

**Stanisław Dubiel\*, Jan Ziaja\***

**IDENTYFIKACJA PRZYCZYN  
DOPŁYWU GAZU ZIEMNEGO DO OTWORU  
W ZALEŻNOŚCI OD WARUNKÓW CIŚNIENIOWYCH  
DOWIERCANIA ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW\*\***

**1. WSTĘP**

W trakcie dowiercania złóż węglowodorów istotnym zadaniem jest zachowanie bezpieczeństwa prac dla załogi, środowiska naturalnego oraz sprzętu technicznego. Zadanie to można byłoby w dużej mierze zrealizować przez stosowanie płuczki wiertniczej o dużej gęstości, gdyby nie konieczność ochrony pierwotnej przepuszczalności skał zbiornikowych i zasobów węglowodorów oraz dążenie do uzyskiwania wiarygodnych informacji o parametrach złożowych.

Duże znaczenie w zakresie bezpieczeństwa prac ma dobór schematu orurowania otworu wiertniczego oraz jego wyposażenia przeciw erupcyjnego, a także parametrów reologicznych płuczki wiertniczej i prędkości ruchu rurami w otworze wiertniczym.

W celu zapobiegania uszkodzeniu przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przotworowej, oprócz doboru rodzaju płuczki i jej parametrów, istotna jest również kontrola wielkości zmian na spodzie otworu wiertniczego hydrodynamicznego ciśnienia słupa płuczki, w poszczególnych etapach prac wiertniczych. Nadmierny wzrost tego ciśnienia może doprowadzić do hydraulicznego szczelinowania skał zbiornikowych i ucieczki płuczki wiertniczej w te skały, a następnie nie kontrolowany dopływ węglowodorów do otworu [1–5].

Informacje o parametrach złożowych uzyskuje się na podstawie wyników pomiarów aparaturą kontrolno-pomiarową w postaci laboratorium polowego (np. firm: Martin Decker Totco, Swaco-Geograph, Geoservices, Drill-Lab, Datawell, Data-Log czy Dresser Atlas) oraz wyników badań rurowym próbnikiem złoża [5, 9].

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych WVNIG AGH

## 2. ZASADY STOSOWANIA ORAZ WADY I ZALETY POSZCZEGÓLNYCH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH DOWIERCANIA ZŁÓŻ WĘGŁOWODORÓW

Stosowane w wiertnictwie naftowym rozwiązania technologiczne dowiercania złóż węglowodorów oparte są przede wszystkim na relacji między hydrostatycznym lub hydrodynamicznym ciśnieniem słupa płuczki w otworze wiertniczym a ciśnieniem złożowym.

