

UKD 622.323: 622.550.87: 553.98(438)

Analiza rezultatów testów DST na złożu gazu ziemnego Lachowice – Stryszawa w Karpatach Zachodnich

Analysis of DST test results in Lachowice-Stryszawa gas field in the Western Carpathians



*Prof. dr hab. inż. Stanisław Dubiel**



*Dr. inż. Mirosław Rzycznik**

Treść: W publikacji przedstawiono technikę i technologię testów DST złoża gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa próbnikiem produkcji firmy Halliburton typu Ful-Flo. Podano charakterystykę techniczną tego próbnika oraz zasady kompletowania jego zestawu w zależności od planowanych rozwiązań technologicznych opróbowania i występujących warunków złożowych. Przeanalizowano stosowane w górnictwie naftowym rozwiązania technologiczne oraz rezultaty testów DST gazonośnych utworów dewonu na złożu Lachowice-Stryszawa w obszarze Karpat Zachodnich. Rezultaty tych testów interpretowano metodą Hornera oraz nowoczesną metodą log-log. Zestawiono tabelarycznie i szczegółowo omówiono wyniki interpretacji oraz wyniki obliczeń parametrów złożowych wszystkich udanych technicznie testów DST utworów dewonu, różniących się technologią, ze szczególnym uwzględnieniem przydatności uzyskanych informacji w procesie poszukiwań złóż węglowodorów i oceny ich produktywności.

Abstract: This paper presents the technique and technology of DST tests made in Lachowice-Stryszawa gas field with the use of Halliburton Ful-Flo equipment. The technical specification of the tester and way in which it can be composed, depending on the planned technological tests and reservoir conditions are given. Technological solutions applied in oil mining and DST results for gas-bearing Devonian strata in the Lachowice-Stryszawa gas field in the Western Carpathians are presented in this paper. The test results were interpreted with Horner method and modern log-log method. The results of the interpretation and calculations of all technically successful DST tests of Devonian strata performed in different technologies were tabularized and discussed in detail taking into account the usability of information in hydrocarbons prospecting and evaluation of their productivity.

Słowa kluczowe:

poszukiwania naftowe; Karpaty Zachodnie; złożo gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa; próbniki typu Ful-Flo; rezultaty testów DST

Key words:

oil prospecting, Western Carpathians, Lachowice-Stryszawa gas field, Ful-Flo drill stem testers, DST test results

1. Wprowadzenie

Biorąc pod uwagę potrzeby energetyczne kraju, wskazany jest m.in. powrót do poszukiwań naftowych w obszarach występowania konwencjonalnych złóż gazu ziemnego. Do obszarów takich należy zaliczyć Karpaty Zachodnie, w którym, w podłożu osadów miocenu zalegają gazonośne utwory dewonu [1]. Odwiertami L-7 i S- 2K stwierdzono ponad

wszelką wątpliwość występowanie złoża gazu ziemnego o wartości komercyjnej, które dotychczas nie jest eksploatowane [4]. Złoże to występuje na dwóch oddzielnych blokach tektonicznych Lachowice i Stryszawa, zalegających na różnych głębokościach. W obydwu blokach tego złoża akumulacja gazu ziemnego występuje w dewońskich skałach węglanowych (wapień, wapień dolomityczny, dolomity) [1,7].

Dużą rolę w odkryciu tych dwóch oddzielnych elementów blokowych złoża gazu ziemnego odegrały pozytywne

* AGH w Krakowie

rezultaty testów DST uzyskane przy zastosowaniu nowoczesnych próbników złoza firmy Halliburton typu Ful-Flo [4]. Umożliwiają one bowiem stosowanie szerokiego zakresu rozwiązań technologicznych, gdyż charakteryzują się pełną przelotowością całego zestawu, pozwalającą na zapuszczenie przez zestaw narzędzi, przyrządów oraz ładunków perforacyjnych. Próbniki typu Ful-Flo pozwalają na prowadzenie testów wielocyklowych. Stosowane są głównie do testów DST w odwiertach orurowanych, a dzięki zastosowaniu pakera RTTS z hydraulicznymi szczękami, również do wykonywania pomiarów wydajności przyprływu płynu złożowego oraz do przeprowadzenia zabiegów intensyfikacji przyprływu płynu złożowego [2,5].

Rezultaty testów DST zależą od stosowanej technologii [3,8]. W odwiertach L-7 i S-2K stosowano zróżnicowaną technologię testów DST: testy jednocyklowe (jeden test przyprływu i jeden test odbudowy ciśnienia); testy dwucyklowe (dwa testy przyprływu i dwa testy odbudowy ciśnienia); testy wielocyklowe połączone z długotrwałym syfonowaniem gazu ziemnego z odwiertu (testy produkcyjne).

W dziesięciu przypadkach jedno- lub dwucyklowych, wykresy ciśnienia zarejestrowane podczas testów DST utworów dewonu autorzy interpretowali metodą Hornera w półlogarytmicznym układzie współrzędnych [6].

W dwóch przypadkach do interpretacji rezultatów testu DST nr 117/94 utworów dewonu autorzy zastosowali metodę log-log, która polega na porównywaniu rzeczywistych i modelowych wykresów przyrostów ciśnienia oraz wykresów pierwszej pochodnej przyrostu ciśnienia w funkcji czasu, w układzie podwójnie logarytmicznym. Wykresy modelowe (diagnostyczne) opracowane zostały z uwzględnieniem modelu złoza, modelu udostępnienia złoza oraz modelu granicy złoza według programu „Saphir 202B” [9,10,11].

