

Stanisław Dubiel*

PROCEDURY OPRÓBOWANIA ZŁÓŻ ROPY NAFTOWEJ PRÓBNIKAMI RUROWYMI W PROCESIE ICH DOWIERCANIA**

1. WSTĘP

W procesie poszukiwania i dowiercania złóż węglowodorów w profilu otworów naftowych wydziela się warstwy perspektywiczne, tj. zbudowane ze skał porowatych i przepuszczalnych nasyconych węglowodorami, stosując następujące metody:

- geologiczno-wiertnicze, oparte na obserwacji procesu wiercenia i wskazaniach aparatury kontrolno-pomiarowej rozmieszczonej na wierni (laboratoria polowe typu Geoservices, Drill Lab itp.) oraz na badaniach laboratoryjnych rdzeni wiertniczych;
- geofizyki wiertniczej (profilowanie otworu za pomocą sond);
- badania z wykorzystaniem rurowych próbników złoża zapuszczanych do otworu na przewodzie wiertniczym.

Na podstawie interpretacji wyników pomiarów uzyskanych dwoma pierwszymi metodami podejmuje się decyzje o konieczności badania rurowym próbnikiem złoża wydzielonej warstwy perspektywicznej. W zakresie oceny perspektywiczności danej warstwy określa się współczynnik porowatości skał zbiornikowych oraz ich litologię i nasycenie węglowodorami, a także wielkość ciśnienia złożowego, natomiast w zakresie oceny produktywności ustala się wskaźnik potencjalnego wydobycia płynu złożowego oraz przewodność hydrauliczną warstwy i efektywną przepuszczalność skał zbiornikowych, z uwzględnieniem jej zmian w skałach strefy przyotworowej pod wpływem mechanicznego oraz fizyczno-chemicznego oddziaływania płuczki.

W procesie dowiercania złóż węglowodorów rurowy próbnik złoża (RPZ) zwykle jest używany do opróbowania wydzielonych warstw perspektywicznych w nieorurowanych odcinkach otworu wiertniczego (rzadziej w orurowanych), w celu wykonania krótkotrwałych, jedno- lub dwucyklowych testów przyływu i odbudowy ciśnienia dennego. W wyniku użycia RPZ w nieorurowanych odcinkach otworu można uzyskać korzystne efekty ekono-

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Pracę wykonano w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH, Kraków

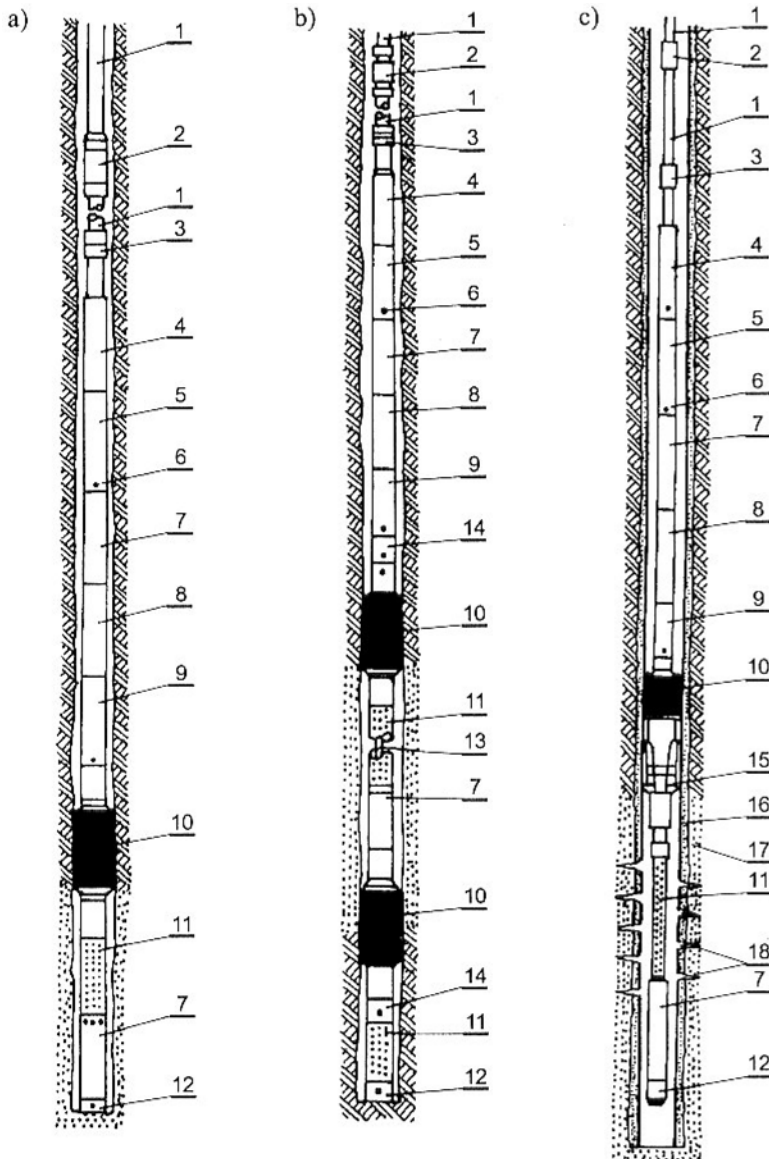
miczne, głównie poprzez wyeliminowanie operacji orurowania i uszczelniania rur okładzinowych oraz celowości wykonania zabiegu intensyfikacji przyływu płynu złożowego do otworu wiertniczego.

2. TECHNIKI POMIARU WYKONYWANEGO ZA POMOCĄ RUROWEGO PRÓBNIKA ZŁOŻA

Generalna zasada pomiaru RPZ w procesie dowiercania złóż ropy naftowej polega na wytworzeniu różnicy ciśnień (depresji ciśnienia) pomiędzy ciśnieniem złożowym a ciśnieniem w kolumnie próbnikowej, w celu wywołania krótkotrwałego przyływu płynu złożowego i pobrania reprezentatywnej jego próby, a także zarejestrowania krzywych zmian ciśnienia w okresie przyływu płynu złożowego i w okresie odbudowy ciśnienia dennego [1].

