

Ludwik Zawisza*, Jan Macuda*,
Wiktor Gądek**, Józef Nowak**

WYKORZYSTANIE TESTU PRODUCTION LOGGING DLA OKREŚLENIA STREF DOPIŁYWU WODY DO STUDNI WIELKOŚREDNICOWYCH

1. Wstęp

Pomiary geofizyczne w odwiertach eksploatacyjnych wykonuje się w celu wyznaczenia miejsca dopływu płynów złożowych do odwiertu, określenia temperatury i ciśnienia złożowego, oceny wielkości produkcji z uwzględnieniem udziału poszczególnych faz (woda, ropa, gaz), ustalenia kontaktów pomiędzy fazami i wyjaśniania różnorodnych problemów związanych z eksploatacją złóż węglowodorów.

Do badania otworów hydrogeologicznych można również wykorzystywać aparatury pomiarowe stosowane do pomiarów w otworach produkcyjnych w przemyśle naftowym.

Wyposażone są one w zestawy sond do badania stanu technicznego otworów oraz wielkości przyływu do otworu płynów złożowych.

Zestawy do badania wielkości przyływu płynów do otworu nazywane są *Production Log* (PL). Wysoka odporność tych zestawów na niekorzystne warunki panujące w otworach produkcyjnych (temperatura i ciśnienie) oraz dodatkowe, specjalistyczne wyposażenie aparatów pomiarowych pozwalają na wykonywanie nimi badań nawet w głębokich otworach geotermalnych oraz w otworach produkcyjnych o podwyższonym ciśnieniu. W aparatury takie, wyprodukowane przez amerykańską firmę Halliburton, wyposażone są polskie firmy geofizyczne.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Geofizyka Kraków, Kraków

2. Sprzęt pomiarowy

Krajowe firmy geofizyczne używają aparatur typu DDL-D CH/PL firmy Halliburton wyposażonych w kompleksowe sondy PL i służą z zestawem ciśnieniowo-kontrolnym oraz dźwig służący do montażu śluz i zapewnienia stabilności zestawu podczas pomiarów [1].

Aparatura pomiarowa z wyciągiem mieszczącym do 6000 m 1-żyłowego kabla o średnicy 7/32" (5,56 mm) zamontowana jest na wspólnym podwoziu i zasilana z własnych generatorów. Do rejestracji profilowań służy system Excell 1000 umożliwiający kalibrację sond, wprowadzenie poprawek i wstępne przetworzenie danych. Do przetwarzania i interpretacji danych wykorzystuje się oprogramowanie COMCEN oraz programy PLA (*Production Log Analysis*) umożliwiające także graficzne wyprowadzanie danych i wyników interpretacji oraz zapisanie ich w formacie LIS lub LAS.

Kompleksowa sonda PL składa się z szeregu modułów o średnicy 1 7/16" (37 mm) [1]:

- zespół telemetryczny MUX,
- mufolokator CCL,
- korelacyjna sonda gamma GRT,
- elektrotermometr TLT,
- ciśnieniomierz SPT,
- sonda dielektryczna HYD,
- gęstościomierz płynów FDT,
- przepływomierz FBF lub FMS,
- zestaw odpowiednio dobranych obciążników i centralizatorów.

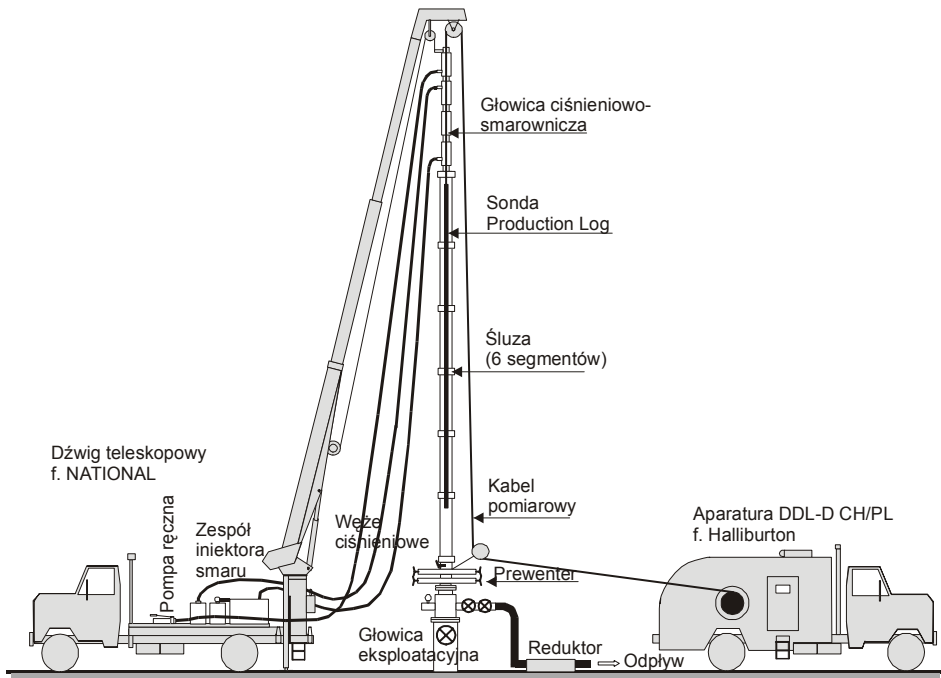
Zestaw sond *Production Log* do badań w otworach odwadniających i piezometrycznych może nie zawierać sondy dielektrycznej HYD i gęstościomierza płynów FDT.

