

Rafał Wiśniowski*, Jan Ziaja*

**DOBÓR PARAMETRÓW
MECHANICZNYCH URZĄDZEŃ WIERTNICZYCH
STOSOWANYCH W TECHNOLOGIACH HDD****

1. WSTĘP

Podczas budowy podziemnych instalacji rurowych dla potrzeb gazowniczych, wodociągowo-kanalizacyjnych, ciepłowniczych, energetycznych czy telekomunikacyjnych, coraz częściej wykorzystuje się techniki i technologie bezwykopowe. Spośród bezodkrywkowych metod budowy w ostatnich latach coraz większego znaczenia nabierają techniki wiertnicze, a w tym sterowane przewierty horyzontalne. Ciągły postęp techniczny pozwala na konstruowanie coraz nowocześniejszych, w pełni zautomatyzowanych i zminiaturyzowanych urządzeń wiertniczych, umożliwiających wiercenie otworów o przestrzennie zmiennej trajektorii [3–5]. Bardzo istotnym problemem, przed jakim staje projektant i wykonawca horyzontalnego przewiertu sterowanego, jest właściwy dobór urządzenia wiertniczego.

2. URZĄDZENIA WIERTNICZE STOSOWANE W TECHNOLOGIACH HDD

Stosowane obecnie na świecie rozwiązania konstrukcyjne urządzeń wiertniczych wykorzystywanych przy wierceniu horyzontalnych przewiertów sterowanych są wynikiem wielu lat rozwoju myśli naukowo-technicznej i praktycznych doświadczeń inżynierskich. Opracowane konstrukcje wiertnic różnią się między sobą sposobem transportu, rodzajem napędu wrzeciona głowicy wierzącej, wielkością mocy oraz stosowanym systemem płuczkowym.

Ze względu na sposób transportu, wiertnice HDD (*Horizontal Directional Drilling*) dzieli się na urządzenia:

- przenośne,
- przewoźne,
- samojezdne.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań statutowych WWNiG AGH

Wiertnice przenośne to urządzenia o małej mocy, sile uciążu i momencie obrotowym, wykorzystywane głównie do wykonywania krótkich przewiertów (od kilku do kilkudziesięciu metrów). Stosuje się je w celu wykonywania przykanalików lub innych instalacji w warunkach bardzo ograniczonej przestrzeni roboczej. Wiertnice przewożne montowane są na naczepach lub przyczepach i transportowane na plac budowy przy użyciu pojazdów mechanicznych. Wiertnice samojezdne wyposażone są w samobieżny mechanizm gąsienicowy lub kołowy pozwalający na samodzielne przemieszczanie się wiertnic po terenie. Pojęcie „samojezdne” odnosi się jedynie do mobilności wiertnicy na placu budowy. Ze względu na małe prędkości przemieszczania, uzyskiwane przez te urządzenia, w ruchu ulicznym transportuje się je na lawetach. Możliwość samodzielnego ruchu wiertnicy jest szczególnie przydatna, gdy miejsce rozpoczęcia wiercenia wyznaczone jest w trudno dostępnym dla większości pojazdów mechanicznych terenie. Wiertnice tego typu są najczęściej produkowanymi i wykorzystywanymi urządzeniami HDD.

O ile napęd wiertnicy zazwyczaj stanowi silnik wysokoprężny, to poszczególne jej podzespoły mogą być napędzane napędem: mechanicznym, hydraulicznym lub pneumatycznym.

Ze względu na moc wiertnic HDD wyróżniać należy urządzenia:

- o małej mocy (do 150 kW),
- średniej mocy (od 150 do 300 kW),
- dużej mocy (powyżej 300 kW).

W celu urabiania gruntów i skał, wynoszenia zwiercin i chłodzenia narzędzia wierzącego wykorzystuje się płuczkę wiertniczą. Stosowane w wiertnicach HDD systemy płuczkowe możemy podzielić na:

- system płuczkowy na bazie wodnej (w większości rozwiązań konstrukcyjnych),
- system płuczki powietrznej.

Najczęściej stosowane w praktyce samojezdne wiertnice HDD to w przeważającej części zwarte, kompaktowe konstrukcje łączące silnik napędowy z agregatem prądotwórczym, samobieżnym mechanizmem gąsienicowym lub kołowym, zespołem hydraulicznym oraz systemem płuczkowym.