Podczas zapuszczania typowego zestawu próbnikowego do otworu wiertniczego (rys. 1a) zawór główny (5) jest zamknięty, toteż znajdująca się w otworze płuczka nie może wpływać do kolumny próbnikowej, lecz częściowo wypierana jest przez prześwit między niespęczonym uszczelniaczem (10) i ścianą otworu wiertniczego, a częściowo przepływa przez filtr (11) (z przestrzeni pod uszczelniaczem) i wyżej rozmieszczone elementy próbniaka i wypływa przez otworki zaworu wyrównawczo-obiegowego (6) do przestrzeni pierścieniowej nad uszczelniaczem. W ten sposób ogranicza się zjawisko tłokowania uszczelniaczem w otworze, które w skrajnym przypadku mogłoby doprowadzić do hydraulicznego szczelinowania skał płuczka wiertniczą w nieorurowanym odcinku otworu, ewentualnie do ucieczki płuczki w powstałe szczeliny albo do obwałowania otworu skał niestabilnych. W miarę zapuszczania część kolumny próbnikowej (od 20% do 50% jej całkowitej długości) wypełnia się cieczą przybitkową (płuczka, woda) w celu zmniejszenia wielkości początkowej depresji wywieranej na badaną warstwę.

Test przyływu. Po zapuszczeniu zestawu próbnikowego na spód otworu wiertniczego but (12) opiera się o dno otworu (rys. 1a i b) lub kotwicę szczękową (rys. 1c) i częścią ciężaru kolumny próbnikowej wywiera na ten zestaw nacisk osiowy o wartości od 70 kN do 140 kN. W wyniku tego nacisku zamyka się zawór obiegowo-wyrównawczy (6), a element gumowy uszczelniacza (10) spęcza się; dociskany jest on do ściany otworu wiertniczego i otwiera się zawór główny próbniaka, z pewnym opóźnieniem (od około 30 sekund do 150 sekund) w stosunku do momentu zapięcia uszczelniacza. Opóźnienie to znacznie ogranicza szkodliwe oddziaływanie siły naporu hydraulicznego słupa płuczki w przestrzeni pierścieniowej otworu na uszczelniacz i kotwicę rurową próbniaka (rys. 1, elementy 7, 11 i 12). W wyniku zapięcia uszczelniacza oraz otwarcia zaworu głównego opróbowana warstwa skał zbiornikowych zostaje oddzielona od ciśnienia słupa płuczki w otworze i połączona z wnętrzem kolumny. W ten sposób stworzone zostają warunki dogodne dla przyływu płynu złożowego do kolumny próbnikowej pod wpływem działającej różnicy ciśnienia złożowego i przeciwcisnienia w kolumnie próbnikowej (depresja ciśnienia). Wielkość przeciwcisnienia w kolumnie próbnikowej zależy od ciężaru właściwego i wysokości słupa cieczy przybitkowej, a także od oporów hydraulicznych przepływu płynu przez zwężkę wgłebną (rys. 1 – element 3).



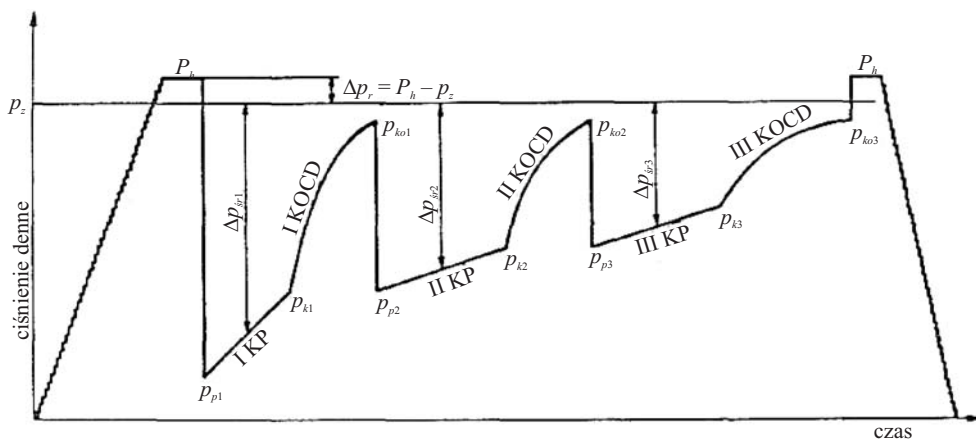
Rys. 1. Schemat standardowych zestawów RPZ firmy Halliburton [1]: a) zestaw do opróbowania warstwy w nieorurowanym odcinku otworu wiertniczego; b) zestaw do selektywnego opróbowania warstwy w nieorurowanym odcinku otworu wiertniczego; c) zestaw do opróbowania warstwy w otworze orurowanym: 1 – rury płuczkowe, 2 – zawór cyrkulacyjny, 3 – zwężka wgłębna, 4 – zawór okresowy, 5 – zawór główny, 6 – zawór obiegowo-wyrównawczy, 7 – osłona ciśnieniomierza, 8 – nożyce hydrauliczne, 9 – łącznik bezpieczeństwa, 10 – uszczelniacz cylindryczny, 11 – filtr rurowy, 12 – but, 13 – rurka wyrównywacza ciśnienia, 14 – łącznik wyrównywacza ciśnienia, 15 – kołtwica szczękowa, 16 – rura okładzinowa, 17 – płaszcz cementowy, 18 – otworki perforacyjne

Źródło: *Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services. World Oil 1974–1975*

W okresie przyływu płynu złożowego słup płynu w kolumnie próbnikowej wznosi się mniej lub bardziej intensywnie, wypierając z niej powietrze, a ciśnieniomierze wgłębne umieszczone w osłonach (7) (rys. 1) rejestrują krzywą przyływu. Wyływ powietrza z kolumny próbnikowej jest na powierzchni podstawowym objawem przyływu płynu złożowego, pod warunkiem, że uszczelniacz jest zapięty hermetycznie oraz że kolumna próbnikowa jest szczelna. Test przyływu w nieorurowanym odcinku otworu może trwać średnio od 30 do 50 minut.

