwisającej kolumny rur okładzinowych o równomiernym ciężarze jednostkowym q , a występującymi w niej siłami należy rozważyć znajdujący się w stanie równowagi odcinek AB o długości ds (rys. 3).



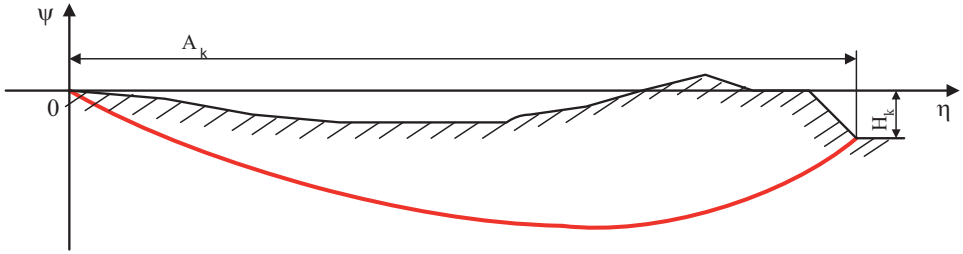
Rys. 3. Zależności geometryczne dla odcinka swobodnie zwisającej kolumny rur okładzinowych

Równanie krzywej łańcuchowej, opisujące kształt swobodnie zwisającej kolumny rur okładzinowych o jednostkowym ciężarze własnym $q = \text{const}$, nie podlegającej odkształceniom wzdłużnym, w układzie współrzędnych przedstawionym na rysunku 3, jest następujące [7]:

$$\psi = \frac{N_{\text{poz}}}{q} \cosh\left(\frac{q}{N_{\text{poz}}}(\eta + C_1)\right) - \frac{N_{\text{poz}}}{q} \cosh\left(\frac{q}{N_{\text{poz}}}(C_1)\right) \quad (16)$$

Wstawiając do równania (16) warunek $\psi(A_k) = H_k$ (rys. 4) otrzymuje się związek pomiędzy wartością siły N_{poz} a stałą C_1

$$\frac{q}{N_{\text{poz}}} H_k = \cosh\left(\frac{q}{N_{\text{poz}}}(A_k + C_1)\right) - \cosh\left(\frac{q}{N_{\text{poz}}}(C_1)\right) \quad (17)$$



Rys. 4. Krzywa łańcuchowa w lokalnym układzie współrzędnych $O\eta\psi$

Przyjmując dopuszczalną wartość siły N_{poz} , wynikającą z możliwości technicznych urządzenia wiertniczego stosowanego podczas wciągania kolumny rur osłonowych można wyznaczyć wartość stałej C_1 . Numeryczną metodę rozwiązania przedstawiono w pracy [7]

Po obliczeniu wartości stałej C_1 można z zadaniem skokiem długości otworu (Δl) określić współrzędne przestrzenne punktów pośrednich P_L , znajdujących się na krzywoliniowej części otworu. W tym celu niezbędne jest przyjęcie globalnego prawoskrętnego kartezjańskiego układu współrzędnych w punkcie początkowym otworu (BOP), oraz zorientowanie poszczególnych jego osi w kierunkach: OX – geograficznym wschodnim, OY – geograficznym północnym, OZ – pionowym.

Współrzędne przestrzenne wyznacza się z zależności:

$$X_L = \left[\frac{N_{\text{poz}}}{q} \arcsin h \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} L_L + \sinh \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} C_1 \right) \right) - C_1 \right] \cdot \sin \beta \quad (18)$$

$$Y_L = \left[\frac{N_{\text{poz}}}{q} \arcsin h \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} L_L + \sinh \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} C_1 \right) \right) - C_1 \right] \cdot \cos \beta \quad (19)$$

$$Z_L = \frac{N_{\text{poz}}}{q} \cosh \left(\arcsin h \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} L_L + \sinh \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} C_1 \right) \right) \right) - \frac{N_{\text{poz}}}{q} \cosh \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}}(C_1) \right) \quad (20)$$

