

**Stanisław Bednarz\***

**OPERACJE WYCIĄGANIA-ZAPUSZCZANIA  
PRZEWODU WIERTNICZEGO  
A BEZPIECZEŃSTWO PRZECIWERUPCYJNE\*\***

**1. WSTĘP**

Bezpieczne prowadzenie wierceń wymaga odnoszenia się z właściwą uwagą do sterowania ciśnieniem w otworze podczas wiercenia, dodawania pojedynczej rury płuczkowej, wymiany narzędzia, jak również operacji wyciągania i zapuszczania przewodu wiertniczego. Ocenia się, że połowa erupcji otworów wiertniczych następuje z powodu bezpośredniego złamania procedur wiertniczych. Operacje wyciągania-zapuszczania (OWZ), niezależnie od uzbrojenia wylotu otworu, często połączone są z utrudnieniami w postaci szczelinowania skał w ścianie otworu, zaniku płuczki, obwałów, niespodziewanych przypliwów płynu złożowego do otworu itp. Ilość przypliwów podczas OWZ nie jest mniejsza niż podczas samego wiercenia. Zjawiska te w szeregu przypadków powstają wskutek niedopuszczalnych ciśnień hydrodynamicznych wywołanych ruchem kolumny przewodu wiertniczego w płynie wypełniającym otwór wiertniczy. Podczas konwencjonalnego wiercenia otworu ciśnienie denne składa się z ciśnienia hydrostatycznego słupa płuczki zawierającej zwierciny i ciśnienia hydrodynamicznego w przestrzeni pierścieniowej wywołanego przepływem płuczki i ruchem przewodu wiertniczego. Aby otrzymać właściwe ciśnienie denne podczas wiercenia, ciśnienie hydrostatyczne płuczki może być regulowane przez zmianę gęstości płuczki. Podczas wyciągania przewodu z otworu powstaje dodatkowe zmniejszenie tego ciśnienia. Oznacza to, że podczas OWZ może nastąpić przypliw płynu złożowego o takiej skali, która nie byłaby adekwatna do operacji wiercenia. Przewód w czasie ruchu przemieszcza się ze zmienną prędkością. Wpływ na przebieg tych operacji ma również to, czy są prowadzone z otwartym czy z zamkniętym dolnym końcem kolumny przewodu. Poważny udział w wystąpieniu powyższych trudności ma brak wykształcenia i zrozumienia zjawisk występujących w otworze. Niekiedy zastosowane postępo-

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Pracę zrealizowano w ramach badań statutowych nr 11.11.190.01 WWNiG AGH

wanie przy wystąpieniu objawów erupcji, właściwe w czasie wiercenia, jest nieodpowiednie podczas OWZ przewodu, stąd krok do erupcji otwartej. Duże znaczenie dla utrzymywania stałej gotowości do adekwatnej odpowiedzi ma również dokładność prowadzonych pomiarów objętości płuczki, także w zbiorniku marszowym. Ponadto załoga powinna być zaznajomiona z faktem, że podczas OWZ płuczka jest nieco lżejsza niż podczas wiercenia. Aby zapobiec erupcji, otwór powinien być uzupełniany taką objętością płuczki, jaka wynika z wyporności przewodu.