Test odbudowy. W tym celu zamyka się zawór okresowy (sterowany np. obrotami kolumny w prawo) i odcina przyływ płynu złożowego do kolumny próbnikowej. Wówczas wartość ciśnienia dennego w przestrzeni pod zaworem okresowym i pod uszczelniaczem odbudowuje się, a ciśnieniomierze rejestrują krzywą odbudowy. Czas potrzebny na odbudowę ciśnienia dennego w nieorurowanym odcinku otworu może trwać średnio od 40 minut do 80 minut.

Odpinanie i wyciąganie próbnika. Jeżeli podczas opróbowania na wylocie kolumny próbnikowej stwierdzono objawy występowania węglowodorów, wówczas otwiera się zawór cyrkulacyjny (2) (rys. 1) (sterowany np. różnicą ciśnień cieczy w kolumnie i w przestrzeni pierścieniowej otworu) i w wyniku zatłaczania płuczki do przestrzeni pierścieniowej otworu wypiera się z kolumny próbnikowej przybitkę i płyn złożowy, określając przy tym ich objętość. Następnie kolumnę próbnikową podciąga się, aby uwolnić zestaw próbnika od nacisku osiowego. Wówczas zamyka się zawór główny oraz otwiera zawór obiegowo-wyrównawczy, co powoduje wyrównanie się ciśnień w przestrzeni nad uszczelniaczem i pod nim. Umożliwia to odkształcenie elementu gumowego i odpięcie uszczelniacza. Próbnik złoża można wówczas wyciągnąć na powierzchnię.



Rys. 2. Wykres ciśnieniomierza wgłębnego w przypadku trójcyklowego opróbowania poziomu skał zbiornikowych: p_z – ciśnienie złożowe; P_h – ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki; Δp_r – depresja słupa płuczki działająca na badany poziom; Δp_{sr1} , Δp_{sr2} , Δp_{sr3} – średnia wartość depresji dla I, II, III przyływu; I KOCD, II KOCD, III KOCD – pierwsza, druga i trzecia krzywa odbudowy ciśnienia dennego; p_{p1} , p_{p2} , p_{p3} , p_{k1} , p_{k2} , p_{k3} – ciśnienie odpowiednio w początkowym i końcowym punkcie pierwszego, drugiego i trzeciego okresu przyływu; p_{ko1} , p_{ko2} , p_{ko3} – ciśnienie w końcowym punkcie pierwszego, drugiego i trzeciego okresu odbudowy ciśnienia dennego

Źródło: [1]

W przypadku stosowania zestawu do selektywnego opróbowania (rys. 1b) wyrównanie ciśnień w przestrzeni nad górnym uszczelniaczem, między górnym i dolnym uszczelniaczem oraz pod dolnym uszczelniaczem, realizuje się przy użyciu wyrównywacza ciśnienia składającego się z rurki (13) i łącznika (14). W przestrzeni zamkniętej między zaworami głównym i okresowym (4) (jeśli w zestawie nie ma autoklawu) znajduje się próba płynu złożowego, którą przekazuje się do laboratorium w celu określenia jej składu chemicznego.

Testy wielocyklowe. Nowoczesne zestawy próbnikowe umożliwiają wykonanie wielocyklowego opróbowania warstwy skał zbiornikowych w wyniku użycia specjalnych zaworów okresowych, które mogą być wielokrotnie zamykane i otwierane. Cykl opróbowania składa się z okresu przyływu płynu złożowego do kolumny próbnikowej i z okresu odbudowy ciśnienia dennego, a cały proces wielocyklowego opróbowania składa się z realizowanych na przemian, następujących po sobie tych okresów. Wyniki wielocyklowego opróbowania (rys. 2) dostarczają wielu informacji złożowych, zwłaszcza dotyczących charakterystyki hydrodynamicznej i produkcyjnej badanej perspektywicznej warstwy skał zbiornikowych.

3. PROCEDURY KOMPLETOWANIA ZESTAWU PRÓBNIKOWEGO

RPZ składa się z wielu elementów zaworowych, pomiarowych, uszczelniających oraz rurowych o określonym przeznaczeniu technologicznym. Elementy te kompletuje się w zestawie próbnikowe (rys. 1).

Zestaw kompletuje się w zależności od występujących w otworze wiertniczym warunków geologiczno-technicznych i złożowych. Poszczególne elementy zestawu RPZ mają odpowiednie przeznaczenie technologiczne, określoną konstrukcję i zasadę działania.

Obecnie w Polsce do opróbowania perspektywicznych warstw skał zbiornikowych w otworach naftowych stosuje się następujące typy próbników amerykańskich [1, 2, 3, 4]:

- Standard firmy Halliburton,
- Ful-Flo firmy Halliburton,
- Inflatable firmy Baker-Lynes.

3.1. Zestawy próbnikowe firmy Halliburton typu Standard

Zależnie od konstrukcji otworu wiertniczego i warunków technicznych stosuje się trzy różne zestawy tego typu próbnika złoża, przedstawione na rysunku 1.

RPZ typu Standard firmy Halliburton o średnicy 5" (127 mm) przeznaczone są do opróbowania warstw perspektywicznych w następujących otworach wiertniczych:

- nieorurowanych, o średnicy nominalnej 216 mm i 311 mm;
- orurowanych kolumnami rur okładzinowych o średnicach 9 5/8" i 13 3/8".