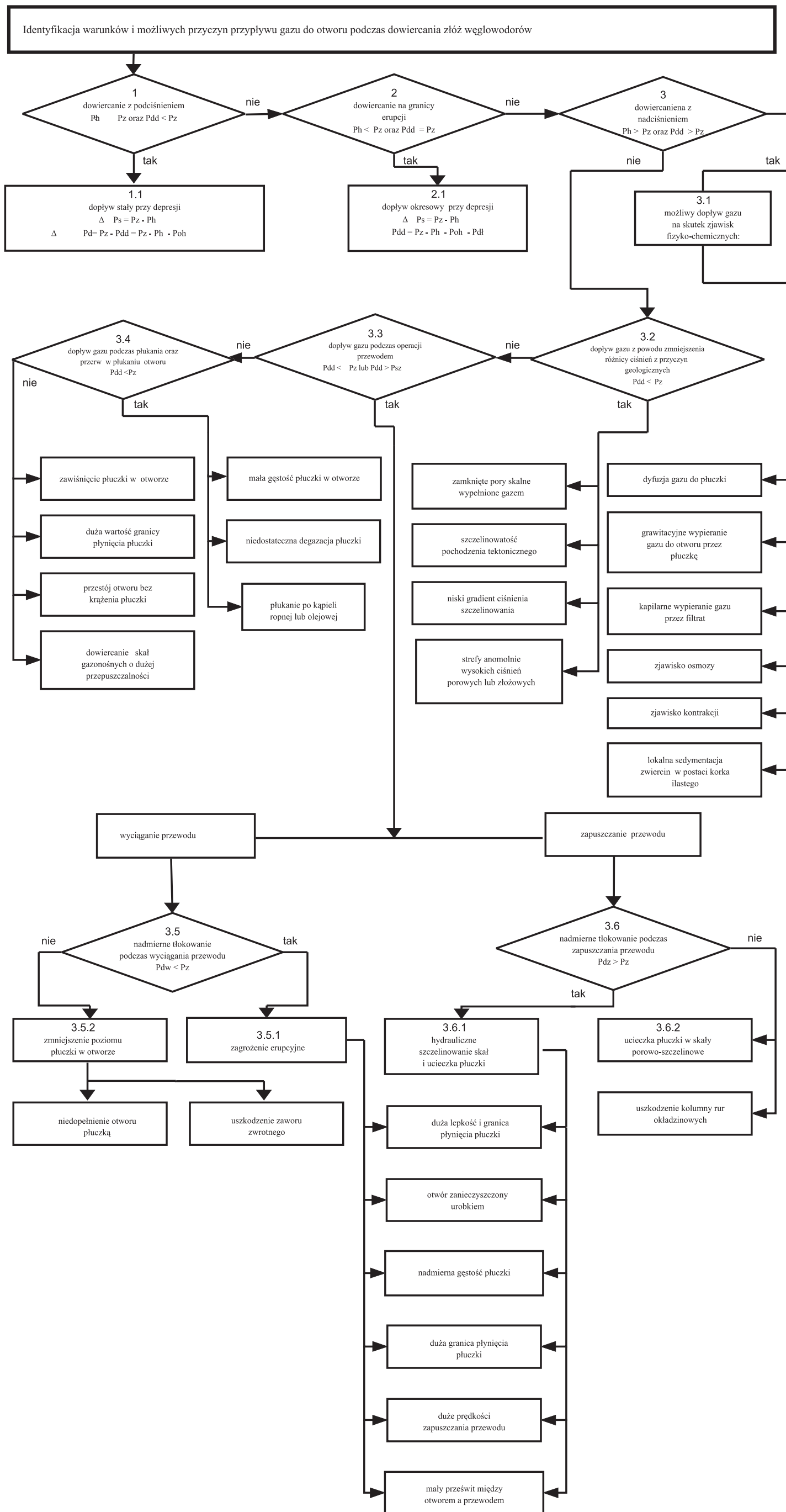
Na tej podstawie rozróżnia się dowiercanie złóż węglowodorów w warunkach:

- 1) podciśnienia (depresji ciśnienia), tzw. UBD (*underbalanced drilling*), i wówczas zarówno statyczne, jak i dynamiczne ciśnienie słupa płuczki w otworze jest mniejsze od ciśnienia złożowego;
- 2) równowagi ciśnienia dynamicznego i złożowego (na granicy erupcji wstępnej);
- 3) nadciśnienia (represji ciśnienia) w otworze wiertniczym.

W pierwszym przypadku możliwy jest ciągły dopływ węglowodorów do otworu wiertniczego (rys. 1 na wklejce, poz. 1.1) i mieszanie się z płuczką oraz wypływ tej mieszaniny na powierzchnię. Toteż wymagana jest przy tym hermetyzacja wylotu otworu głowicą obrotową oraz oddzielenie węglowodorów od płuczki przy użyciu specjalnego separatora [2]. Należy zauważyć, że nagazowanie płuczki gazem ziemnym jest zjawiskiem niekorzystnym ze względu na możliwość tworzenia się poduszek gazowych, natomiast zawartość ropy w płuczce jest zjawiskiem zdecydowanie korzystnym, gdyż zwiększa jej właściwości smarne, powodując zmniejszenie sił tarcia i oporów hydraulicznych jej przepływu.