Do podstawowych kompaktowych podzespołów urządzenia zaliczyć należy:

- stalową ramową konstrukcję, najczęściej kotwioną w celu przejmowania powstających naprężeń i momentów obrotowych;
- ruchome sanie (sanice) z głowicą wrzecionową typu Top Driver;
- system szczęk, służący do skręcania i rozkręcania przewodu wiertniczego;
- automatyczny magazynek-podajnik rur płuczkowych, wraz z rurami płuczkowymi, lub urządzenie dźwigowe (nie we wszystkich wiertnicach);
- system generujący moc mechaniczną (silnik spalinowy, zbiorniki paliwa, agregat prądotwórczy);
- zespół napędowy podzespołów wiertnicy (mechaniczny, hydrauliczny lub pneumatyczny);
- system transmisyjny, sterujący ruchem obrotowym (hydrauliczny, pneumatyczny, mechaniczny) i posuwem (łańcuchowy, zębatkowy, siłowniki hydrauliczne) głowicy wrzecionowej;
- system płuczkowy (pompy płuczkowe, zbiorniki płuczkowe).

Niezbędne dla realizacji procesu wiercenia: nacisk i prędkość obrotowa oraz strumień objętości płuczki wiertniczej przekazywane są z wrzeczona głowicy napędowej poprzez przykręcony do niej przewód wiertniczy na narzędzie wierzące. Urabiany grunt lub skała wynoszone są wraz z płuczką wiertniczą powracającą na powierzchnię wzdłuż przestrzeni pierścieniowej pomiędzy przewodem wiertniczym a ścianą otworu.

Płyn wiertniczy przygotowywany jest z wykorzystaniem pomp wirowych w polietylenowych lub stalowych zbiornikach, wyposażonych w lej strumieniowy z dyszą Venturiego. Dużą wadą obecnie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych jest długi czas przygotowywania płuczki wiertniczej, ograniczający niejednokrotnie czas wiercenia. Niewielu wykonawców decyduje się bowiem na zastosowanie systemów oczyszczania płuczki, zwłaszcza przy wierceniu otworu pilotowego. W maszynach małych płuczkę do otworu tłoczy się poprzez wysokociśnieniowe pompy nurnikowe. W urządzeniach średnich i dużych do tłoczenia płuczki wykorzystuje się pompy typu tłokowego.

W trakcie wiercenia przewód wiertniczy podawany jest z automatycznych konstrukcji typu karuzelowego lub też ze specjalnych podpór za pomocą dźwigu będącego w wyposażeniu wiertnicy. Czas dokręcenia elementu przewodu bądź odstawienia żerdzi do magazynka wynosi około minuty, i jest w dużym stopniu uzależniony od sprawności operatora wiertnicy.

W przypadku urządzeń najmniejszych, gdzie ciężar żerdzi nie przekracza kilkunastu kilogramów, operacje na żerdziach wykonywane są ręcznie. Wybór typu przewodu wiertniczego, średnicy zewnętrznej, grubości ścianki oraz odmiany wytrzymałościowej materiału, dokonywany jest najczęściej przez producenta. W wiertnicach HDD producenci nie przewidują stosowania pełnego, dostępnego na rynku asortymentu rur płuczkowych. W specyfikacji urządzenia podają wymiary geometryczne możliwego do zastosowania przewodu wiertniczego, niejednokrotnie traktując go jako podzespół konstrukcyjny wiertnicy. W maszynach dużych i średnich korzysta się ze znormalizowanego przewodu wiertniczego o połączeniach gwintowych zgodnych z normami API. W maszynach małych wykorzystuje się żerdzie płuczkowe z gwintami nieobjętymi normami API, będącymi niejednokrotnie rozwiązaniami patentowymi poszczególnych producentów. Obciążenia, jakie może przenieść przewód wiertniczy, powinny być większe od maksymalnych obciążeń pojawiających się w trakcie prowadzonych prac z użyciem danej wiertnicy. Niestety żerdzie, będące w serijnym wyposażeniu wiertnic HDD, nie zawsze spełniają ten warunek.