Natomiast próbniki o średnicy 3 7/8" (98,425 mm) są stosowane w otworach:

- nieorurowanych o średnicy nominalnej 143 mm i 357 mm;
- orurowanych kolumnami rur okładzinowych o średnicach 6 5/8" i 7".

Mają one wytrzymałość na ciśnienie różnicowe do 60 MPa. Uszczelniacze (pakery) typu Standard przeznaczone są do uszczelniania warstw w otworach nieskawernowanych,

natomiast uszczelniacze typu RTTS służą do uszczelniania warstw udostępnionych przez perforację w kolumnach rur okładzinowych. W zestawie próbnika zapuszczonego do otworu nieorurowanego można dodatkowo stosować uszczelniacz wspomagający i dystrybutor ciśnienia. Ma to na celu zmniejszenie ciśnienia różnicowego na uszczelniaczu, co z kolei potrzebne jest do uszczelnienia w warstwach skał słabo zwięzłych oraz przy stosunkowo dużych różnicach ciśnień. Oprócz poprawy uszczelnienia ten dodatkowy zespół elementów do próbnika złoża typu Standard ułatwia odpięcie uszczelniaczy bez ich uszkodzenia.

Próbniki typu Standard przeznaczone są do wykonywania opróbowań dwucyklowych, tj. z dwoma okresami przepływu i dwoma okresami odbudowy ciśnienia dennego. W sytuacjach awaryjnych, po zakończeniu obu cykli opróbowania, zawór okresowy typu obrotowego może służyć jako zawór cyrkulacyjny. Ponadto mogą być one wyposażone w dwa odrębne zawory cyrkulacyjne, działające niezależnie od siebie. Nad i pod uszczelniaczem można wmontowywać łączniki bezpieczeństwa, służące do uwalniania górnej części zestawu próbnika od przychwyconej dolnej części z kotwicą rurową.

Dodatkowym wyposażeniem obowiązkowym są zwykle trzy manometry wgłębne, montowane w osłonach w kotwicy rurowej między nożycami hydraulicznymi a zaworem głównym oraz nad zaworem okresowym (sterowanym obrotami), odcinającym przepływ płynu do kolumny próbnikowej.

W otworach nieorurowanych zaleca się stosowanie:

- zestawu jednuszczelniaczowego o średnicy 5" lub 3 7/8" z kotwicą rurową, w warunkach otworowych, gdy nie ma potrzeby montowania uszczelniacza wspomagającego;
- zestawu jednuszczelniaczowego o średnicy 5" lub 3 7/8" z kotwicą rurową i uszczelniaczem wspomagającym z dystrybutorem (rozdzielaczem) ciśnienia, gdy jest to uwarunkowane stanem ściany otworu, wielkością depresji, a także zwięzłością skał badanej warstwy.

W otworach orurowanych zaleca się stosowanie zestawu jednuszczelniaczowego o średnicy 5" lub 3 7/8" z kotwicą szczękową lub uszczelniaczem typu RTTS, gdy uszczelniacz ten jest zapinany w kolumnie rur okładzinowych powyżej perforacji odcinka nieorurowanego lub nad likwidacyjnym korkiem cementowym. Zestaw ten stosuje się do opróbowania perspektywicznych warstw skał zbiornikowych, udostępnionych dzięki wykonanym perforacjom w celu uzyskania oceny hydrodynamicznej, a także do badań technicznych, np. szczelności korka cementowego lub rur okładzinowych. Szczególnie zalecane jest posługiwanie się takim zestawem w tych przypadkach, gdy odległość od buta kolumny rur okładzinowych do nieorurowanej warstwy nie jest większa niż kilkadziesiąt metrów, a ściana otworu wiertniczego nad tą warstwą jest skawernowana lub gdy nie wykonano profilowania XYZ.

3.2. Zestawy próbnikowe firmy Halliburton typu Ful-Flo

Kompletowanie zestawów RPZ typu Ful-Flo obejmuje następujące elementy składowe o specjalnym przeznaczeniu technologicznym:

- **Pojemnik na ciśnieniomierze wgłębne** (kvarcowe lub mechaniczne) – w zestawie tego próbnika o średnicy 3 7/8" jest on umieszczany poniżej uszczelniacza. Aby zapobiec uszkodzeniu ciśnieniomierzy podczas opróbowania połączonego z perforacją, należy zastosować amortyzatory, które w znacznym stopniu złagodzą skutki wstrząsu wywołanego perforacją. Pojemnik na ciśnieniomierze wgłębne w zestawie próbnika złoża typu Ful-Flo o średnicy 5" może być umiejscowiony zarówno pod, jak i nad uszczelniaczem, co jest bardzo istotne gdy perforacja wykonywana jest poprzez próbnik. Jest to możliwe ze względu na to, że ciśnieniomierze znajdują się w obudowie. Zaleca się stosowanie amortyzatorów drgań.
- **Uszczelniacz rurowy typu RTTS** – w górnej części jego korpusu znajdują się szczęki o działaniu hydraulicznym, uruchamiane wówczas, gdy ciśnienie w przestrzeni pod uszczelniaczem przewyższa ciśnienie słupa płuczki w przestrzeni pierścieniowej nad uszczelniaczem. Dzięki tej właściwości uszczelniacza podczas opróbowania można wykonać płukanie skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej roztworami substancji powierzchniowo czynnych lub ich kwasowanie. Uszczelniacz ten w połączeniu z zaworem cyrkulacyjnym typu RTTS oraz łącznikiem bezpieczeństwa typu RTTS stanowi standardowy zestaw do wszelkiego rodzaju zabiegów w otworze, kiedy ciśnienie pod uszczelniaczem przewyższa ciśnienie słupa płuczki w otworze wiertniczym.
- **Zawór cyrkulacyjny typu RTTS** – stosowany w zestawie próbnika Ful-Flo pełni rolę wyłącznie zaworu wyrównawczego (by-pass). Używa się go wówczas, jeżeli przewiduje się podczas opróbowania wykonanie zabiegu pobudzenia lub intensyfikacji przyływu.
- **Łącznik bezpieczeństwa typu RTTS** – służy do rozłączania się z uszczelniaczem RTTS w przypadku jego przychwycenia i braku możliwości jego odpięcia. Konstrukcja łącznika uniemożliwia jego przypadkowe rozłączenie w czasie operacji zapuszczania i wyciągania zestawu próbnika Ful-Flo z otworu.
- **Nożyce hydrauliczne** – służą jako narzędzie ratunkowe w przypadku przychwycenia zestawu próbnikowego. Siła udaru przenoszonego na zestaw próbnika zależy od napięcia kolumny próbnikowej. Opóźniacz zamontowany w nożycach hydraulicznych nie pozwala na ich przedwczesne lub przypadkowe uruchomienie.
- **Łącznik teleskopowy** – jest elementem amortyzującym i zabezpieczającym, którego skok (przesuw) wynosi 1,5 m. Element ten jest nieodzownym narzędziem do manipulowania zaworem głównym próbnika. Chodzi o to, aby przy zamykaniu zaworu głównego (ruch zestawu w górę) nie spowodować otwarcia zaworu wyrównawczego (w przypadku użycia zaworu bez zamka J-Slot) oraz odpięcia uszczelniacza typu RTTS. W zależności od głębokości otworu wiertniczego można użyć kilku łączników teleskopowych.
- **Autoklaw** – służy do pobrania próbki w dowolnym czasie przyływu lub podczas oczekiwania na rejestrację krzywej odbudowy ciśnienia dennego. Uruchamiany jest z przestrzeni pierścieniowej przez wywarcie ciśnienia, które powoduje pęknięcie membrany i przesunięcie tulei ciśnieniem słupa płuczki w przestrzeni pierścieniowej, w wyniku czego następuje zamknięcie próbki w komorze autoklawu o pojemności 1200 cm³.

- **Zawór główny typu Ful-Flo** – jest zaworem wielocyklowym, który otwiera się przez wywarcie na niego nacisku osiowego. Wewnątrz zaworu głównego wbudowany jest opóźniacz zabezpieczający przed jego otwarciem, zanim nastąpi uszczelnienie warstwy. Zawór wyrównawczy znajdujący się w jego dolnej części działa tylko w czasie zapuszczenia zestawu. Przed otwarciem zaworu głównego zawór wyrównawczy zostaje zamknięty i już się nie otwiera podczas zamykania zaworu głównego. Do manipulacji zaworem służy opisany wcześniej łącznik teleskopowy. Zawór kulowy znajdujący się w zaworze głównym działa przy ciśnieniu różnicowym do 35,0 MPa. Jest to bardzo istotne w przypadku gdy np. podczas pierwszego okresu przyływu z kolumny próbnikowej zostaje wyrzucona przybitka. Gdy ciśnienie złożowe jest większe niż 35,0 MPa, wówczas należy podczas oczekiwania na pierwszą odbudowę ciśnienia uzupełnić przybitkę tak, aby ciśnienie różnicowe na zawór kulowy nie było większe niż 35,0 MPa.
- **Cyrkulacyjny zawór bezpieczeństwa typu APR-M-2** – w przeciwieństwie do innych zaworów cyrkulacyjnych występujących w zestawie ma on za zadanie przed otwarciem otworów cyrkulacyjnych, zamknięcie zaworu kulowego, w który jest wyposażony, a tym samym odcięcie dopływu płynu złożowego do kolumny próbnikowej. Sterowany jest z przestrzeni pierścieniowej przez wywarcie określonego ciśnienia, które powoduje ścięcie wcześniej dobranych kołków zabezpieczających.
- **Zawór cyrkulacyjny typu SG-15** – stosowany jest w próbniku Ful-Flo o średnicy 5", i uruchamiany z przestrzeni pierścieniowej poprzez ścięcie membrany. Należy zaznaczyć, że w przypadku użycia więcej niż jednego elementu sterowanego z przestrzeni różnicą ciśnienia trzeba dobrać membranę w taki sposób, aby najpierw uruchomić element, który ma zadziałać jako pierwszy. Różnica ciśnień pomiędzy poszczególnymi sterowanymi elementami powinna wynosić ok. 7 MPa (1000 psi).
- **Zawór cyrkulacyjny typu APR-A** – działa podobnie jak zawór cyrkulacyjny bezpieczeństwa typu APR-M-2, z tą różnicą, że nie posiada zaworu kulowego odcinającego przyływ płynu złożowego. Otwierany jest przez ścięcie kołków zabezpieczających odpowiednim ciśnieniem z przestrzeni pierścieniowej.

Kompletowanie zestawu RPZ typu Ful-Flo zależy od planowanej technologii opróbowania warstwy perspektywicznej.

- **Opróbowanie zestawem typu Ful-Flo warstwy perspektywicznej w otworze nieorurowanym** (bez testu produkcyjnego lub z tym testem), podczas którego nie planuje się zapuszczenia na linie żadnych narzędzi przez zestaw. W zestawie dopuszcza się przewężenie przekrojów. Pomimo ww. odstępstw dla prawidłowego przeprowadzenia opróbowania muszą być spełnione następujące zasady:
 - W zestawie próbnika o średnicy 5" należy użyć dwa zawory cyrkulacyjne o różnej zasadzie działania, np. zawór membranowy sterowany ciśnieniem od wewnątrz kolumny próbnikowej oraz zawór uruchamiany z przestrzeni pierścieniowej za pomocą mechanizmu membranowego typu SG-15.
 - W zestawie próbnika o średnicy 3 7/8" należy stosować odpowiednio: zawór cyrkulacyjny o średnicy 3 7/8" sterowany ciśnieniem od wewnątrz kolumny typu APR-A lub zawór typu APR-M-2, który ma tę właściwość, że przed otwarciem otworów cyrkulacyjnych odcina dopływ płynu ze złoża. Jest on zarazem zaworem bezpieczeństwa.