Wielkości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej (ε_L) stycznej do trajektorii w punkcie P_L , w odległości od wylotu otworu L_L , mierzonej wzdłuż trajektorii, wyznacza się wykorzystując wzór:

$$\varepsilon_L = \arctg \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} L_L + \sinh \left(\frac{q}{N_{\text{poz}}} C_1 \right) \right) \quad (21)$$

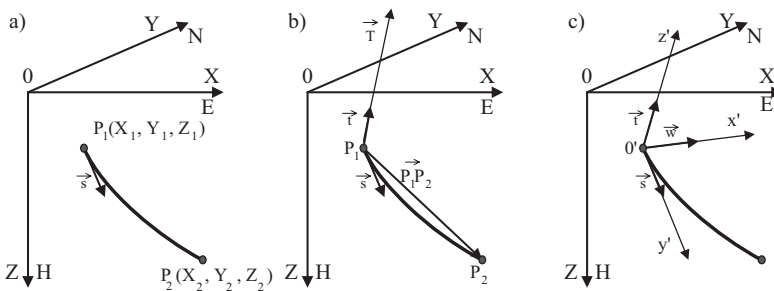
Algorytm i przykład obliczania przestrzennych współrzędnych osi otworu o przebiegu krzywej łańcuchowej przedstawiono w pracy [7].

4. PODSTAWY MATEMATYCZNE PROJEKTOWANIA TRAJEKTORII W PRZESTRZENI R^3

W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano metodykę projektowania trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego, wykonywanego w przestrzeni trójwymiarowej [6]. Przebieg osi otworu proponuje się projektować jako złożenie kilku połączonych ze sobą elementów, z których każdy może przebiegać w innej płaszczyźnie. Pojedynczy fragment trajektorii osi otworu kierunkowego, zawartej między dwoma punktami P_j oraz P_{j+1} , może być odcinkiem prostoliniowym, krzywoliniowym lub ich kombinacją. Płaszczyznę projektową dla tego fragmentu trajektorii wyznacza się przyjmując współrzędne przestrzenne punktów P_j i P_{j+1} oraz wartości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej i azymutu w punkcie początkowym P_j .

W celu wyznaczenia przestrzennego przebiegu elementu trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy dwoma punktami P_1 oraz P_2 , w proponowanej metodyce należy przyjąć następujące założenia projektowe:

- lokalizację globalnego prawoskrętnego kartezjańskiego układu współrzędnych w punkcie wylotu otworu, oraz orientację poszczególnych jego osi w kierunkach: OX – geograficznym wschodnim, OY – geograficznym północnym, OZ – pionowym (rys. 5a);



Rys. 5. Wyznaczanie lokalnego układu współrzędnych: a) orientacja punktów w układzie globalnym OXYZ; b) wyznaczenie wektora \vec{T} prostopadłego do płaszczyzny, w której przebiega odcinek trajektorii osi otworu; c) określenie osi lokalnego układu współrzędnych $o'x'y'z'$

- określenie w układzie OXYZ współrzędnych punktu początkowego $P_1(x_1, y_1, z_1)$ i końcowego $P_2(x_2, y_2, z_2)$;
- ustalenie wartości kąta odchylenia od płaszczyzny poziomej ε_1 i azymutu β_1 odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego w punkcie początkowym P_1 ;
- ustalenie, że projektowana trajektoria osi otworu przebiegać będzie w płaszczyźnie wyznaczonej przez wektor stycznej do osi otworu w punkcie początkowym P_1 oraz punkt końcowy P_2 , a jej profil będzie łukiem, odcinkiem prostoliniowym lub ich kombinacją.