Większość wiertnic samojezdnych nie wymaga specjalnych wykopów dla przeprowadzenia prac. Maszyny pracujące w wykopach to z reguły bardzo małe konstrukcje przydatne w projektach, gdzie powierzchnia możliwa do zajęcia pod urządzenie jest bardzo ograniczona. Małe wiertnice stosuje się głównie do wiercenia krótkich odcinków na terenach zurbanizowanych. Wiertnice duże służą do instalacji gazociągów średniego i dużego ciśnienia przesyłu, sieci wodno-kanalizacyjnych oraz długich linii telekomunikacyjnych.

Obecnie stosowane urządzenia wiertnicze różnią się między sobą poszczególnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, a tym samym uzyskiwanymi właściwościami technicznymi i technologicznymi. Niektórzy producenci kładą nacisk na pewne wybrane parametry, kosztem innych. W ostatnim czasie obserwuje się dążenie konstruktorów do zwiększania w nowych konstrukcjach maszyn średnich i małych momentu obrotowego. Wciąż jednak nie docenia się pomp płuczkowych o wartości strumienia tłoczenia skorelowanego właściwie z pozostałymi parametrami technologicznymi wiertnicy.

Optymalnie dobrana technologia wiercenia może znacznie poprawić teoretyczne, podawane przez producentów maszyn, parametry instalowanych linii. Producenci sprzętu unowocześniają i modyfikują parametry swoich modeli, dostosowując je do oczekiwań klientów. Większość rozwiązań zmierza do skrócenia czasu niezbędnego do wykonania instalacji i ograniczenia kosztów własnych operatora.

Do najistotniejszych parametrów technicznych urządzeń HDD zaliczyć należy:

- rodzaj napędu, dostępną moc;
- siłę ciągu i pchania;
- moment obrotowy;
- maksymalną prędkość obrotową wrzeciona;
- ciśnienie i strumień objętości tłoczenia pompy płuczkowej;
- wymiary geometryczne i cechy konstrukcyjne żerdzi wiertniczych.

Na podstawie analizy rozwiązań konstrukcyjnych produkowanych na świecie wiertnic HDD oraz doświadczeń praktycznych z wykonanych projektów horyzontalnych przewierć sterowanych, autorzy artykułu proponują podział urządzeń na kategorie przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1
Podział urządzeń HDD

Kategoria urządzenia	Rodzaj urządzenia	Siła nciągu /pchania [kN]	Moment obrotowy [N·m]	Moc urządzenia [kW]	Maksymalny strumień objętości tłoczenia pompy płuczkowej [l/min]	Średnica żerdzi wiertniczych [mm]
1.	bardzo małe	< 100	< 2500	< 75	100	< 60
2.	małe	100÷250	< 2500÷15 000	75÷150	500	60÷89
3.	średnie	250÷500	15 000÷25 000	150÷300	1000	89÷127
4.	duże	500÷1000	25 000÷50 000	300÷600	1500	127÷140
5.	bardzo duże	> 1000	> 50 000	> 600	> 1500	127÷168

3. METODYKA DOBORU PARAMETRÓW MECHANICZNYCH URZĄDZEŃ HDD

W celu bezawaryjnej realizacji procesu wiercenia horyzontalnego przewierci sterowanego niezbędne jest posiadanie maszyny przewiertowej, dysponującej odpowiednią mocą mechaniczną. Wielkość tej mocy uzależniona jest od:

- warunków geologicznych występujących w rejonie wierceń (rodzaj i parametry fizyko-mechaniczne ośrodka gruntowego i skalnego);
- parametrów geometrycznych trajektorii osi otworu kierunkowego i wciąganej rury osłonowej (długość, średnica końcowa otworu, przebieg przestrzenny osi otworu, średnica i ciężar jednostkowy rury osłonowej);
- od przewidywanej techniki i technologii wiercenia (metoda wiercenia, ilość poszerzeń, stosowany system płuczkowy, balastowanie rury osłonowej itp.).

Wybór urządzenia o zbyt małej mocy może utrudnić bądź uniemożliwić realizację procesu wykonania otworu w założonym czasie i kosztorysie, natomiast urządzenie o zbyt dużej mocy podraża koszt inwestycji, obniżając jej rentowność.