Dowiercanie z podciśnieniem zalecane jest w przypadku złóż ropy naftowej o dobrze rozpoznanych warunkach złożowych oraz o niskim gradiencie ciśnienia złożowego ( $G_z < 0,01$  MPa/m). Dużą zaletą tej metody jest dobra ochrona przed uszkodzeniem przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyotworowej, a także osiąganie znacznie większej mechanicznej prędkości wiercenia niż w trzecim przypadku. Wadą jest m.in. większe zagrożenie pożarowe.

W drugim przypadku, z powodu okresowego dopływu węglowodorów do otworu (rys. 1, poz. 2.2), a tym samym, dużego ryzyka wystąpienia erupcji węglowodorów, wymagana jest pełna kontrola procesu wiercenia aparaturą kontrolno-pomiarową [9] oraz hermetyzacja wylotu otworu wiertniczego głowicą obrotową. Aby uzyskać równowagę ciśnień na dnie otworu, realizuje się przy tym dławienie wypływu płuczki z otworu podczas urabiania skały zbiornikowej. W tym przypadku technologicznym szczególną ostrożność należy zachować podczas operacji dźwigowych przewodem wiertniczym oraz w czasie koniecznego wstrzymywania krążenia płuczki w otworze wiertniczym, gdyż wówczas ciśnienie denne nie równoważy ciśnienia złożowego. Zaleca się stosowanie takiego dowiercania złóż o częściowo rozpoznanych warunkach złożowych, charakteryzujących się stosunkowo małą wydajnością. Możliwa jest w tych warunkach znaczna ochrona pierwotnej przepuszczalności skał zbiornikowych przed uszkodzeniem przez fazę stałą z płuczki oraz filtrat płuczki, a także duża wiarygodność wskazań aparatury kontrolno-pomiarowej i wyników badań rurowym próbnikiem złoża [5]. Również w tych warunkach uzyskuje się większą mechaniczną prędkość wiercenia niż w przypadku trzecim. Przypadek ten jest powszechnie stosowany podczas poszukiwania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego, gdyż umożliwia on uzyskanie znacznego bezpieczeństwa prac wiertniczych w przypadkach występowania



**Rys. 1.** Schemat blokowy intensyfikacji warunków i przyczyn dopływu gazu ziemnego do otworu wiertniczego:  $p_z$  – ciśnienie złożowe [Pa],  $p_d$  – ciśnienie denne [Pa],  $p_h$  – ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki w otworze wiertniczym [Pa],  $p_{dd}$  – ciśnienie hydrodynamiczne słupa płuczki w otworze (krążenie płuczki, ruch przewodem), w przypadku zapuszczania przewodu wynosi:  $p_{dd} = p_{dz}$ , a w przypadku wyciągania przewodu  $p_{dd} = p_{dw}$  [Pa],  $p_{oh}$  – ciśnienie potrzebne na pokonanie oporów hydraulicznych przepływu płuczki w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego podczas jej prawego obiegu [Pa],  $p_{dl}$  – ciśnienie dławienia wypływu płuczki na wylocie otworu wiertniczego [Pa],  $G_z$  – gradient ciśnienia złożowego [MPa/m],  $G_{sz}$  – gradient ciśnienia szczelinowania skał [MPa/m],  $p_{sz}$  – ciśnienie hydraulicznego szczelinowania skał [Pa]

anomalnie wysokiego gradientu ciśnienia złożowego ( $G_z > 0,0125$  MPa/m). W tym przypadku, szczególną uwagę zwraca się na dobór rodzaju oraz parametrów technologicznych płuczki [8].