Pomiary w otworach eksploatacyjnych lub chłonnych mogą być wykonywane przy zerowym lub podwyższonym ciśnieniu głowicowym, maksymalnie do 68,9 MPa. W przypadku wykonywania pomiarów pod ciśnieniem sonda zapuszczana jest do odwiertu przy użyciu śluzi montowanej na głowicy eksploatacyjnej i zestawu ciśnieniowo-kontrolnego przeznaczonego do wytworzenia przeciwcisnienia równoważnego ciśnieniu na głowicy odwiertu.

Zestaw składa się z następujących elementów:

- kablowa głowica przeciwwybuchowa (prewenter),
- chwytak przyrządów,
- sześciosegmentowa śluza,
- hydrauliczna głowica ciśnieniowo-smarownicza,
- zespół iniektora smaru,
- ręczna pompa hydrauliczna.

Schemat wykonywania pomiarów sondą *Production Log* przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat wykonywania pomiarów sondą *Production Log*

3. Metodyka pomiarów oraz interpretacja wyników badań testu *Production Log*

Celem interpretacji pomiarów wykonanych zestawem *Production Log* jest wyznaczenie miejsc dopływu wody do odwiertu oraz ocena wielkości tego dopływu. Przed przystąpieniem do interpretacji zarejestrowane profilowania wymagają wstępnego przetworzenia obejmującego: dowiązanie głębokościowe do pomiarów wykonanych w otworze nie zarusowanym, wzajemną korelację wielokrotnie wykonywanych pomiarów, odfiltrowanie szumów aparaturowych i wprowadzenie korekt wynikających z procesu kalibracji [1].

Do wyznaczenia miejsc dopływu wody do otworu lub interwałów chłonnych wykorzystywane są pomiary elektrotermometrem i przepływomierzem (rys. 2–4). Dla wychwycenia nieznacznych zmian temperatury w profilu otworu, spowodowanych dopływem wody, do analizy wykorzystuje się profilowanie różnicowe temperatury. Miejsca dopływu najlepiej lokalizują pomiary przepływomierzem, zwłaszcza pomiary wykonane w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu wody w otworze. Pomiary przepływomierzem pozwalają określić prędkość przepływu wody w otworze na podstawie wspomnianych już wykresów średnich prędkości przemieszczania się sondy PL, zestawionych ze średnimi obrotami turbinki przepływomierza, w interwałach o ustabilizowanym przepływie.

Z różnicy prędkości przepływu płynów powyżej i poniżej badanego interwału perforacji można obliczyć objętość płynu dopływającego do odwiertu. Obliczoną wydajność odwiertu można rozdzielić na poszczególne odcinki perforacji, proporcjonalnie do wyznaczonych prędkości przepływu, i przedstawić graficznie w postaci wykresu słupkowego.