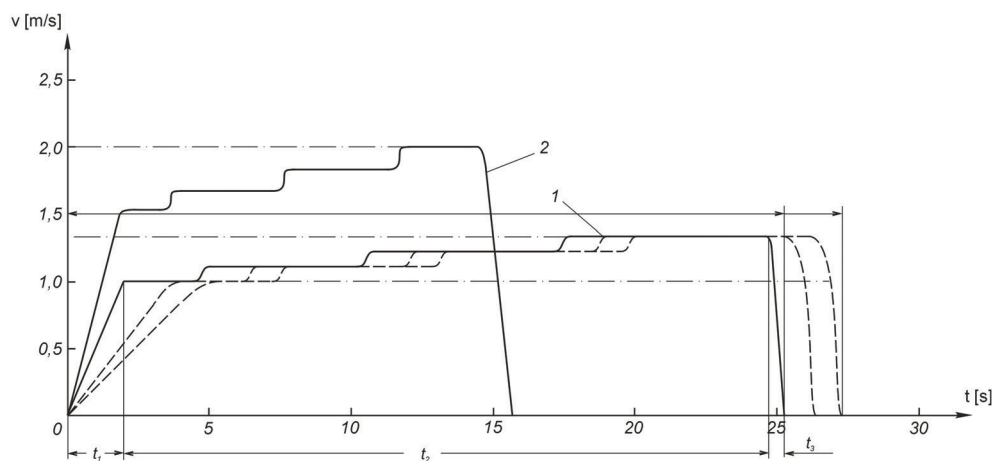
## 2. WARUNKI RUCHOWE WYCIĄGU WIERTNICZEGO

Otwór wiertniczy wypełniony płuczka podczas wiercenia jest obsługiwany m.in. przez urządzenie wyciągowe, którego charakterystyka techniczna jest dobrana głównie pod kątem uzyskania wysokich prędkości ruchu haka wiertniczego pustego i obciążonego przewodem wiertniczym lub kolumną rur okładzinowych. Czas wyciągania kolumny przewodu składa się z poniższych składników

$$T = T_p + T_r + T_o + T_n, \text{ s} \quad (1)$$

gdzie:

- $T_p$  – czas mechanicznego podnoszenia, s,
- $T_r$  – czas czynności maszynowo-ręcznych przy rozkręcaniu połączeń gwintowych i manewrowaniu pasem przewodu zwykle o długości 27 m, s,
- $T_o$  – czas opuszczania nieobciążonego elewatora, s,
- $T_n$  – czas wymiany narzędzia wiertniczego, s.



**Rys. 1.** Wykres prędkości podnoszenia haka na wysokość jednego pasa przewodu: 1 – prędkość podnoszenia przewodu wiertniczego; najdłuższa linia przerywana dotyczy początku podnoszenia, a ciągła – końca podnoszenia, 2 – prędkość podnoszenia nieobciążonego elewatora,  $t_1$  – czas rozruchu, przyspieszenia przewodu,  $t_2$  – czas ruchu ustalonego, skokowe zwiększenia prędkości wynikają z nawijania się liny na kolejne warstwy na bębnie,  $t_3$  – czas hamowania

Stopień mechanizacji i automatyzacji, moc wyciągu oraz kwalifikacje załogi mają wpływ na wielkość poszczególnych składników czasu. Prędkości wyciągania możliwe do uzyskania przez wyciągi współcześnie znajdujące się w eksploatacji są w zakresie np. od 0,47 m/s przy obciążeniu haka 2668 kN do 2,01 m/s przy 672 kN (IRI-E1200) lub od 0,38 m/s przy 1271 kN do 2,26 m/s przy 524 kN (KREMCO K600). Fakt stosunkowo częstego występowania przyływu płynu złożowego w powyższej operacji wymaga stałej gotowości i właściwego postępowania w przypadku wykrycia objawów przyływu. Czas każdego cyklu mechanicznego podnoszenia to czas rozruchu  $t_r$ , prędkości ruchu ustalonego  $t_u$  i czas hamowania  $t_h$  (rys. 1). W pewnych przypadkach ruch ustalony nie występuje, po okresie rozruchu następuje hamowanie, a zatem ten składnik czasu jest równy zero.