Takie dowiercanie ma następujące wady:

- występujące często duże uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w znacznej odległości od ściany otworu, na skutek wnikania w nie cząstek stałych z płuczki, a zwłaszcza filtratu z płuczki [8];
- mała wiarygodność wskazań aparatury kontrolno-pomiarowej oraz wyników badań rurowym próbnikiem złoża [9];
- znacznie mniejsza mechaniczna prędkość wiercenia w porównaniu z poprzednimi przypadkami;
- większy koszt technologii płuczkowych;
- duże ryzyko hydraulicznego szczelinowania skał, zwłaszcza podczas zapuszczania do otworu przewodu wiertniczego lub rur okładzinowych i związane z tym bardzo duże niebezpieczeństwo ucieczki płuczki;
- konieczność stosowania bardziej skomplikowanego i droższego schematu orurowania otworu wiertniczego niż w poprzednich przypadkach, w celu zapobiegania erupcjom pozarurowym.

### **3. SCHEMAT BLOKOWY IDENTYFIKACJI WARUNKÓW I PRZYCZYN DOPIŁYWU GAZU ZIEMNEGO DO OTWORU WIERTNICZEGO**

Przyptyw węglowodorów do otworu wiertniczego wywołuje zmianę parametrów płuczki wiertniczej (gęstości, lepkości, wytrzymałości strukturalnej, granicy płynięcia), a także wyparcie płuczki z otworu. Niekontrolowany przyptyw węglowodorów do otworu, a zwłaszcza gazu ziemnego, jeżeli nie zostanie w krótkim czasie skutecznie opanowany [7], doprowadzić może do wyrzucenia płuczki z otworu, w następstwie czego może przekształcić się w niekontrolowaną erupcję.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy identyfikacji warunków i możliwych przyczyn przyptywu węglowodorów do otworu wiertniczego podczas przewiercania warstw ropo- i gazonośnych. W schemacie (rys. 1) wyszczególniono omawiane trzy rozwiązania technologiczne (poz. 1, 2 i 3), przy czym tylko w przypadku trzeciego rozwiązania konieczne jest dokonanie szczegółowej identyfikacji warunków ciśnieniowych i przyczyn dopływu gazu ziemnego do otworu.

Uwzględniono przy tym trzy podstawowe operacje technologiczne:

- 1) wyciąganie przewodu,
- 2) zapuszczanie przewodu,
- 3) płukanie otworu.

**Zjawiska fizyczno-chemiczne**, zachodzące w obrębie strefy przydennej otworu wiertniczego (wymienione na rys. 1, poz. 3.1), mogą spowodować przyptyw gazu do otworu także w warunkach dużego przeciwciśnienia wywieranego podczas dowiercania złoża węglowodorów.

Dyfuzyjny przyptyw gazu ziemnego do otworu jest uwarunkowany jego koncentracją w warstwie skały zbiornikowej i w płuczce wypełniającej otwór. Przyptyw ten jest proporcjonalny do czasu przerwy w płukaniu otworu. Po długiej przerwie w płukaniu otworu może w takich warunkach nastąpić samoczynny wypływ płuczki z otworu.

Grawitacyjne oddziaływanie dwóch różnych płynów (płuczki i gazu ziemnego) w jednym układzie hydrodynamicznym, składającym się z otworu i systemu szczelin o rozwarłości około 1 mm i skierowanych prawie pionowo, może doprowadzić do przemieszczania się gazu ziemnego ze skały zbiornikowej do otworu. Zachodząca wówczas w tym systemie grawitacyjna segregacja płynów powoduje wnikanie płuczki lub jej filtratu w szczeliny skały zbiornikowej, zaś ze skały zbiornikowej następuje przyptyw gazu ziemnego do otworu. Przyptyw ten ustaje z chwilą utworzenia się na ścianie otworu nieprzepuszczalnego osadu ilowego z płuczki.