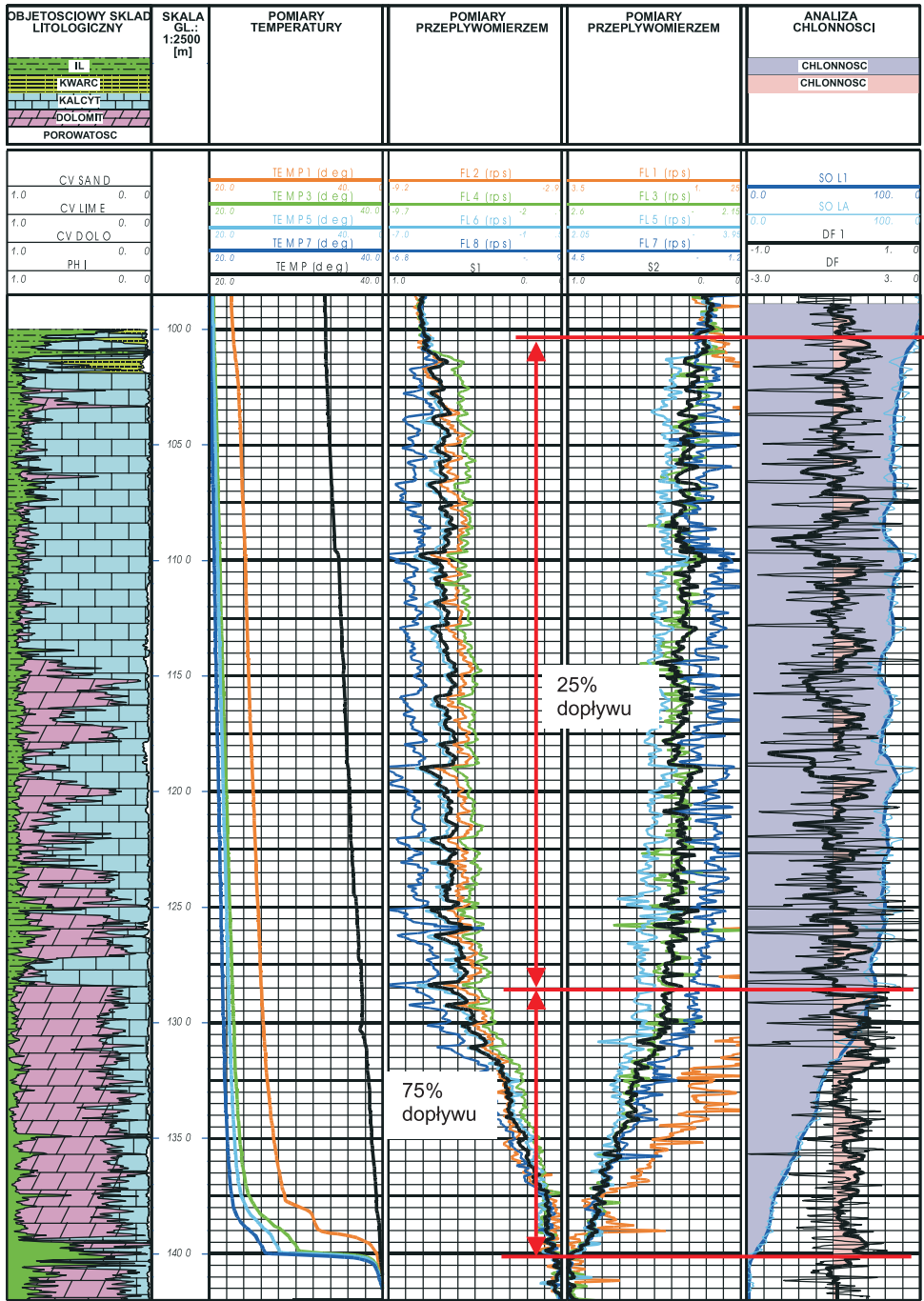
Ocenę przepływu wody w interwałach występowania silnych turbulencji (perforacja) można wykonać analizując znormalizowane pomiary przepływomierzem. Profilowania przepływomierzem składa się tak, aby krzywe pokrywały się w miejscach ustabilizowanego przepływu, a następnie uśrednia uzyskując krzywą zmian przepływu w obrębie perforacji. Po dodatkowej filtracji, dla usunięcia zaburzeń w obrotach turbinki przepływomierza spowodowanych bocznym dopływem, można obliczyć gradient tej krzywej i przy uwzględnieniu wydajności całego otworu ocenić wydajność z każdego metra perforacji. Ponieważ profilowania przepływomierzem wykazują wiele charakterystycznych cech związanych z kierunkiem pomiaru, celowe jest grupowanie ich przy normalizacji. Profilowania wykonane w kierunku do spodu odwiertu można wykreślić w odwróconej skali (inwersja) obrotów turbinki, co w zestawieniu z pomiarami wykonanymi w kierunku wylotu odwiertu podkreśla zmiany w rozkładzie przepływu przedstawione na zestawieniach graficznych.

4. Przykłady praktycznego zastosowania pomiarów *Production Log*

Dla zobrazowania opisanej metodyki pomiarów produkcyjnych i ich interpretacji przedstawiono poniżej wyniki analizy pomiarów z otworu M-1 (rys. 2), służącego jako studnia dostarczająca wodę termalną, otworu K-3 (rys. 3) przeznaczonego do zrzutu zasolonych wód kopalnianych oraz otworu geotermalnego SS-1 (rys. 4) [2].

