

# Ograniczanie ryzyka utrąty cyrkulacji w otworze wiertniczym wykonanym w technologii HDD

## Podstawy określania dopuszczalnego ciśnienia płuczki wiertniczej w otworze wiertniczym na przykładzie przewiertów horyzontalnych wykonanych w Barreiro (Portugalia) przez LMR Drilling GmbH

Na przełomie września i października 2009 r. zostały wykonane dwa przekroczenia zatoki morskiej. Wykonano przewiert o długości 1835 m, maksymalna głębokość obu przewiertów wynosiła 28 m, maksymalna odległość osi przewiertów – 12 m. Warunki geologiczne na trasie przewiertów to piasek, piaski gruboziarniste zbite, w strefie przypowierzchniowej obecny był namul.

Warunkiem wykonania przewiertów było niedopuszczenie do przebicia płuczki wiertniczej na powierzchnię terenu, to znaczy bezpośrednio do zatoki.

### ANALIZA DOPUSZCZALNYCH CIŚNIEŃ

W procesie wiercenia otworu wiertniczego używana jest płuczka wiertnicza, która pośród wielu funkcji, przede wszystkim urabia i stabilizuje ścianę otworu wiertniczego oraz transportuje zwierciny na powierzchnię. Powstaje wówczas ciśnienie w otworze wiertniczym. Wielkość tego ciśnienia zależna jest przede wszystkim od geometrii otworu, wydatku tłoczenia i parametrów reologicznych płuczki wiertniczej.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że ciśnienie w otworze wiertniczym jest składową całkowitego ciśnienia tłoczenia płuczki wiertniczej. Natomiast na całkowite ciśnienie podczas wiercenia składają się straty ciśnienia:

- na powierzchni (armatura wiertni),
- w przewodzie wiertniczym,
- w dyszach narzędzia wiertniczego, świdra,
- w przestrzeni pierścieniowej (wolna przestrzeń powstała w gruncie w procesie wiercenia, różnica pomiędzy średnicą świdra i średnicą zewnętrzną przewodu wiertniczego).

Określenie strat ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej jest ważnym elementem procesu projektowania przewiertu horyzontalnego. Straty ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej odpowiadają przede wszystkim za utrzymanie poprawnej cyrkulacji w otworze wiertniczym, co jest ściśle związane z procesem oczyszczania otworu wiertniczego z powstałych zwiercin. Na wielkość strat ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej ma wpływ geometria przestrzeni pierścieniowej, wydatek tłoczenia płuczki wiertniczej, parametry reologiczne płuczki i postęp wiercenia. Z założenia straty ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej, łącznie z ciśnieniem hydrosta-

tycznym, nie powinny przekroczyć maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia. W praktyce przewiertów horyzontalnych często dochodzi do przebicia płuczki wiertniczej na powierzchnię terenu. Jest ono skutkiem osiągnięcia większego ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej niż dopuszczalne ciśnienie szczelinowania nadkładu.

### OBLICZENIA MAKSYMALNEGO DOPUSZCZALNEGO CIŚNIENIA

Do obliczenia maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia użyto formuły opracowanej w Instytucie Delft (Luger i Hergarden, 1988), która oparta jest na analizie odkształceń plastycznych w strefie przyodwiertowej, przy założeniu, że otwór wiertniczy jest osiowo symetryczny, medium jest homogeniczne, izotropowe i ma nieograniczony rozmiar, w strefie plastyczności zachowuje się jak ściśliwe, plastyczne ciało stałe, a poza tą strefą, jak odkształcalne liniowo izotropowe ciało stałe.

Wzór ten pozwala, pomimo wielu uproszczeń, określić maksymalną wytrzymałość gruntu na ciśnienie płuczki w otworze wiertniczym.

$$p_{\max} = u + (p'_f + c_f \cdot \cot\phi_f) \cdot [(R_b/R_{p,\max})^2 + Q]^{(\sin\phi/1+\sin\phi)} - c_f \cdot \cot\phi_f$$

gdzie:

$$Q = (\sigma'_0 \cdot \sin\phi + c_f \cdot \cot\phi_f) \cdot 1/G$$

$$p'_f = \sigma'_0 \cdot (1 + \sin\phi + c_f \cdot \cot\phi_f)$$

$$c_f = \text{spójność (kN/m}^2\text{)}$$

$$\phi_f = \text{kąt tarcia wewnętrzznego (}^\circ\text{)}$$

$$\sigma'_0 = \text{ciśnienie efektywne (kN/m}^2\text{)}$$

$$G = \text{moduł ścinania (kN/m}^2\text{)}$$

$$R_b = \text{promień trajektorii otworu wiertniczego (m)}$$

$$R_{p,\max} = \text{maksymalny promień strefy plastycznej (m)}$$

$$u = \text{początkowe ciśnienie porowe (kN/m}^2\text{)}$$

Na podstawie analizy warunków geologicznych występujących na trasie przewiertów, określono dopuszczalne ciśnienia dla poszczególnych długości otworu. Tab. 1 przedstawia wyniki dla końcowej części wierzonego otworu. Z praktyki wiadomo, że na tym odcinku jest zawsze najtrudniej utrzymać cyrkulację w otworze z powodu długiego już dystansu i wznoszącej się ku powierzchni trajektorii otworu.