Producenci oraz firmy dealerskie, dostarczające wiertnice, szkolą przyszłych użytkowników w podstawowym zakresie obsługi maszyny wiertniczej, sprzętu do sterowania trajektorią osi wierconego otworu oraz systemów płuczkowych; z reguły jest to niewystarczające dla prawidłowego dobrania urządzenia i wykonania nim bardziej skomplikowanych instalacji.

W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, opracowano zalecenia dotyczące doboru urządzeń HDD. Proponowana metodyka obejmuje określenie minimalnych wymagań techniczno-technologicznych, jakie powinna spełniać wiertnica HDD wraz z przewodem wiertniczym, by przy ograniczonym ryzyku wystąpienia awarii i komplikacji wykonać zaprojektowany przewiert horyzontalny.

Podczas procesu projektowego niezbędna jest znajomość:

- morfologii terenu, przekroju geologicznego oraz właściwości geomechanicznych przewiercanych gruntów i skał;
- przestrzennego przebiegu projektowanej trajektorii osi otworu kierunkowego;
- rodzaju wciąganej rury osłonowej, jej parametrów geometrycznych i właściwości fizycznych;
- techniki i technologii wiercenia pilotowego i projektowanych poszerzeń otworu wiertniczego.

W wyniku przeprowadzanych analiz określa się:

- minimalną, siłę uciągu, moment obrotowy i moc urządzenia wiertniczego;
- parametry geometryczne i materiałowe rur płuczkowych;
- minimalny strumień objętości przepływu płuczki wiertniczej oraz minimalne ciśnienie pomp płuczkowych.

W niniejszym artykule przedstawiono zasady doboru siły uciągu i momentu obrotowego oraz mocy urządzeń HDD. Powyższe parametry technologiczne należy wyznaczać na każdym etapie procesu wykonywania horyzontalnego przewiertu sterowanego, tj: podczas wiercenia otworu pilotowego, wykonywania poszczególnych poszerzeń oraz uwzględniając proces wciągania rury osłonowej. Maksymalne wyznaczone wartości siły uciągu i momentu obrotowego oraz mocy niezbędnej do wykonania otworu i zainstalowania rury osłonowej stanowią przesłankę do doboru klasy urządzenia HDD.

4. SIŁA UCIĄGU I MOMENT OBROTOWY

Jednym z podstawowych wskaźników technicznych urządzeń wiertniczych, stosowanych podczas wiercenia sterowanych przewiertów horyzontalnych jest siła uciągu oraz moment obrotowy.

Wartość siły T (ciągu lub nacisku) zależy od ciężaru jednostkowego przewodu w płuczce wiertniczej, wartości współczynnika tarcia oraz długości i parametrów przestrzennych trajektorii osi otworu wiertniczego.

Jej jednostkowy przyrost obliczać należy z zależności [6]

$$\frac{dT}{dL} = q \sin \varepsilon + \mu_e \sqrt{\left(T \frac{d\varepsilon}{dL} - q \cos \varepsilon\right)^2 + \left(T \cos \varepsilon \frac{d\beta}{dL}\right)^2} \quad (1)$$

przy czym znak „+” przed współczynnikiem μ należy stosować, gdy przewód jest wciągany do otworu, a znak „-”, gdy jest do otworu wciskany. Równanie (1) dla przyjętych danych można rozwiązać numerycznie stosując np. metodę Rungego–Kuty czwartego rzędu.

Wartość momentu obrotowego niezbędne do pokonania sił tarcia przewodu wiertniczego ścianę otworu wyznaczać należy z zależności

$$M = \int_0^L \left\{ \frac{\Delta}{2} \mu \sqrt{\left(T \frac{d\varepsilon}{dL} - q \cos \varepsilon\right)^2 + \left(T \cos \varepsilon \frac{d\beta}{dL}\right)^2} \right\} dl \quad (2)$$

gdzie:

- D – średnica otworu wiertniczego [m],
- T – siła osiowa (ciągu lub nacisku) [N],
- q – ciężar jednego metra przewodu wiertniczego w płuczce wiertniczej [N/m],
- ε – kąt odchylenia trajektorii osi otworu kierunkowego od płaszczyzny poziomej [rad],
- μ – współczynnik tarcia przewodu wiertniczego o ścianę otworu wiertniczego, [-],
- β – azymut stycznej do trajektorii osi otworu kierunkowego [rad],
- L – długość przewodu wiertniczego [m],
- M – moment obrotowy przewodu wiertniczego [N·m].