W otworze M-1 (rys. 2), odwierconym ponad 20 lat temu, wykonano dwie perforacje; w głębokości 1602÷1644,5 m i 1665÷1714 m, dla udostępnienia dwóch horyzontów wodonośnych w piaskowcach kredowych, rozdzielonych serią ilastą. Otwór został zarurowany rurami 9 5/8", a spód otworu zamknięty korkiem cementowym, którego strop znajdował się na głębokości około 100 m poniżej spągu dolnego horyzontu wodonośnego. Poziom hydrostatyczny lustra wody w otworze utrzymywał się na głębokości 50 m. Ponieważ uzyskiwany przepływ wody z otworu był niezadowalający w stosunku do prognoz, dla wyjaśnienia sytuacji w lutym 1997 r. wykonano pomiary zestawem sond PL. Ze względów technicznych zastosowano metodę zatłaczania wody do otworu, w ilości ok. 11 m³/h. Dla ustalenia warunków początkowych, tj. korelacji głębokościowej badanych horyzontów wodonośnych, położenia muf rur okładzinowych, rozkładu ciśnienia i temperatury oraz wykrycia ewentualnej migracji płynów w otworze, pierwszy pomiar zestawem PL wykonano w warunkach statycznych przed rozpoczęciem zatłaczania wody. Po rozpoczęciu zatłaczania i ustaleniu się przepływu wody wykonano serię pomiarów zestawem PL.

Z analizy pomiarów ciśnienia wynikało, że poziom wody w otworze podniósł się o ok. 5 m (wzrost ciśnienia hydrostatycznego o około 7 PSI).



Rys. 3. Wyznaczenie miejsc dopływu wody w otworze K-3

Zatłaczanie zimnej wody stopniowo obniżało temperaturę w otworze, a pomiary przepływomierzem wykazały nierównomierną chłonność górnego horyzontu. Ponieważ spód otworu został zasypany powyżej granicy dolnej perforacji drobnoziarnistą frakcją, niesioną przez wodę ze słabo skonsolidowanej formacji skalnej (piaskowce), ocena chłonności dolnego horyzontu nie była możliwa. W tej sytuacji postanowiono usunąć zasyp i przeprowadzić próbę wywołania produkcji z dolnego horyzontu przez szcerpanie większej ilości wody. Rzeczywiście, w wyniku szcerpywania wody uzyskano zwiększenie przyływu do otworu. W maju 1997 r. powtórzono pomiary PL przy zatłaczaniu około 16 m³/h wody, schodząc z pomiarami poniżej dolnej perforacji. Analiza tych pomiarów wykazała, że dolny horyzont charakteryzuje się większą chłonnością, wynoszącą 72%, a górny mniejszą — 28%. Wykonane pomiary potwierdziły charakter zapisu przepływomierza w górnym horyzoncie. Pomimo zwiększonej ilości zatłaczanej wody pomiar ciśnienia nie wykazywał już wzrostu, co można tłumaczyć całkowitym i natychmiastowym jej pochłanianiem przez oba badane horyzonty. Prowadzi to do wniosku, że wydajność tych horyzontów może okazać się większa niż stwierdzona chłonność.

Otwór K-3 (rys. 3) odwiercono w szczelinowatych utworach węglanowych dewonu, z przeznaczeniem na kolektor przyjmujący zasolone wody kopalniane. W otworze tym wykonano kompletny zestaw podstawowych pomiarów geofizycznych, uzupełniony pomiarami spektrometrycznymi gamma, profilowaniem długą sondą akustyczną LSS i skanerem akustycznym CAST pozwalający ocenić budowę geologiczną i parametry geofizyczne formacji skalnej, a zwłaszcza szczelinowatość.

W interwale 976÷1463 m do otworu zapuszczono filtr z rur perforowanych (częściowo nacinanych) o średnicy 6 5/8" i wykonano pomiary PL przy zatłaczaniu do otworu ok. 40 m³/h wody. Na pomiarach elektrotermometrem zaobserwowano stopniowe obniżanie się temperatury w otworze, wywołane zatłaczaniem chłodniejszej wody, oraz przesuwanie się w dół otworu strefy chłonnej, która z czasem objęła również górną część serii marglistej w interwale 1395÷1399 m. Powolny wzrost ciśnienia hydrostatycznego na pomiarach ciśnieniomierzem świadczy o podnoszeniu się słupa wody w otworze. Pomiary przepływomierzem pozwoliły wyznaczyć interwał chłonny w głębokości 1101÷1399 m i uwidoczniły zmiany w charakterystyce jego chłonności: dolna część tego interwału, w głębokości 1285÷1399 m, charakteryzuje się podwyższoną chłonnością wynoszącą ok. 75% chłonności całego interwału.