Kapilarne wypieranie gazu ziemnego ze skały strefy przyotworowej przez filtrat z płuczki (woda słodka) polega na zróżnicowanym zwilżaniu powierzchni skały przez wodę i gaz, a w wyniku czego występuje ciśnienie kapilarne skierowane w stronę mniej zwilżającej fazy. Piaskowce skały zbiornikowej są najczęściej hydrofilne (mały kąt zwilżania), więc wypadkowa ciśnienia kapilarnego skierowana jest w stronę fazy gazowej.

W wyniku osmozy cząsteczki filtratu płuczkowego przenikają z otworu wiertniczego do zawodnionej, dolnej części warstwy gazonośnej, a cząsteczki gazu ziemnego występującego w górnej części tej warstwy, przenikają do płuczki w otworze. Zjawisko osmozy może być przyczyną dopływu gazu do otworu, bez względu na wielkość nadwyżki ciśnienia słupa płuczki nad ciśnieniem złożowym.

Przyczyną przyptywu gazu ziemnego do otworu może być występowanie zjawiska kontrakcji układu ił – woda, spowodowane głównie przez adsorpcję cząstek wody przylegających siłami molekularnymi do powierzchni cząstek skał ilastych. Zjawisko pęcznienia łu, które jest także uwarunkowane adsorpcją wody, spowodowane jest wzrostem objętości układu ił – woda. Na skutek zmniejszenia absolutnej (sumarycznej) objętości układu ił – woda w zamkniętej przestrzeni, następuje zmniejszenie ciśnienia (depresja), które powoduje zasysanie gazu do otworu ze skał gazonośnych strefy przyotworowej. Zjawisko kontrakcji układu ił – woda i związane z tym zmniejszenie ciśnienia dennego oraz przyptyw do otworu gazu ziemnego, może nastąpić jedynie przy zatrzymaniu krążenia płuczki, ponieważ podczas krążenia płuczki nie ma warunków dla powstania podciśnienia.

W wyniku przyptywu do otworu wody złożowej o dużej mineralizacji (solanki), pod wpływem zjawiska koagulacji, może nastąpić uszkodzenie osadu ilowego na ścianie otworu, co sprzyja również przyptywowi gazu ziemnego ze skały zbiornikowej do otworu.

Sedymentacja zwiercin na dnie otworu prowadzi do powstania korka. Im dłuższy jest ten korek, tym bardziej odcina on ciśnienie słupa płuczki w otworze i tym większe jest zmniejszenie ciśnienia płuczki na dnie otworu wiertniczego.

**Przyczyny geologiczne** (rys. 1, poz. 3.2) są zwykle trudne do identyfikacji. Gaz ziemny wypełniający zamknięte pory skalne, niebędąc wypierany przez filtrat płuczkowy ze strefy przyotworowej, zostaje uwolniony przez narzędzie wierzące w wyniku mechanicznego niszczenia struktury skały i nagazowuje płuczkę zmniejszając jej gęstość, a tym samym ciśnienie, jakie wywiera ona w otworze. Zaburzone tektonicznie strefy gazonośnej charakte-

ryzują się intensywną szczelinowatością. Może być to przyczyną ucieczek płuczki, a następnie przyływu węglowodorów do otworu. W przypadkach skał gazonośnych charakteryzujących się niskim gradientem ciśnienia szczelinowania hydraulicznego ( $G_{sz} < 0,014$  MPa/m), mechaniczne rozwarstwienie tych skał może nastąpić już w przypadku niewielkiego przyrostu ciśnienia płuczki. Ucieczka płuczki w wytworzone szczeliny powoduje wtedy wystąpienie zagrożenia erupcyjnego. Występowanie stref o anomalnie wysokim ciśnieniu złożowym lub porowym, przy niedostatecznym rozeznaniu warunków geologiczno-złożowych danego rejonu wierceń i przy stosowaniu standardowej technologii wiercenia, może spowodować naruszenie równowagi ciśnienia dennego i wywołać przyływ węglowodorów do otworu wiertniczego [7].