### **3. WPLYW RUCHU PRZEWODU NA STEROWANIE CIŚNIENIEM DENNYM W OTWORZE WIERTNICZYM**

W praktyce wiertniczej nadwyżka ciśnienia słupa płuczki w otworze wierconym dla udostępnienia złóż ropy naftowej i gazu ziemnego nad przewidywanym ciśnieniem złożowym powinna zawierać się w granicach od 0,5 do 1,0 MPa na każde 1000 m otworu [6]. Powyższa zasada odnosi się do ciśnienia hydrostatycznego, a w uzasadnionych przypadkach kierownik ruchu zakładu górniczego może zmienić wielkość nadwyżki. W otworach gazowych stosowana nadwyżka ciśnienia jest zwykle o 50% większa niż w otworach ropnych. Wyciąganie przewodu wiertniczego powoduje konieczność ciągłego dopełniania otworu płuczka oraz bieżącej kontroli jego skuteczności. Prędkość lub zmiana prędkości wyciągania obok lepkości i wytrzymałości strukturalnej płuczki oraz geometrii zestawu dolnej części przewodu to główne czynniki mające wpływ na zagrożenie erupcyjne, którego likwidacja może ostatecznie wymagać zamknięcia głowicy przeciwerupcyjnej. I w następstwie tego – podjęcie działań mających na celu wyparcie gazu obciążoną płuczka. Wyciąganie przewodu z obniżeniem poziomu płuczki w otworze nie może doprowadzić do utraty ww. nadwyżki ciśnienia. Obliczenie dopuszczalnej ilości pasów przewodu wyciągniętych „na sucho” lub objętości płuczki dopełnianej jest podstawowym zadaniem szkoleniowym dla załóg wiertniczych dla przypadku otworu pionowego i kierunkowego. Niwelacja nadwyżki ciśnienia może być spowodowana wyciąganiem „na sucho” zbyt dużej liczby pasów przewodu, przy czym ich liczba zależy od planowanej nadwyżki i stosunku wyporności rur płuczkowych do pojemności otworu lub rur okładzinowych. Dla przykładu niwelacja nadwyżki wynoszącej 1,5 MPa w otworze pionowym o głębokości 3000 m, zarurowanym rurami 9 5/8" i przy gęstości płuczki 1200 kg/m<sup>3</sup> może być wywołana wyciągnięciem 976,13 m (36 pasów 27 metrowych) przewodu składającego się z 2750 m rur płuczkowych o średnicy 5" i 250 m obciążników 6 1/2". Wtedy poziom płuczki obniży się o 125 m. Im mniejsza gęstość płuczki i/lub większa planowana nadwyżka ciśnienia, tym większe obliczone obniżenie poziomu płuczki w otworze powodujące niwelację nadwyżki ciśnienia dennego nad ciśnieniem złożowym.

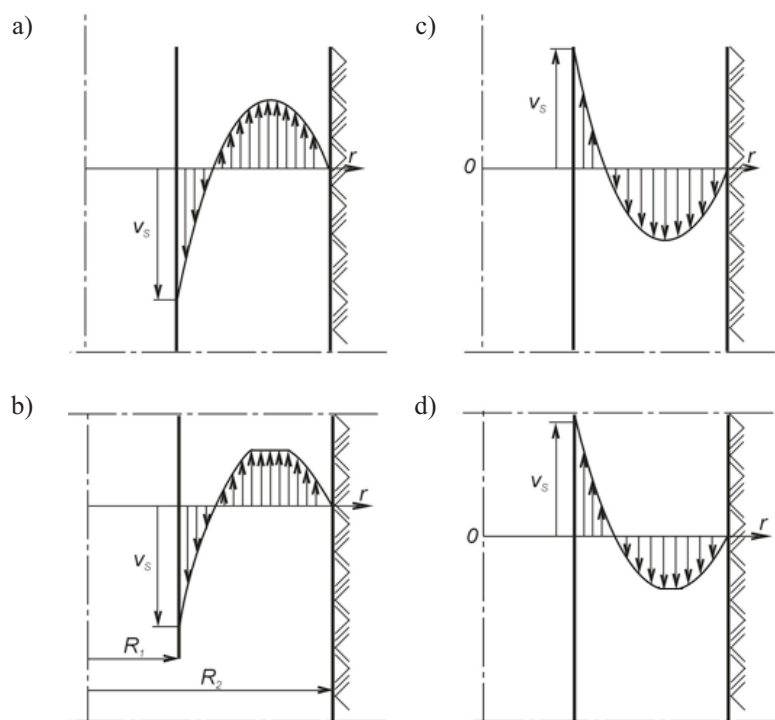
Dokładne sterowanie ciśnieniem dennym podczas operacji wiertniczych jest coraz bardziej wymagane z powodu rosnących utrudnień podczas wiercenia ze względu na stosowanie małej nadwyżki ciśnienia w czasie wiercenia, wysoką temperaturę i ciśnienie w otworze oraz szczelinowate formacje skalne. Zaleca się ponadto, aby prędkość wyciągania i zapusz-