Dla sprawdzenia szczelności dolnych partii formacji, zbudowanej z łupków i piaskowców kwarcytowych dewonu dolnego i kambru, ustawiono przepływomierz poniżej wyznaczonej strefy chłonności, w głębokości 1450 m, i wykonano pomiar w czasie zatłaczania otworu wodą. Pomiar nie wykazał przemieszczania się wody w tej części otworu mimo napełnienia otworu aż do wierzchu.

W otworze tym wykonano również pomiar odbudowy ciśnienia; sondę PL ustawiono w nieperforowanych rurach, w głębokości 961 m. Napełniono otwór wodą do wierzchu i wykonywano pomiar aż do ustabilizowania się spadku ciśnienia. I w tym przypadku pomiary PL pozwoliły ustalić miejsce i wielkość chłonności otworu.

Otwór geotermalny SS-1 (rys. 4) został odwiercony do utworów piaskowcowych dolnej jury. Górna część otworu została zarurowana do głębokości 2431 m rurami 9 5/8", a dolny odcinek, obejmujący serie wodonośne, do głębokości 2665 m pozostał nie zarurowany.

W odcinku tym wykonano pomiary zestawem PL w celu określenia miejsc przyływu wody i wielkości tego przyływu. Pomiary wykonywano przy użyciu *air-liftu* i wypływie wody wynoszącym 72 m³/godz.

W wyniku interpretacji wykonanych pomiarów wydzielono w profilu otworu kilka horyzontów produktywnych:

- z interwału 2650÷2593 m uzyskano 10% całości przyływu,
- z interwału 2573÷2520 m uzyskano 10% całości przyływu,
- z interwału 2476÷2495 m uzyskano 30% całości przyływu,
- z interwału 2473÷2460 m uzyskano 30% całości przyływu,
- z interwału 2455÷2440 m uzyskano 20% całości przyływu.

Uwaga: Pomiary wykonane w niezarurowanym otworze pozwalają prawidłowo zaprojektować konstrukcję filtra lub/i interwałów perforacji.

5. Wnioski

- 1) Tradycyjne metody geofizyczne stosowane w otworach wiertniczych do oceny dopływu wody do otworu pozwalają tylko na wskazanie miejsca dopływu, a nie pozwalają na określenie jego wielkości. Do określania miejsca i wielkości przyływu wody w normalnośrednicowych otworach obserwacyjnych i wielkośrednicowych otworach odwadniających najbardziej przydatne są przepływomierze turbinowe (kompleksowa sonda PL).
- 2) Przepływomierze turbinowe (sonda PL) mogą być wykorzystywane do wyznaczania wielkości strumienia wody dopływającego do otworu zarówno w utworach węglanowych, jak i utworach klastycznych o różnych średnicach. Wielkość średnicy otworu lub filtra nie ma wpływu na jakość prowadzonych badań.
- 3) Szczegółowa analiza pomiarów wykonanych przepływomierzami turbinowymi pozwala na dokładne wyznaczenie stref o pogorszonej przepuszczalności w otworach niezafiltrowanych oraz stref o zmniejszonej przepustowości filtrów zainstalowanych w otworach.
- 4) Dotychczas badania wielkości dopływu płynów złożowych (wody, ropy i gazu) do otworu przy pomocy przepływomierzy turbinowych były wykonywane wyłącznie w odwiertach naftowych. Badania te nie były wykonywane w otworach hydrogeologicznych wierconych dla odwodnienia kopalń węgla brunatnego.
- 5) Zdaniem autorów, badania wielkości dopływu wody do otworu za pomocą przepływomierzy turbinowych powinny być również wykonywane w studniach odwadniających i otworach obserwacyjnych wierconych dla celów odwodnienia KWB „Bełchatów” SA. Pozwoli to na poprawę parametrów hydraulicznych oddawanych do eksploatacji otworów hydrogeologicznych poprzez wykonanie w wyznaczonych interwałach zabiegów uaktywniających.

LITERATURA

- [1] Zawisza L., Gądek W., Nagy S., Nowak J.: Interpretacja testu *Production Logging* w połączeniu z testem hydrodynamicznym złoża wielowarstwowego (MLT). X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie”. Kraków, 24–25 czerwca 1999, t. 2. Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1999
- [2] Zawisza L., Macuda J.: Przegląd metod określania miejsca i wielkości przepływu w otworach wiertniczych. Przedsiębiorstwo Naukowo-Badawcze EKO-KONCEPT, Kraków 2004