5. ANALIZA MOCY MECHANICZNEJ POTRZEBNEJ DO REALIZACJI PROCESU WIERCENIA

Moc mechaniczna niezbędna do wykonania otworu wiertniczego o zadanej średnicy może być wyrażona za pomocą wzoru

$$N = N_P + N_N + N_S \quad (3)$$

gdzie:

- N_P – moc potrzebna na przemieszczanie przewodu wiertniczego lub rury okładzinowej [W],
- N_N – moc potrzebna na obracanie narzędzia wierzącego [W],
- N_S – moc potrzebna na zwiercenie struktury skały [W].

5.1. Moc potrzebna na przemieszczanie przewodu wiertniczego lub rury okładzinowej

Moc potrzebna na przemieszczanie przewodu wiertniczego lub rury okładzinowej związana jest z siłą tarcia przewodu wiertniczego o ścianę otworu. W stosowanej w horyzontalnych przewiertach sterowanych technologii wiercenia jest ona sumą mocy potrzebnej na obracanie przewodu wiertniczego oraz jego przesuwanie wzdłuż trajektorii osi otworu kierunkowego

$$N_P = N_{PP} + N_{PO} \quad (4)$$

gdzie:

- N_{PO} – moc potrzebna na obracanie przewodu wiertniczego [W],
- N_{PP} – moc potrzebna na przesuwanie przewodu wiertniczego wzdłuż trajektorii osi otworu wiertniczego [W].

Moc potrzebną na obracanie przewodu wiertniczego wyznaczać należy ze wzoru

$$N_{PO} = \omega M \quad (5)$$

natomiast moc potrzebną na przesuwanie przewodu wiertniczego wzdłuż trajektorii osi otworu wiertniczego obliczać należy z zależności

$$N_{PP} = vT \quad (6)$$

gdzie:

- ω – prędkość kątowna przewodu wiertniczego [s^{-1}],
- v – prędkość przesuwania (przeciągania lub pchania) przewodu wiertniczego [m/s].

Mając wyznaczoną zależność momentu obrotowego M i siły T w funkcji długości przewodu, można określić wartość N_{PO} oraz N_{PP} i w konsekwencji N_P .

5.2. Moc potrzebna na obracanie narzędzia wierzącego

Wartość maksymalnej mocy potrzebnej na obracanie narzędzia wierzącego N_N można obliczyć wykorzystując zależność (3). Zakładając, że narzędzie to nie odkształca się podczas przeciągania wzdłuż trajektorii ($\partial\varepsilon = 0$, $\partial\beta = 0$), oraz stwierdzając że maksymalna wartość mocy N_N wystąpi, gdy narzędzie wierzące przybierze pozycję horyzontalną (siła nacisku będzie równa ciężarowi narzędzia), wielkość maksymalnej mocy N_N można określić następującym wzorem

$$N_N = \omega M_N = \omega \mu \frac{D}{2} F_N \quad (7)$$

gdzie:

- M_N – moment obrotowy narzędzia wierzącego [N·m],
- F_N – ciężar narzędzia wierzącego [N].

W praktyce wiertniczej ciężar stosowanych narzędzi wiertniczych (świdrów i poszerzaczy) jest zależny od ich wymiarów geometrycznych.

Rozważając konstrukcję poszerzaczy, można teoretycznie przyjąć [2]

- dla świdrów różnego rodzaju oraz poszerzaczy baryłkowych

$$F_N = \frac{\pi}{4} \gamma L_N D^2 \quad (8)$$

- dla poszerzaczy stożkowych

$$F_N = \frac{\pi}{12} \gamma L_N D^2 \quad (9)$$

- dla poszerzaczy otwartych

$$F_N = c \frac{\pi}{4} \gamma L_N D^2, \text{ gdzie } c < 1/3 \quad (10)$$

gdzie:

- c – współczynnik [–],
- γ – ciężar właściwy poszerzacza [N/m^3],
- L_N – długość robocza poszerzacza [m].