**Dopływ gazu ziemnego do otworu wiertniczego podczas operacji technologicznych przewodem** (poz. 3.3) może być spowodowany obniżeniem ciśnienia słupa płuczki w otworze poniżej ciśnienia złożowego na skutek tłokowania. Efekt tłokowania przewodem jest proporcjonalny do prędkości ruchu przewodu oraz gęstości, lepkości i granicy płynięcia płuczki oraz stopnia zanieczyszczenia otworu urobkiem, a odwrotnie proporcjonalny do prześwitu między ścianą otworu a przewodem (poz. 3.5.1 oraz 3.6.1). Częstą przyczyną zmniejszenia ciśnienia płuczki jest obniżenie poziomu płuczki w otworze, spowodowane jej ucieczką lub też brakiem systematycznego dopełniania otworu płuczką podczas wyciągania przewodu wiertniczego. Techniczno-technologiczne przyczyny ucieczki płuczki to niekiedy uszkodzenie rur okładzinowych lub wadliwe zacementowanie tych rur. Jednak najczęściej jest to hydrauliczne szczelinowanie skał w nieorurowanym odcinku otworu, spowodowane albo nieumiejętnym uruchamianiem pomp płuczkowych, przy wznawianiu krążenia płuczki charakteryzującej się dużą granicą płynięcia i wytrzymałością strukturalną, albo też częściej zapuszczaniem do otworu przewodu wiertniczego przy zbyt dużych prędkościach. W określonych warunkach otworowych, przemieszczanie osiowe kolumny przewodu wiertniczego w środowisku płuczki spowoduje podczas zapuszczania przewodu zagrożenie erupcyjne (3.5.1), natomiast podczas zapuszczania przewodu – hydrauliczne szczelinowanie skał i ucieczkę płuczki (3.6.1), a następnie dopływ węglowodorów do otworu wiertniczego. Niebezpieczne zmiany ciśnienia dennego mogą powstać także w przypadku oblepiania się świdra urobkiem i zatkania jego kanałów płuczkowych oraz gdy kolumna przewodu wiertniczego wyposażona jest w stabilizatory, obciążniki ponadwymiarowe lub gumowe pierścienie ochronne.

**Przyływ gazu ziemnego podczas płukania otworu oraz przerw w płukaniu otworu** (rys. 1, poz. 3.4).

W wyniku tworzenia się żelowej struktury płuczki wiertniczej, odznaczającej się dużą wartością lepkości i granicy płynięcia oraz wytrzymałości strukturalnej, może nastąpić obniżenie ciśnienia hydrostatycznego płuczki wywieranego na warstwę gazonośną spowodowane zawiśnięciem płuczki w otworze. Mianowicie, występujące na styku płuczki ze ścianą otworu i zewnętrzną ścianą przewodu wiertniczego siły tarcia statycznego powodujące częściowe podtrzymywanie ciężaru słupa płuczki, zwane zawiśnięciem płuczki w przestrzeni pierścieniowej otworu, w wyniku czego ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki zmniejsza się.

Jeżeli otwór wypełniony jest płuczką wiertniczą o dużej filtracji, to podczas przerwy w płukaniu otworu może nastąpić odfiltrowanie z niej wody w skały strefy przyotworowej.

Wówczas, pomimo utrzymania stałego jej poziomu w otworze, wywierane przez słup płuczki na dno otworu ciśnienie hydrostatyczne jest zazwyczaj mniejsze. W określonych warunkach dużej filtracji płuczki lub jej ucieczki oraz małych wielkości ilorazu między średnicą otworu a przewodu wiertniczego, duży wzrost wytrzymałości strukturalnej płuczki może spowodować całkowite zawiśnięcie słupa płuczki, pozostawionej w bezruchu w przestrzeni pierścieniowej otworu.