W przeciwieństwie do zestawu standardowego w zestawie Ful-Flo używa się tylko jednego zaworu, który spełnia zarówno rolę zaworu głównego, jak i zaworu okresowego. Aby wykonać prawidłowe oprobowanie, do sterowania zaworem głównym konieczne jest użycie łącznika teleskopowego. Należy stosować jeden taki łącznik na każde 1500–2000 m głębokości otworu wiertniczego. Zatem przy oprobowaniu warstwy na głębokości około 5000 m wskazane jest równoczesne użycie trzech łączników teleskopowych.

- **Oprobowanie warstwy perspektywicznej w otworze orurowanym** z wykonaniem perforacji okładziny otworu wiertniczego poprzez próbnik przy użyciu zestawu perforacyjnego podwieszonoego pod zestawem próbnika. W tym przypadku należy zachować pełny przelot zestawu próbnika, gdyż przez niego będzie musiał być opuszczony zbijak do odpalenia perforatorów. Zbijak znajduje się w pojemniku wyposażenia powierzchniowego.
- **Oprobowanie warstwy perspektywicznej z wykonaniem testu produkcyjnego** wraz z zapuszczaniem przyrządów pomiarowych, np. pomiar intensywności przepływu płynu złożowego sondą typu LO TORC (Production Log).
- **W przypadku zagrożenia siarkowodorowego** należy zastosować urządzenie powierzchniowe odporne na H₂S.
- **Oprobowanie warstw perspektywicznych w otworach kierunkowych** możliwe jest dzięki sterowaniu zaworami próbnika typu Ful-Flo różnicą ciśnienia z przestrzeni pierścieniowej.

3.3. Zestawy próbnikowe firmy Baker typu Inflatable

Zestaw RPZ typu Inflatable charakteryzuje się głównie następującymi zaletami:

- Jego uszczelniacze zapinają się przez napompowywanie ich płuczką i mogą się rozszerzać do średnicy otworu wiertniczego nawet o około 60% większej od średnicy nominalnej. Można więc za ich pomocą oprobowywać warstwy w otworach wiertniczych o powiększonych średnicach, w których występują znaczne zniekształcenia ich ścian. Zestawy te są więc przeznaczone do oprobowań perspektywicznych warstw skał zbiornikowych w otworach wiertniczych o skawernowanej ścianie i w skałach słabo zwięzłych, czyli w warunkach geologicznych nie pozwalających na uszczelnienie uszczelniaczami mechanicznymi zapinanymi pod działaniem nacisku osiowego.
- Możliwość dodatkowego zapobiegania przed przychwyceniem kolumny próbnikowej w nieorurowanym odcinku otworu, z uwagi na fakt, że w czasie oczekiwania na rejestrację odbudowy ciśnienia dennego można obracać kolumną próbnikową nad zestawem próbnikowym. Ponadto próbnik ten – zapinany selektywnie – nie ma kotwicy rurowej, a zatem nie jest opierany o dno otworu wiertniczego. Pozwala to na uniknięcie komplikacji w postaci wgniatania się w dno otworu lub słabo zwięzły korek cementowy i obsuwania się uszczelniaczy.
- Zasadniczo próbnik ten przewidziany jest do oprobowań selektywnych dwupakero- wych (oraz wyjątkowo do zapieć jednoszczelniaczowych), jedno- lub wielocyklo- wych. Można nim testować kolejno kilka perspektywicznych warstw skał zbiorniko-

wych w otworze wiertniczym, w jednym marszu próbnikiem. Wówczas w wyniku skrócenia czasu prób zmniejszają się koszty oprobowania. Próbnik ten może też być użyty do zapięć w kolumnach rur okładzinowych. Zalecany rozstaw uszczelniaczy nie powinien być większy niż 55 m.

Próbnikiem typu Inflatable można też wykonywać oprobowanie z jednym uszczelnia-czem. Powstają wtedy ograniczenia z powodu braku wyrównywania się ciśnień nad i pod uszczelnia-czem, ponieważ wyłączony jest system obejściowy (tzw. *by-pass*). Przy takich zapięciach konieczne jest stosowanie kotwicy rurowej, zwłaszcza jeżeli zapięcie uszczel-niacza jest wykonywane na głębokości większej niż 500 m. Kotwica rurowa zabezpiecza przed obsunięciem się i uszkodzeniem uszczelnia-cza. Pomimo takiego zabezpieczenia na-leży unikać oprobowania z jednym uszczelnia-czem.

4. PROCEDURA INTERPRETACJI METODĄ HORNERA WYNIKÓW KRÓTKOTRWAŁEGO TESTU ODBUDOWY CIŚNIENIA DENNEGO

Według Hornera różnicę pomiędzy pierwotnym ciśnieniem złożowym p_z i ciśnieniem dennym podczas testu odbudowy p_{ds} można przedstawić jako sumę spadku ciśnienia spowodowanego przyływem płynu złożowego do otworu o strumieniu objętości $+q$ w czasie $(t + \Delta t)$ oraz o strumieniu objętości $-q$ w czasie Δt , gdzie t – to czas przyływu płynu złożowego do otworu wiertniczego liczony od momentu wywarcia depresji na poziom do zamknięcia zaworu okresowego; Δt – to czas odbudowy ciśnienia dennego liczony od momentu zamknięcia zaworu okresowego do rozpatrywanego momentu oprobowania. W ten sposób otrzymano zależność [2]

$$p_z - p_{ds} = \frac{q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25(t + \Delta t)}{f\mu cr_o^2} + \frac{-q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25k\Delta t}{f\mu cr_o^2} \quad (1)$$

lub po przekształceniu i uproszczeniu

$$p_{ds} = p_z - 0,183 \frac{q\mu}{kh} \lg \frac{t + \Delta t}{\Delta t} \quad (2)$$

Pozostałe oznaczenia podano poniżej (w pkt 5 i 6).