czania przewodu wiertniczego i lepkość płuczki były dobrane tak, aby ograniczyć efekt tłokowania wywołujący przyływ płynu złożowego lub zanik płuczki. Operacje wyciągania-zapuszczania, niezależnie od uzbrojenia wylotu otworu, często połączone są z utrudnieniami w postaci szczelinowania skał tworzących ścianę otworu, zaniku płuczki, obwałów, niespodziewanych przyływów płynu złożowego do otworu itp. [1, 3, 8].

Jeżeli podczas wiercenia ciśnienie słupa płuczki było wystarczająco duże, aby powstrzymać ciśnienie złożowe, to podczas OWZ należy dysponować odpowiednią ilością informacji, aby zapobiec erupcji. Po wyłączeniu pompy w chwili przystąpienia do wyciągania, w wierceniu stołowym, następuje zmniejszenie ciśnienia dennego.

Na powstanie ciśnienia hydrodynamicznego i jego zmian w otworze składa się kilka przyczyn:

- opory hydrauliczne podczas ruchu cieczy, unoszonej lub ciągniętej wskutek tarcia o powierzchnię poruszającej się rury;
- opory hydrauliczne strumienia płuczki powstającego wskutek zapełniania przestrzeni zwolnionej przez wyciągany przewód lub wypierania cieczy przez zapuszczany przewód;
- ciśnienie powstające wskutek bezwładności masy cieczy przy przyspieszeniu i hamowaniu jej ruchu.



**Rys. 2.** Rozkład prędkości strumienia płuczki  $v_s$  w przestrzeni pierścieniowej podczas zapuszczania (a, b) oraz wyciągania (c, d) przewodu wiertniczego: przepływ turbulentny – schematy (a, c); przepływ laminarny – schematy (b, d);  $R_1$ ,  $R_2$  – promienie rury płuczkowej i otworu

Równania przepływu nieustalonego obejmujące równanie ruchu, zachowania masy, stanu i reologiczne [5] mogą stanowić podstawy do analizy przepływu płuczki podczas OWZ przewodu wiertniczego (rys. 2). Poczynione dla danego przypadku założenia, np. o przepływie jednofazowym, o nieściśliwości płuczki, o reologicznym modelu zachowania się płuczki i o otwartym lub zamkniętym końcu kolumny przewodu dają różne rozwiązania. Istnieją rozwiązania numeryczne opierające się na bogatych danych z prób przemysłowych [2] podzielone na cztery kategorie. Po pierwsze wykorzystuje się podział na konfiguracje przewodu z otwartym końcem lub zamkniętym oraz ruch laminarny i turbulentny. Występujące zależności między tymi czynnikami powodują, że przy tej samej płuczce i geometrii przewodu przepływ laminarny w przestrzeni pierścieniowej między przewodem otwartym a ścianą otworu może zmienić się w przepływ turbulentny, gdy przewód jest zamknięty, chociaż prędkość ruchu przewodu zmniejszy się z 2,13 m/s do 1,73 m/s. Rodzaj płuczki charakteryzowany przez model reologiczny [7] może być ustalony w pomiarach z wykorzystaniem lepkościomierza obrotowego Fanna. Tak więc wstępne wykorzystanie prędkości ruchu przewodu nie jest wystarczające do określenia reżimu przepływu. Obliczenie prędkości ruchu dla danej nadwyżki ciśnienia wg wzorów stosowanych dla obydwu rodzajów przepływu z wykorzystaniem własności płuczki oraz geometrii przewodu i otworu, ich porównanie i przyjęcie wartości mniejszej daje podstawę do właściwej oceny.