5.3. Moc potrzebna na urabianie skały lub gruntu

Moc potrzebna na urabianie jest proporcjonalna do objętości urabianej skały lub gruntu. Zakładając stałą długość otworu kierunkowego wierconego, zarówno w fazie pilotowej, jak i w poszczególnych etapach poszerzania otworu, można stwierdzić, że moc niezbędna do urabiania jest proporcjonalna do powierzchni urabianej skały lub gruntu

$$N_S \approx A_S = k_S A_S \quad (11)$$

gdzie k_S – wskaźnik proporcjonalności [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$].

W praktyce wiertniczej moc potrzebna na urabianie skały zależna będzie od stosowanej technologii wiercenia.

Dla świdrów skrawających wyznacza się ją z zależności [1]

$$N_S = \frac{4}{3} k_1 A_S R_c \sqrt[4]{z_0 n v_{sr}^3} + \pi k_2 \mu P D n \quad (12)$$

gdzie:

- k_1 – współczynnik nierównomierności pracy świdra skrawającego [–], ($k_1 \approx 2$),
- A_S – pole powierzchni zwiercanej skały [m^2]

$$A_S = \pi \frac{D^2}{4},$$

- R_c – wytrzymałość na ściskanie skały [N/m²],
- z_0 – liczba ostrzy świdra skrawającego [-],
- n – prędkość obrotowa narzędzia [1/s],
- v_{sr} – prędkość wiercenia [m/s],
- k_2 – współczynnik uwzględniający tarcie boczne [-], ($k_1 \in [1 \div 4]$),
- m – współczynnik tarcia [-],
- P – nacisk na świder [N].

Dla świdrów gryzowych [1]

$$N_S = k_G P^{1,5} D^{2,5} n \quad (13)$$

gdzie k_G – współczynnik świdra gryzowego zależny od twardości skał [-],
 ($k_G \in [0,0791 \div 0,275]$) [1].

Moc wykorzystywana w świdrze hydromonitorowym jest skorelowana z mocą hydrauliczną pomp płuczkowych i nie musi się jej uwzględniać przy wyznaczaniu sumarycznej mocy mechanicznej na głowicy wiercącej.

6. PODSUMOWANIE

Ciągły postęp techniczny pozwala na konstruowanie coraz nowocześniejszych, w pełni zautomatyzowanych, zminiaturyzowanych, kompaktowych urządzeń wiertniczych, umożliwiających wykonywanie horyzontalnych przewiertów sterowanych o przestrzennie zmiennej trajektorii.

W zmiennych warunkach morfologicznych, hydrogeologicznych i geologiczno-wiertniczych, bardzo istotnym problemem jest właściwy dobór wiertnicy HDD. Wybór urządzenia o zbyt małej mocy może utrudnić bądź uniemożliwić realizację procesu wykonania otworu w założonym czasie i kosztorysie, natomiast urządzenie o zbyt dużej mocy podraża koszt inwestycji, obniżając jej rentowność.

Niezbędne parametry mechaniczne urządzenia wiertniczego należy wyznaczać dla każdego etapu procesu wykonywania horyzontalnego przewiertu sterowanego, tj: wiercenia otworu pilotowego, wykonywania poszczególnych poszerzeń oraz uwzględniając proces wciągania rury osłonowej. W celu przeprowadzenia obliczeń należy wykorzystywać przedstawione w artykule zależności.

LITERATURA

- [1] Gonet A., Stryczek S., Rzyczniak M.: *Projektowanie otworów wiertniczych*. Kraków, Wydawnictwa AGH 1996
- [2] Wiśniowski R.: *Directional borehole diameter determination methods for individual stages of horizontal directional drilling*. Kraków, Archiwum Górnictwa, 49, t. 3, 2004

- [3] Wiśniowski R.: *Projektowanie trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni R^2 , będącej kombinacją odcinków prosto- i krzywoliniowych*. Kielce, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo, 2005
- [4] Wiśniowski R.: *Metodyka projektowania trajektorii osi horyzontalnego przewiertu sterowanego w przestrzeni R^3* . Kielce, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo, 2006
- [5] Wiśniowski R., Stryczek S.: *Catenary as an alternative for HDD trajectory designing*. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Netradicni Metody Vyuziti Lozisek”, Ostrawa 2005
- [6] Wiśniowski R., Ziaja J.: *Analiza sił tarcia podczas wiercenia otworu pilotowego horyzontalnego przewiertu sterowanego*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 22/1, 2005