Aby określić przestrzenne współrzędne projektowanego odcinka trajektorii osi otworu należy zdefiniować lokalny prawoskrętny układ współrzędnych o początku w punkcie P_1 . W tym celu wyznacza się cosinusy kierunkowe wektorów \vec{s} , \vec{t} , oraz \vec{w} .

$$\left. \begin{aligned} s_x &= \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 \\ s_y &= \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 \\ s_z &= \sin \varepsilon_1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} t_x &= \frac{(Y_2 - Y_1) \sin \varepsilon_1 - (Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1}{|\vec{T}|} \\ t_y &= \frac{(Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 - (X_2 - X_1) \sin \varepsilon_1}{|\vec{T}|} \\ t_z &= \frac{(X_2 - X_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 - (Y_2 - Y_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1}{|\vec{T}|} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

gdzie:

$$|\vec{T}| = \sqrt{[(Y_2 - Y_1) \sin \varepsilon_1 - (Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1]^2 + [(Z_2 - Z_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1 - (X_2 - X_1) \sin \varepsilon_1]^2 + [(X_2 - X_1) \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 - (Y_2 - Y_1) \cos \varepsilon_1 \sin \beta_1]^2}$$

$$\left. \begin{aligned} w_x &= s_y t_z - s_z t_y \\ w_y &= s_z t_x - s_x t_z \\ w_z &= s_x t_y - s_y t_x \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

W celu określenia przestrzennego przebiegu odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy punktami P_1 , i P_2 należy:

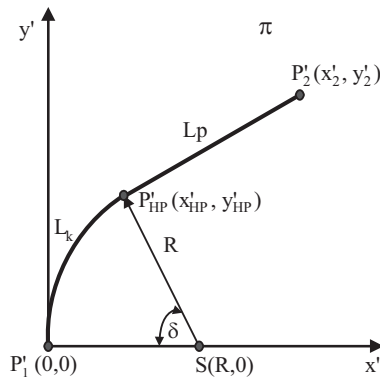
- transponować współrzędne punktów P_1 oraz P_2 z układu globalnego OXYZ do układu lokalnego $o'x'y'z'$;
- wyznaczyć przebieg odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego na płaszczyźnie π określonej przez osie $o'x'$ i $o'y'$;

- transponować współrzędne odcinka trajektorii osi otworu kierunkowego z układu płaskiego $o'x'y'$ do układu globalnego $OXYZ$ związanego z wylotem otworu.

Transformacja dowolnego punktu z układu $OXYZ$ do układu $o'x'y'z'$ jest złożeniem translacji i obrotu, a jego współrzędne w układzie lokalnym wyznacza się według wzoru:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} [X] \\ [Y] \\ [Z] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [X_1] \\ [Y_1] \\ [Z_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \\ s_x & s_y & s_z \\ t_x & t_y & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_1 \\ Y - Y_1 \\ Z - Z_1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Profil trajektorii osi otworu kierunkowego pomiędzy punktem początkowym a docelowym może być łukiem o stałym promieniu krzywizny, odcinkiem prostym lub dowolną ich kombinacją. Przebieg osi otworu na płaszczyźnie π wyznacza się wykorzystując zależności geometryczne przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg trajektorii osi otworu kierunkowego składającej się z odcinka krzywoliniowego i prostoliniowego na płaszczyźnie π

Punkty tworzące odcinek trajektorii osi otworu kierunkowego w układzie lokalnym $o'x'y'z'$ mają współrzędne $P'_i(x'_i, y'_i, 0)$, a ich transformacja z układu $o'x'y'z'$ do układu $OXYZ$ będzie złożeniem obrotu i translacji. Współrzędne punktów trajektorii osi otworu kierunkowego w układzie $OXYZ$ wyznacza się z zależności:

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} x'_L \\ y'_L \\ z'_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_x & s_x & t_x \\ w_y & s_y & t_y \\ w_z & s_z & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_L \\ y'_L \\ z'_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Przy obecnie stosowanych technikach pomiarowych i nawigacyjnych, wykorzystywanych podczas wiercenia otworów kierunkowych, zachodzi konieczność dokładnego określenia wielkości kątów odchylenia od płaszczyzny poziomej ε i azymutów β dla poszczególnych odcinków trajektorii osi otworu kierunkowego. W tym celu wykorzystuje się zależności:

$$\varepsilon = \arcsin \frac{\Delta Z}{\Delta l} \quad (27)$$

$$\beta = 0 \quad - \text{ dla } \Delta X = 0 \wedge \Delta Y = 0 \quad (28a)$$

$$\beta = \beta_0 \quad - \text{ dla } \Delta X \geq 0 \wedge \Delta Y > 0 \quad (28b)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} \quad - \text{ dla } \Delta X > 0 \wedge \Delta Y = 0 \quad (28c)$$

$$\beta = \pi - \beta_0 \quad - \text{ dla } \Delta X \geq 0 \wedge \Delta Y < 0 \quad (28d)$$

$$\beta = \pi + \beta_0 \quad - \text{ dla } \Delta X \leq 0 \wedge \Delta Y < 0 \quad (28e)$$

$$\beta = \frac{3}{2}\pi \quad - \text{ dla } \Delta X < 0 \wedge \Delta Y = 0 \quad (28f)$$

$$\beta = 2\pi - \beta_0 \quad - \text{ dla } \Delta X \leq 0 \wedge \Delta Y > 0 \quad (28g)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X_L - X_{L-1} \\ \Delta Y &= Y_L - Y_{L-1} \\ \Delta Z &= Z_L - Z_{L-1} \\ \Delta l &= L_L - L_{L-1} \\ -\frac{\pi}{2} &\leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{2} \\ \beta_0 &= \left(\arctan \left| \frac{\Delta X}{\Delta Y} \right| \right) \wedge \left(0 \leq \beta_0 \leq \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

5. PODSUMOWANIE

Podczas projektowania trajektorii horyzontalnego przewiertu sterowanego należy alternatywnie rozważyć jej przebieg w przestrzeni dwu- lub trójwymiarowej. Dobór typu trajektorii możliwy jest po uprzednim dokonaniu analizy warunków geologicznych, hydrogeologicznych, morfologicznych, obecności napowierzchniowej i podpowierzchniowej infrastruktury, oraz technicznych i technologicznych możliwości wykonania otworu.

Projektując trajektorię horyzontalnego przewiertu sterowanego w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu należy dokonać wielowariantowej symulacji jej przebiegu a następnie wybrać optymalne rozwiązanie, spełniające ograniczenia techniczno-technologiczne, ekonomiczne i formalno-prawne.

Obecny stan techniki technologii umożliwia racjonalne projektowanie i wykonywanie horyzontalnych przewiertów sterowanych o trajektorii przebiegającej w przestrzeni R^3 .

W celu przeprowadzenia obliczeń proponuje się stosować zależności matematyczne oraz algorytmy postępowania opracowane w Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.

LITERATURA

- [1] Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S.: *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook, Richardson 1986
- [2] McMillian, W.H.: *Planning the Directional Well – A Calculation Method*. J. Pet. Tech., Vol. 33, June 1981, 952–962
- [3] Wiśniowski R., Stryczek St., Ziąja J.: *Wybrane aspekty projektowania i wykonywania horyzontalnych przewiertów sterowanych (HDD)*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo 42, Kielce 2003
- [4] Wiśniowski R.: *Metodyka projektowania trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni R^3* . II międzynarodowa konferencja naukowo-szkoleniowa pt: „Techniki bezwykopowe w sieciach infrastruktury podziemnej Kielce, 19–21 kwietnia 2006
- [5] Wiśniowski R.: *Projektowanie trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni R^2 , będącej kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Budownictwo, Kielce 2005
- [6] Wiśniowski R.: *Wybrane aspekty projektowania konstrukcji otworów kierunkowych z wykorzystaniem technik numerycznych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, seria Rozprawy Monografie nr 112, Kraków 2002
- [7] Wiśniowski R., Stryczek St.: *Catenary as an alternative for HDD trajectory designing*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Netradicni Metody Vyuziti Lozisek”, Ostrawa 2005