Do obliczenia maksymalnej prędkości wyciągania przewodu z zamkniętym dolnym końcem w warunkach występowania przepływu burzliwego po przekształceniu wzoru podanego w pracy [2] zastosowano poniższy wzór

$$V_p = A \cdot 1,8 \sqrt{\frac{\Delta p_h}{\eta^{0,21} \rho^{0,806}}}, \quad \text{m/s} \quad (2)$$

gdzie:

- $A$  – współczynnik uwzględniający geometrię przestrzeni pierścieniowej otworu; wartość tego bezwymiarowego współczynnika określa się, wykorzystując tabelę 1;
- $\Delta p_h$  – nadwyżka ciśnienia hydrostatycznego płuczki w czasie wiercenia lub przyrost ciśnienia słupa płuczki podczas zapuszczania przewodu, MPa/1000 m;
- $\eta$  – lepkość plastyczna płuczki, Pa·s;
- $\rho$  – gęstość płuczki, kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 1**

Współczynnik  $A$  zależny od wymiarów przewodu wiertniczego i otworu

Średnica otworu, m, cal	0,159 6,25"	0,216 8,5"	0,254 10"	0,311 12,25"
Średnica przewodu, m, cal				
0,089 3,5"	17,95	44,62	53,51	–
0,1143 4,5"	–	23,93	43,46	–
0,127 5"	–	20,12	33,79	60,36

Wyniki obliczeń zalecanej maksymalnej prędkości wyciągania przewodu dla dwóch wartości nadwyżki ciśnienia hydrostatycznego przedstawiono w tabeli 2. W obliczeniach wykorzystano współczynnik  $A$ , który odnosi się do wymiarów typowego przewodu o danej średnicy, typowego dolnego zestawu przewodu BHA (*bottom hole assembly*), lepkości plastycznej płuczki  $\eta = 0,018 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

**Tabela 2**

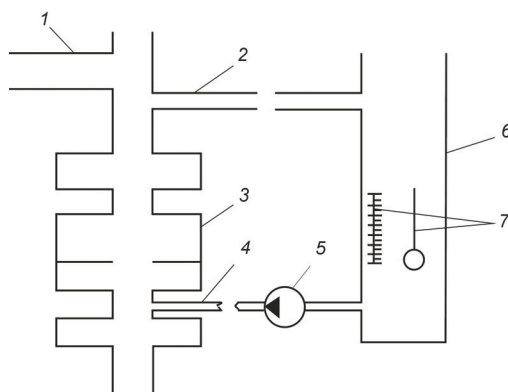
Prędkość maksymalna wyciągania przewodu o średnicy 0,089 m ( $3\frac{1}{2}$ " ),  
0,1143 m ( $4\frac{1}{2}$ " ) i 0,127 m (5")

Średnica otworu, m		0,159			0,216			0,254			0,311		
Gęstość płuczki, $\text{kg/m}^3$													
Średnica przewodu, m	Nadwyżka ciśnienia, MPa/1000 m	1200	1400	1600	1200	1400	1600	1200	1400	1600	1200	1400	1600
0,089	0,5	0,82	0,76	0,72	2,04	1,89	1,79	2,44	2,27	2,15	–	–	–
	1,0	1,20	1,12	1,05	2,98	2,78	2,63	3,58	3,34	3,13	–	–	–
0,1143	0,5	–	–	–	1,09	1,02	0,96	1,98	1,85	1,74	–	–	–
	1,0	–	–	–	1,60	1,49	1,41	2,91	2,71	2,56	–	–	–
0,127	0,5	–	–	–	0,91	0,85	0,80	1,53	1,43	1,35	2,74	2,56	2,41
	1,0	–	–	–	1,34	1,25	1,18	2,26	2,11	1,98	4,03	3,76	3,55