Odległość (m)	1600	1650	1700	1750	1780
Maksymalne ciśnienie (kPa)	968	968	940	712	117

Tab. 1. | Dopuszczalne ciśnienie dla przewiertów Barreiro w Portugalii

## OKREŚLENIE DOPUSZCZALNEGO CIŚNIENIA PŁUCZKI WIERTNICZEJ W OTWORZE

Ciśnienie płuczki wiertniczej możemy określić przy pomocy wzoru:

$$P_{dcp} = p_1 + p_2$$

gdzie:

$p_1 = \rho \cdot g \cdot h$  (Pa) ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki

$h$  = głębokość (m)

$\rho$  = gęstość płuczki wiertniczej w otworze ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = przyspieszenie ziemskie ( $\text{m/s}^2$ )

$p_2 = dp/dz \cdot L$  (Pa) straty ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej

$L$  = długość otworu (m)

$dp/dz$  = gradient strat (Pa/m)

## OBLICZENIA STRAT CIŚNIENIA W PRZESTRZENI PIERŚCIENIOWEJ

Aby prawidłowo obliczyć straty ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej, należy najpierw określić prawidłowy model reologiczny – właściwości zastosowanej płuczki wiertniczej.

Do opisu płuczek wiertniczych wykorzystuje się następujące modele cieczy: newtonowskie, pseudoplastyczne (model Ostwalda de Waele), liniowe plastyczno-lepkie (model Bingham) i nieliniowe plastyczno-lepkie (model Herschel–Bulkleya).

Model reologiczny opisuje zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi i prędkością ścinania podczas przepływu płynu przez kołowy lub pierścieniowy kształt.

Modele reologiczne poszczególnych cieczy wiertniczych przedstawiają się następująco: model reologiczny opisuje zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi i prędkością ścinania podczas przepływu płynu przez kołowy lub pierścieniowy kształt.

– Model Newtona

Opisuje płyn jako liniową zależność naprężeń stycznych ( $\tau$ ) i prędkości ścinania ( $\dot{\gamma}$ ). Graficznie jest ta zależność przedstawiana jako prosta linia przechodząca przez początek układu współrzędnych o nachyleniu równym lepkości dynamicznej płynu ( $\mu$ ).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Zależność ta jest prawidłowa wyłącznie dla przepływu laminarnego. Przepływ laminarny występuje przy niskich prędkościach ścinania. Przy wysokich prędkościach ścinania, kształt przepływu zmienia się z laminarnego na turbulentny. Dla płynu newtonowskiego lepkość jest stała i zależna jedynie od temperatury i ciśnienia.

– Model Bingham

Jest używany w celu przybliżenia pseudoplastycznego zachowania (np. obniżenie lepkości pozornej ze wzrostem prędkości ścinania) płuczek wiertniczych i płuczek cementowych.

Model Bingham jest definiowany wzorem:

$$\tau = \mu_p \cdot \dot{\gamma} + \tau_y$$

Powyższe równanie matematyczne jest prawidłowe dla przepływu laminarnego. Płyn Binghamowski wymaga, żeby przy-

łożone naprężenie styczne przewyższało określoną minimalną wartość, aby płyn mógł płynąć. Ta minimalna wartość jest nazywana granicą płynięcia ( $\tau_y$ ). W momencie przekroczenia granicy płynięcia, zmiany naprężeń stycznych są proporcjonalne do zmian prędkości ścinania. Stała proporcjonalności jest nazywana lepkością plastyczną ( $\mu_p$ ). Lepkość plastyczna jest zależna od ciśnienia i temperatury. Model Bingham sprawdza się dobrze dla wyższych prędkości ścinania, ale daje znaczący błąd przy niskich prędkościach ścinania.