Wzór (2) zalecany jest do stosowania przy interpretacji krzywych odbudowy ciśnienia dennego zarejestrowanych podczas krótkotrwałego oprobowania warstw perspektywicznych próbnikiem rurowym w procesie dowiercania złoża ropy naftowej. Wówczas krzywą odbudowy ciśnienia dennego dzieli się na równe odcinki czasowe, przez naniesienie na niej n -tej liczby punktów (zalecane 10 punktów). Dla każdego i -tego punktu odczytuje się wartość ciśnienia dennego statycznego $p_{ds,i}$ oraz określa się wartości ilorazów czasów $\frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i}$, przy czym $t = \text{const}$ (tab. 1, s. 24). Następnie punkty te nanosi się w półlogarytmicznym układzie współrzędnych, w którym na osi odciętych nanosi się wartości $\frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i}$,

a na osi rzędnych – wartości $p_{ds,i}$. Zgodnie z równaniem (2), punkty te (minimum cztery ostatnie punkty końcowe) układają się na linii prostej o współczynniku kierunkowym (nachyleniu do osi odciętych) wynoszącym

$$m = 0,183 \frac{q\mu}{kh} \quad (3)$$

Wartość m można określić metodą graficzną jako różnicę ciśnień przypadającą na cykl jednostkowego odcinka skali logarytmicznej: $m = P_z - P_{ds1}$, gdzie: p_{ds1} to ciśnienie denne odpowiadające wartości

$$\lg \frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i} = 1,0$$

Prosta otrzymana w omawianym pół logarytmicznym układzie współrzędnych przecina oś rzędnych w punkcie $P_{ds} = P_z$, ponieważ wówczas, jak wynika z wzoru (2)

$$\lg \frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i} = 0$$

co zachodzi wtedy, gdy $\Delta t \rightarrow \infty$. W ten sposób określa się wartość ciśnienia złożowego P_z oraz nachylenia m . Kolejne procedury podane zostaną na przykładzie liczbowym (pkt 5).

5. PROCEDURA OKREŚLANIA PARAMETRÓW ZŁOŻOWYCH NA PRZYKŁADZIE DWUCYKLOWEGO OPRÓBOWANIA ZŁOŻA OSOBNICA

W otworze wiertniczym Osobnica 139 wykonanie opróbowanie warstw istebniańskich paleocenu rurowym próbnikiem typu Standard o średnicy 5", a następnie dokonano interpretacji danych i wyników pomiarów metodą Hornera i metodą log-log [4].

Dane techniczno-technologiczne opróbowania

Średnica otworu wiertniczego $D_o = 0,216$ m; średnica wewnętrzna kolumny próbnikowej: $d_w = 0,1086$ m; głębokość umieszczenia ciśnieniomierza wgłębnego: $H_m = 1392$ m; czasy pierwszego przyływu: $t_1 = 15$ min i $t_2 = 58$ min; czas odbudowy ciśnienia: $\Delta t_1 = 30$ min; $\Delta t_2 = 76$ min; wysokość słupa przybitki wodnej: $h_w = 806$ m; ciężar właściwy wody jako przybitki: $\gamma_w = 10000$ N/m³.

Dane geologiczno-złożowe

Miąszość opróbowanych warstw istebniańskich paleocenu: $h = 24$ m; porowatość skały zbiornikowej $f = 0,09\%$; współczynnik ściśliwości ropy: $c_r = 5,5 \cdot 10^{-9}$ Pa⁻¹; ciężar właściwy ropy w warunkach złożowych: $\gamma_r = 8340$ N/m³; współczynnik lepkości dynamicznej ropy w warunkach złożowych: $\mu_r = 2 \cdot 10^{-3}$ Pa · s.

Wyniki pomiarów próbnikiem

Wartość ciśnienia hydrostatycznego słupa płuczki w otworze $P_h = 17,65 \cdot 10^6$ Pa; wartości ciśnień dennych na początku i końcu pierwszego przyływu: $P_{p1} = 8,06 \cdot 10^6$ Pa i $P_{do1} = 8,33 \cdot 10^6$ Pa oraz na początku i końcu drugiego przyływu: $P_{p2} = 8,33 \cdot 10^6$ Pa i $P_{do2} = 8,91 \cdot 10^6$ Pa.

Tabela 1

Współrzędne i -tych punktów pierwszej krzywej odbudowy ciśnienia dennego oraz odpowiednie wartości ilorazu czasów, dotyczące opróbowania złoża Osobnica

P_{dsi}	MPa	10,33	11,65	11,95	12,05	12,25	12,35	12,45	12,52	12,62	12,7
Δt_{1i}	min	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$\frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i}$	1	6	3,5	2,67	2,25	2	1,83	1,71	1,625	1,56	1,5

Wykorzystując te współrzędne (tab. 1), w układzie półlogarytmicznym sporządzono wykres zależności $P_{dsi} = f\left(\lg \frac{t + \Delta t_i}{\Delta t_i}\right)$ i ekstrapolując końcowy przebieg tego wykresu, uzyskany w postaci linii prostej, do przecięcia z osią rzędnych, wyznaczono wartość ciśnienia złożowego $P_{z1} = 13,1 \cdot 10^6$ Pa.