Dowiercanie skał gazonośnych o dużej przepuszczalności może prowadzić do intensywnego dopływu gazu ziemnego do otworu, zarówno podczas płukania otworu, jak i podczas przerw w krążeniu płuczki w otworze, i może być przyczyną dużego zagrożenia erupcyjnego.

Szczegółową analizę warunków otworowych pod kątem zagrożenia erupcyjnego występującego podczas dowiercania złóż węglowodorów omówiono w pracy [7].

#### 4. WNIOSKI

- 1) W wyniku wyboru błędnej technologii dowiercania oraz braku bieżącej kontroli zmian wartości ciśnienia dennego istnieje duże ryzyko wystąpienia takich awarii wiertniczych jak: otwarte lub pozarurowe erupcje węglowodorów, ucieczki płuczki wiertniczej, przychwycenia przewodu wiertniczego oraz uszkodzenia rur okładzinowych. Awarie te stanowią często ogromne zagrożenie dla życia ludzi i środowiska naturalnego [6] oraz bardzo duże straty finansowe, a także niekiedy straty zasobów węglowodorów. Zagrożenia te są szczególnie realne, gdy złoża węglowodorów zawierają gazy kwaśne, tj. siarkowodór ( $H_2S$ ) oraz dwutlenek węgla ( $CO_2$ ) i charakteryzują się anomalnie wysokim gradientem ciśnienia złożowego ( $G_z > 0,0125$  MPa/m).
- 2) Bezpieczeństwo prac wiertniczych i eksploatacyjnych na złożach węglowodorów ma bardzo mocne oparcie w przepisach prawnych [10].
- 3) Opracowany schemat blokowy przedstawia analizę warunków i przyczyn dopływu gazu ziemnego do otworu wiertniczego podczas dowiercania złóż węglowodorów, umożliwiając przewidywanie niebezpieczeństwa wystąpienia awarii lub komplikacji wiertniczych.

#### LITERATURA

- [1] Dubiel S.: *Analiza warunków wiercenia otworu pod kątem ujawnienia zagrożenia erupcyjnego*. Kwartalnik AGH Górnictwo, z. 2, 1995
- [2] Dubiel S., Chrząszcz W., Ryzcniak M.: *Problemy dowiercania warstw perspektywicznych w otworach naftowych*. Kraków, UWND AGH 2001
- [3] Dubiel S.: *Decyzje technologiczne w zakresie identyfikacji i likwidacji zagrożenia erupcyjnego w procesie dowiercania do złóż gazu ziemnego*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 14, 1997
- [4] Dubiel S.: *Analiza zmian naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych miocenu w strefie przyodwiertowej na podstawie wyników badań próbnikami złoża*. Kraków, Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 19/1, 2002



- [5] Dubiel S., Chrząszcz W., Rzycznik M.: *Przemysłowe przykłady oceny warunków złożowych warstw perspektywicznych badanych rurowymi próbnikami złoża*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 19/1, 2002
- [6] Dubiel S., Macuda J., Jamrozik A.: *Ocena wpływu technologii stosowanych w wiertnictwie naftowym na środowisko gruntowo-wodne*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 20/2, 2003
- [7] Dubiel S., Ziaja J.: *Schematy blokowe analizy warunków otworowych podczas dowiercania złóż węglowodorów oraz wyboru metody likwidacji erupcji wstępnej*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 23/1, 2006
- [8] Falkowicz S., Dubiel S.: *Badanie wpływu płuczek wiertniczych na przepuszczalność skał miocenu autochtonicznego Przedgórze Karpat*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, 19/2, 2002
- [9] Materiały firmowe Datawell, Drill-Lab, Mud Logging Services. Wołomin, 1993
- [10] Ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. *Prawo Geologiczne i Górnicze* (Dz.U. z 2005 r., Nr 228, poz. 1947, stan prawny: 1 września 2005 r., 1 stycznia 2006 r. i 2 marca 2006 r.)