– Model Ostwalda de Waele'a

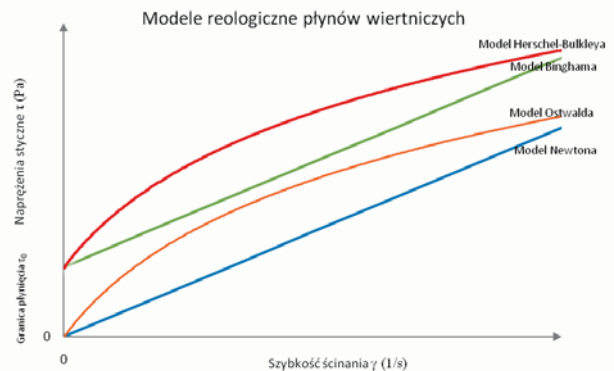
Model ten jest używany do przybliżenia pseudoplastycznego zachowania płynów wiertniczych i płuczek cementowych. Jest definiowany jako:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^m$$

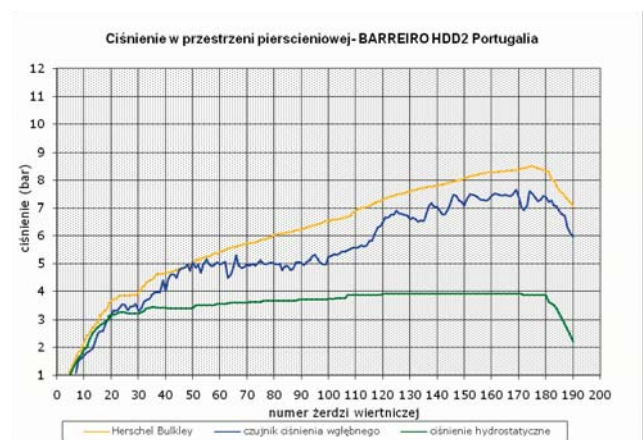
Model ten wykorzystuje dwa parametry do opisu charakteru płuczki: współczynnik konsystencji ( $K$ ) i współczynnik zachowania się płynu ( $m$ ). Dla  $m = 1$  równanie upraszcza się do równania modelu Newtonowskiego. Poza tym model ten opisuje płyny pseudoplastyczne ( $m < 1$ ), jak również płyny dylatacyjne ( $m > 1$ ).

Współczynnik  $K$  opisuje gęstość płynu i jest analogiczny do lepkości pozornej. Duże wartości  $K$  oznaczają, że płyn jest bardzo gęsty. Współczynnik  $m$  wyznacza stopień nie-newtonowskiego zachowania płynu. Słabą stroną modelu Ostwalda de Waele'a jest niedoszacowanie naprężeń stycznych przy średnich i niskich zakresach prędkości ścinania.

Model Ostwalda de Waele'a nazywany jest również modelem Power law.



Rys. 1. | Graficzne porównanie przedstawionych modeli reologicznych płuczki wiertniczej



Rys. 2. | Porównanie ciśnienia wglębnego mierzonego za pomocą czujnika wglębnego i obliczonego według modelu Herschel-Bulkleya



– Model Herschel-Bulkleya

Model ten jest połączeniem modelu Binghama i Ostwalda de Waele'a. Model Herschel-Bulkleya uwzględnia granicę płynięcia w przeciwieństwie do modelu Power law. Opisuje je poniższe równanie:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^m$$

Model ten jest zredukowany do modelu Ostwalda de Waele'a przy  $\tau_y = 0$ , a przy wartości współczynnika  $m = 1$  sprowadza się do modelu Binghama. Należy zwrócić uwagę na to, że ten model może dawać równania matematyczne trudne do rozwiązania analitycznie, ale możliwe do rozwiązania za pomocą nieliniowej regresji.

## PŁUCZKA WIERTNICZA

Płuczki wiertnicze używane w wiertnictwie HDD oparte są przede wszystkim na minerale ilastym zwanym montmorylonitem. Iły zawierające w swoim składzie montmorylonit nazywane są bentonitem. Płuczka wiertnicza użyta do wykonania wspomnianych wyżej przewiertów w Portugalii oparta była na specjalnie modyfikowanym bentonicie produkowanym przez firmę HEADS.

Charakterystyka reologiczna tego bentonitu (Teqgelu Special) najbardziej odpowiada modelowi Herschel-Bulkleya, dlatego do obliczeń strat ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej wykorzystano ten model.

Dla modelu Herschel-Bulkleya straty ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej przedstawia tab. 2.

Na podstawie analizy wyników z tab. 1 i tab. 2 widać, że zanik cyrkulacji płuczki, przebicie na powierzchnię dla założonej średnicy otworu pilotowego 17,5 cala (444,5 mm) nastąpi na dystansie 1750 m.

## PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ Z PRAKTYKĄ

W trakcie wykonywania obydwu przewiertów w celu pomiaru ciśnienia w otworze wiertniczym użyto czujnika pomiaru ciśnienia wgłębnego umieszczonego za zestawem wierzącym (świder i motor). Wyniki pomiarów ciśnienia przedstawia rys. 2, gdzie pokazane jest porównanie ciśnienia mierzonego

Odległość (m)	1600	1650	1700	1750	1780
Ciśnienie hydrostatyczne	335	348	322	221	147
Gradient strat(kPa/m)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Straty ciśnienia(kPa)	448	462	476	490	498
Całkowite ciśnienie	783	810	798	711	645

Tab. 2. | Ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego w zależności od długości otworu

za pomocą czujnika wgłębnego z ciśnieniem obliczonym według modelu Herschel-Bulkleya. Różnica pomiędzy krzywymi wynika z przyjęcia do obliczeń idealnej przestrzeni pierścieniowej pomiędzy świderem a przewodem wiertniczym. W praktyce nie ma idealnej przestrzeni pierścieniowej z powodu zalegania przewodu wiertniczego na dnie otworu. Wiercony otwór ma też większą średnicę, co wynika z technologii wiercenia otworów pilotowych. Po uwzględnieniu poprawek do obliczeń na powyższe niezgodności linie te znacznie się do siebie zbliżają.

Zastosowanie czujnika ciśnienia wgłębnego pozwala też idealnie kontrolować stan oczyszczenia otworu wiertniczego z urobku.

Utrata cyrkulacji w otworze Barreiro HDD1 nastąpiła na dystansie 1760 m, a w otworze Barreiro HDD2 po 1790 m. Odległości te po uwzględnieniu poprawek na brak idealnej przestrzeni pierścieniowej zgodne są z wynikiem uzyskanym w procesie projektowania otworu.

## PODSUMOWANIE

Metody obliczeniowe coraz bardziej odzwierciedlają rzeczywistość i pozwalają już w procesie projektowania otworu horyzontalnego tak dobrać technologię jego wykonania, aby bez problemu osiągnąć zamierzony cel. Pozwala to w przyszłości na poprawne określenie trudności zadania i prawidłowe przygotowanie się do realizacji przewiertu, w wyniku czego firmy wiertnicze wykonywać mogą coraz to ciekawsze i trudniejsze projekty. ■

## LITERATURA:

1. Prediction of stand pipe pressure using conventional approach  
Dipankar Chowdhury, Mohammed Mahbubur Rahman. Chemical Engineering Research Bulletin 13 (2009).
2. Drilling Fluid Considerations in Design of Engineered Horizontal Directional Drilling Installations, Michael E. Baumert, P.E.; Erez N. Allouche, P.E.; and Ian D. Moore. International Journal of Geomechanics © asce / December 2005.
3. Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich Rafał Wiśniowski, Krzysztof Skrzypaszek Wiertnictwo Nafta Gaz, TOM 23/1, 2006.
4. Potrzeba i możliwości poprawy jakości w technice kierunkowych przewiertów horyzontalnych HDD Ph.D. Gerard Arends. Delft University of Technology, Holandia. Inżynieria Bezwykopowa 2/2004.



Firma **AG System** specjalizuje się w budowie sieci wodno – kanalizacyjnych, przewiertach sterowanych a także robotach brukarskich i wynajmie sprzętu budowlanego.



**Działy firmy:**

AG System Sp. z o.o.  
ul. Senatorska 15  
30-106 Kraków  
tel. + 48 012 427 00 61  
fax. + 48 012 427 03 25  
e-mail: [biuro@agsystem.pl](mailto:biuro@agsystem.pl)

**Dział realizacji**

+48 12 427 00 61  
e-mail: [biuro@agsystem.pl](mailto:biuro@agsystem.pl)

**Dział przygotowania i ofertowania:**

+ 48 501 452 152  
e-mail: [oferty@agsystem.pl](mailto:oferty@agsystem.pl)

**Dział marketingu:**

+48 519 138 606  
e-mail: [marketing@agsystem.pl](mailto:marketing@agsystem.pl)

**Dział sprzętu:**

+48 503 187 420  
e-mail: [sprzet@agsystem.pl](mailto:sprzet@agsystem.pl)

[www.agsystem.pl](http://www.agsystem.pl)



## Nasz cel

to zadowolenie klientów połączone z troską o środowisko naturalne

### ■ Świadczymy usługi z zakresu

- roboty inżynieryjne
- przewiertki sterowane
- zabijanie ścianek szczelnych
- sieci wodno - kanalizacyjne
- przyłącza wodno kanalizacyjne
- pompownie ścieków, separatory
- obniżanie poziomu wód gruntowych
- roboty brukarskie
- roboty wyburzeniowe
- roboty ziemne