Współczynnik nachylenia dla pierwszej odbudowy

$$m_1 = \frac{P_z - P_{ds1}}{1,0} = 2,85 \cdot 10^6 \frac{\text{Pa}}{\text{cykl log}}.$$

Wydatek pierwszego przyływu ropy

$$q_{r1} = \frac{\pi \cdot d_w^2 \cdot (P_{do1} - P_{p1})}{4 \cdot t_1 \cdot \gamma_r} = 3,33 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}.$$

Przewodność hydrauliczna warstwy

$$\varepsilon_1 = \frac{0,183 \cdot q_{r1}}{m_1} = 2,197 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}}.$$

Współczynnik przepuszczalności efektywnej skał:

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot \mu_r}{h} = 1,83 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \approx 1,83 \text{ mD}$$

$$(1 \text{ m}^2 = 0,981 \cdot 10^{-15} \text{ mD}).$$

Wskaźnik brzegowy (*skin - effect*)

$$S_1 = 1,1513 \cdot \left(\frac{P_z - P_{do1}}{m_1} - \log \frac{k_1 \cdot t_1}{f \cdot \mu_r \cdot c_r \cdot r_o^2} - 0,3514 \right) = +1,9.$$

Promień strefy badanej próbnikiem

$$R_{b1} = \sqrt{4 \cdot \chi_1 \cdot t_1} = 2,6 \text{ m}.$$

Na podstawie drugiego cyklu opróbowania metodą Hornera uzyskano następujące wyniki obliczeń [4]: $P_{z2} = 12,41 \cdot 10^6$ Pa; $\varepsilon_2 = 3,5 \text{ m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$; $k_2 = 2,54 \text{ m}^2$; $S_2 = -2,03$; $R_{b2} = 6,6 \text{ m}$.

6. PROCEDURA OCENY WARUNKÓW ZŁOŻOWYCH

Represja ciśnienia płuczki w warunkach statycznych wytwarzana przez 33 dni po dowieńczeniu opróbowanego złoża ropy Osobnica w otworze nr 139 miała bardzo dużą wartość i wynosiła: $\Delta P_r = P_h - P_{z2} = 5,24 \cdot 10^6$ Pa, a w warunkach dynamicznych, gdy płuczka krąży w otworze, wartość ta mogła być około 15% większa. Początkowa wartość depresji na złożu wynosiła: $\Delta P_o = P_{z2} - P_{p1} = 4,35 \cdot 10^6$ Pa.

Istnieje znaczny naddatek ciśnienia złożowego, wynikający z działającej represji podczas dowieńczenia, który wynosi: $P_{z1} - P_{z2} = 0,6910^6$ Pa. Gradient ciśnienia złożowego (określony na podstawie drugiego cyklu) jest mały i wynosi: $G_z = P_{z2}/H_m = 0,00892$ MPa/m.

Przepuszczalność skał zbiornikowych w bliskiej strefie przyotworowej jest uszkodzona (wskazuje na to dodatnia wartość S_1), natomiast w strefie dalszej jest polepszona (ujemna wartość S_2). Ponadto k_1 jest większe od k_2 .

Zmiana wartości wskaźnika brzegowego (S_1 dodatnie, a S_2 ujemne) może również wskazywać na występowanie procesu samoczynnego oczyszczania się skał w procesie opróbowania.

Uzyskane informacje dotyczą strefy trzyotworowej o promieniu $R_b < 7$ m.

Na podstawie przeprowadzonej oceny warunków złożowych można podjąć decyzję o konieczności wykonania zabiegu intensyfikacji przepływu płynu złożowego do otworu wiertniczego i następnie wykonanie testu produkcyjnego.

Należy również wziąć pod uwagę fakt, że rozpatrywane wyniki opróbowania interpretowano także metodą log-log [3, 4], uzyskując dużą zbieżność wyników obliczeń z metodą Hornera oraz stwierdzając, że w badanym złożu możliwe jest występowanie szczeliny charakteryzującej się ustalonym strumieniem przepływu ropy naftowej. Jednak z uwagi na zbyt krótki czas testu drugiej odbudowy (około 76 minut) informacja ta nie jest pewna.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

- 1) Zakres i dokładność uzyskiwanych próbnikiem informacji o wielkości parametrów złożowych i produkcyjnych badanej warstwy uzależnione są w dużym stopniu od stosowanej techniki i technologii opróbowania, a także od metody interpretacji wyników.
- 2) Opróbowanie warstw perspektywicznych w procesie dowieńczenia złóż ropy przy użyciu RPZ typu Ful-Flo jest wskazane, gdy spodziewane jest znaczne uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyotworowej, a także gdy nie ma pewności, że uzyska się samowypływ płynu złożowego z otworu wiertniczego. Próbniki typu Inflatable firmy Baker zaleca się stosować do selektywnego opróbowania warstw perspektywicznych w otworach wiertniczych o znacznym skawernowaniu ściany otworu. W innym przypadku, ze względów ekonomicznych, w procesie dowieńczenia złóż ropy zaleca się stosowanie standardowego próbnika złoża.

- 3) Na podstawie interpretacji wyników dwucyklowego opróbowania RPZ warstwy skał zbiornikowych możliwe jest m.in.: porównanie wyników obliczeń parametrów złożowych; analiza zmian przepuszczalności skał w strefie przyotworowej; ocena produktywności badanej warstwy skały zbiornikowej; typowanie warstwy skał zbiornikowych do zabiegu intensyfikacji przyływu płynu złożowego.

LITERATURA

- [1] Dubiel S.: *Zagadnienia opróbowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego*. Skrypty Uczelniane nr 1309, Wydawnictwa AGH, Kraków 1992
- [2] Dubiel S., Chrząszcz W., Rzyczniak M.: *Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003
- [3] Dubiel S., Rzyczniak M., Wójtowicz T.: *Rozwój techniki opróbowania poziomów perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża na przykładzie Zakładu Poszukiwań Nafty i Gazu w Krakowie*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna WwNiG, 1996
- [4] Dubiel S., Rzyczniak M., Wójtowicz T. i in.: *Analiza i interpretacja wyników opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża wykonywanych przez OPNiG Kraków*. Praca niepublikowana. WwNiG AGH, Kraków 1998