Szczególną uwagę należy także zwrócić na zapuszczanie kolumny przewodu, aby nie dopuścić do szczelinowania skał na skutek udaru hydraulicznego i do możliwości migracji małej nawet poduszki gazu do otworu. Gdy kolumna obciążników przechodzi przez poduszkę gazową, jej długość bardzo zwiększa się, powodując zmniejszenie ciśnienia dennego i w następstwie tego przyływ do otworu. Powstanie udarów ciśnienia podczas zapuszczania przewodu lub kolumny rur okładzinowych do otworu w warunkach otworów wysokotemperaturowych jest bardziej prawdopodobne w przypadku płuczki na bazie wody niż płuczki na bazie ropy. W pierwszym przypadku płuczka ma tendencję do dehydratacji i zagęszczania, dlatego powstający osad filtracyjny wywołuje działanie tłoka przy ruchu rur w dół lub w górę. Płuczka na bazie ropy pozostaje rzadka i ma małą lepkość w zakresie wyższych temperatur, np. ( $190\div 210^\circ\text{C}$ ). Podczas wykonywania tych operacji w otworach kierunkowych lub horyzontalnych ostrożność i stosowanie się do zaplanowanych procedur są nieodzowne. Podobnie jest przy wierceniach z podciśnieniem UBD (*underbalanced drilling*). Stosowanie górnego napędu jest także czynnikiem, który powinien być uwzględniony w procedurach dotyczących opanowywania erupcji płynu złożowego. Wykonywanie OWZ pod ciśnieniem stwarza dodatkowe zagrożenia, ale z uwagi na mniejszą prędkość przewodu zmiany ciśnienia hydrodynamicznego wywołane tym ruchem mają mniejsze znaczenie.

#### 4. WYKORZYSTANIE SPRZĘTU KONTROLNO-POMIAROWEGO

Bez metody pomiaru dopełniania otworu płuczka, załoga nie ma możliwości właściwego przeciwdziałania powstaniu przyływu podczas OWZ. Podczas OWZ objętość płuczki zatłoczonej lub wypływającej jest monitorowana najczęściej przy pomocy zbiornika marszowego (rys. 3). Otwór powinien być stale pełny przy wyciąganiu przewodu lub wtedy, gdy nie przyjmuje właściwej ilości płuczki. Przyływ płynu złożowego do otworu powoduje, że otwór wypełnia się i nie przyjmuje obliczonej ilości płuczki, która miała skompensować wyporność wyciągniętego przewodu. W pewnych sytuacjach następuje wypływ z otworu. Jeżeli otwór nie przyjmuje właściwej ilości płuczki, przewód powinien być z powrotem zapuszczony do dna i po zamontowaniu graniatki rozpoczęta cyrkulacja. Podobnie należy postąpić, gdy brak jest wystarczającej objętości płuczki do uzupełnienia otworu, przy czym w razie braku w przewodzie zaworu zwrotnego, należy przewód uzbroić w wewnętrzną głowicę przeciwerupcyjną.



**Rys. 3.** Typowy układ zbiornika marszowego płuczki: 1 – odlewa, 2 – linia powrotna, 3 – zestaw głowic przeciwerupcyjnych, 4 – linia dopełniania, 5 – pompa wirowa, 6 – zbiornik marszowy, 7 – miernik poziomu płuczki

Porównując obliczoną objętość wypartej płuczki z rzeczywistą objętością płuczki w zbiorniku marszowym, można wykryć przyływ płynu złożowego z formacji lub zanik płuczki w otworze. Zaleca się, aby objętość płuczki w zbiorniku marszowym (zbiorniku o małej pojemności, zazwyczaj 10 m<sup>3</sup>) była rejestrowana i porównywana co każde pięć pasów rur płuczkowych, dwa pasy rur płuczkowych grubościennych i co każdy pas obciążników. Kształt karty do zbiornika marszowego powinien ułatwiać i upraszczać zbieranie danych ze zbiornika marszowego i monitorowanie procesu. Wykorzystanie licznika suwów pompy tłokowej jest także metodą pomiaru dopełniania otworu. Współczesna aparatura kontrolno-pomiarowa instalowana na wiertni jest podstawowym narzędziem pomocnym w monitorowaniu stanu ciśnień na dnie otworu.

Erupcje otwarte – podobnie jak wiele katastrof – najczęściej nie są losowym wypadkiem, ale w znacznym stopniu wynikają z praktyk i zwyczajów panujących w operacjach przemysłowych. Poleganie na sukcesach z przeszłości zamiast na rzetelnych procedurach inżynierskich opierających się na przeprowadzonych doświadczeniach i ekspertyzach ma-

jących na celu wyjaśnienie, dlaczego układy nie działają zgodnie z wymaganiami, prowadzi do powstania zdarzeń niebezpiecznych. Ponadto istnienie barier organizacyjnych uniemożliwiających skuteczną wymianę informacji na temat najistotniejszych problemów dotyczących bezpieczeństwa oraz utrudniających fachową dyskusję pośrednio powoduje nieprzestrzeganie zasad bezpieczeństwa.

Zmiany ciśnienia hydrodynamicznego są trudniej sterowalne. Istnieją próby stosowania przeciwcisnienia u wylotu przestrzeni pierścieniowej w celu ułatwienia sterowania ciśnieniem dennym, umożliwiając w ten sposób bardzo małą nadwyżkę ciśnienia dennego nad ciśnieniem złożowym. Dzięki temu zmniejsza się uszkodzenie strefy przyodwiertowej, zapobiega się zanikom płuczki lub przyplływom płynu złożowego do otworu oraz zwiększa się prędkość wiercenia. Zastosowanie układów mechaniczno-elektronicznych do wywołania przeciwcisnienia daje możliwość realizacji najszybszej odpowiedzi na zmieniające się warunki wiercenia otworu bez przerywania wiercenia.

## 5. WNIOSKI

- Powstanie erupcji płynu złożowego w wiertnictwie podczas operacji wyciągania-zapuszczania przewodu wiertniczego wynika na ogół ze zbyt dużej prędkości przewodu.
- Poważny udział w wystąpieniu trudności podczas operacji wyciągania-zapuszczania ma brak wykształcenia i zrozumienia zjawisk występujących w otworze. Powstają one również albo w wyniku zaniedbania właściwego dopełniania otworu płuczka, albo w rozpoznaniu, że otwór jest niewłaściwie dopełniany.
- Ocena ciśnienia hydrodynamicznego i prędkości krytycznej przewodu wymaga uwzględnienia wielu czynników mających swe źródło w geologii złoża, technologii wiercenia i konstrukcji przewodu.

## LITERATURA

- [1] Bourgyone A.T. Jr: *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook, 1986
- [2] Burkhardt J.A. Jr: *Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement*. JPT, June 1961
- [3] Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzycki M.: *Analiza zmian ciśnień w otworach naftowych podczas dowiercania warstw perspektywicznych w obszarze Przedgórze Karpat*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 18/1, 2001
- [4] Ilskij A.L.: *Burovyje masziny, mechanizmy i sooruzhenia*. Moskwa, Nedra 1967
- [5] Leonow Je.G.: *Gidraeromechanika v burenii*. Moskwa, Nedra 1987
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w zakładach górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi, Dz.U. Nr 109, poz. 961
- [7] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 18/1, 2001
- [8] Żupnik A., Marciński J., Dybaś Z.: *Wykrywanie erupcji wstępnej w otworach kierunkowych i poziomych*. 12 Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna WWNiG AGH „Nowe Metody i Technologie w Geologii Naftowej, Wiertnictwie, Eksploatacji Otworowej i Gazownictwie”, t. II, Kraków 21–22 czerwca 2001