Ostatnio rezultaty testów DST wykorzystuje się do diagnozowania dopływu wody złożowej do odwiertów wydobywczych gazowych i ropnych [12].

2. Technika testów DST

Testy DST na złożu gazu ziemnego Lachowice-Stryszawa wykonywano przy użyciu zestawu rurowego próbnika złoza firmy Halliburton typu Ful-Flo, zapuszczanego do odwiertu na kolumnie rur płuczkowych. Dla przykładu, podczas kompletowania zestawu próbnika typu Ful-Flo pod kątem planowanej technologii testu DST nr 133/94 utworów dewonu w odwiercie L-7, uwzględniono także warunki odwiertowe (zapięcie próbnika w rurach okładzinowych nad korkiem cementowym (rys.1), w interwale perforacji okładziny odwiertu) oraz warunki złożowe (spodziewany przyprływ gazu ziemnego, wysokie ciśnienie złożowe i temperatura) [4].

Dobrano następujące elementy wyposażenia powierzchniowego i wglębnego zestawu próbnikowego (rys.1):

Głowica obrotowa. Służy do przenoszenia obrotów pod obciążeniem na kolumnę próbnikową podczas zapinania pakera typu RTTS oraz otwierania zaworu cyrkulacyjnego typu RTTS.

Manifold podłogowy. Przeznaczony jest do testowania przyprływu płynu złożowego. Składa się z trzech linii przepływowych, przy czym dwie z nich wyposażone są w zwężki pomiarowe, a trzecia posiada pełny przelot.

Seperator służy do rozdziału płynów złożowych (gaz, ropa, gazolina, woda). Wyposażony jest w pochodnię do spalania gazu ziemnego.

Rury płuczkowe. W tym przypadku do zapuszczenia zestawu próbnikowego do odwiertu użyto rur płuczkowych

o średnicy 3 1/2". Równocześnie rury te służą do odprowadzania płynu złożowego do powierzchniowego wyposażenia odwiertu. Kolumnę płuczkową podczas zapuszczania do odwiertu częściowo wypełniono wodą przebitkową o wysokości słupa około 450 m.

Obciążniki. W celu bezawaryjnego sterowania (ściskania i rozciągania) elementami wglębnego zestawu próbnikowego dobrano obciążniki o średnicy 3 1/2", które umieszczono nad i pod łącznikiem teleskopowym.

Uniwersalny zawór główny typu kulowego. Umożliwia podział procesu testowania DST na testy przyprływu i testy odbudowy ciśnienia, w przypadku testu wielocyklowego. Sterowany jest naciskiem osiowym (otwarcie pod wpływem nacisku, zamknięcie podjęciu tego nacisku). Zawór ten ma wewnętrzną kanał przelotowy o średnicy $D_w = 58$ mm.

Oslona rejestrujących ciśnieniomierzy wglębnych i innych przyrządów pomiarowych (np. termometrów) posłużyła w tym przypadku do podwieszenia ciśnieniomierza mechanicznego typu KPG firmy Kuster oraz typu elektronicznego firmy Panex. Oslona ona przyrządy pomiarowe przed erozyjnym niszczeniem płynu złożowego przepływającego wnętrzem kolumny próbnikowej. W analizowanym przypadku jedną taką osłonę umieszczono w przestrzeni nadpakerowej, a drugą w przestrzeni podpakerowej.

Łącznik teleskopowy. Umożliwia skuteczne sterowanie uniwersalnym zaworem głównym i zabezpiecza przed jego niezamierzonym otwarciem w interwałach odwiertu o dużej krzywiznie, a także przed niezamierzonym odpięciem pakera typu RTTS. Ma on wolny przesuw (skok jałowy) o długości 1,5 m. W rozpatrywanym przypadku użyto jeden taki łącznik, ale aby wydłużyć skok jałowy, można stosować dwa lub więcej takich łączników.

Nożyce hydrauliczne typu Big John służą jako narzędzie ratunkowe w przypadku przychwycenia w odwiercie kolumny próbnikowej. Siła udaru przenoszonego na kolumnę próbnikową zależy od siły jej napięcia. Opóźniacz zamontowany w nożycach hydraulicznych nie pozwala na ich przedwczesne lub przypadkowe uruchomienie.

Łącznik bezpieczeństwa typu RTTS służy do rozłączania się z uszczelniaczem typu 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 odwiertu.

Paker rurowy typu RTTS (od ang. *Retrievable Test-Treat-Squeeze*) w górnej części korpusu posiada szczęki o działaniu hydraulicznym, uruchamiane wówczas, jeżeli 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 odwiercie, kiedy ciśnienie pod uszczelniaczem przewyższa ciśnienie hydrauliczne słupa płuczki w odwiercie.

W tym przypadku pod pakerem RTTS umieszczono jeden kawałek rury płuczkowej o średnicy 3 1/2", zakończony przewodnikiem służącym do zapuszczania przyrządu pomiarowego na linie. Uszczelniające pierścienie gumowe tego pakera dobrano z uwzględnieniem średnicy wewnętrznej rur okładzinowych oraz temperatury złożowej.

3. Technologia testów DST

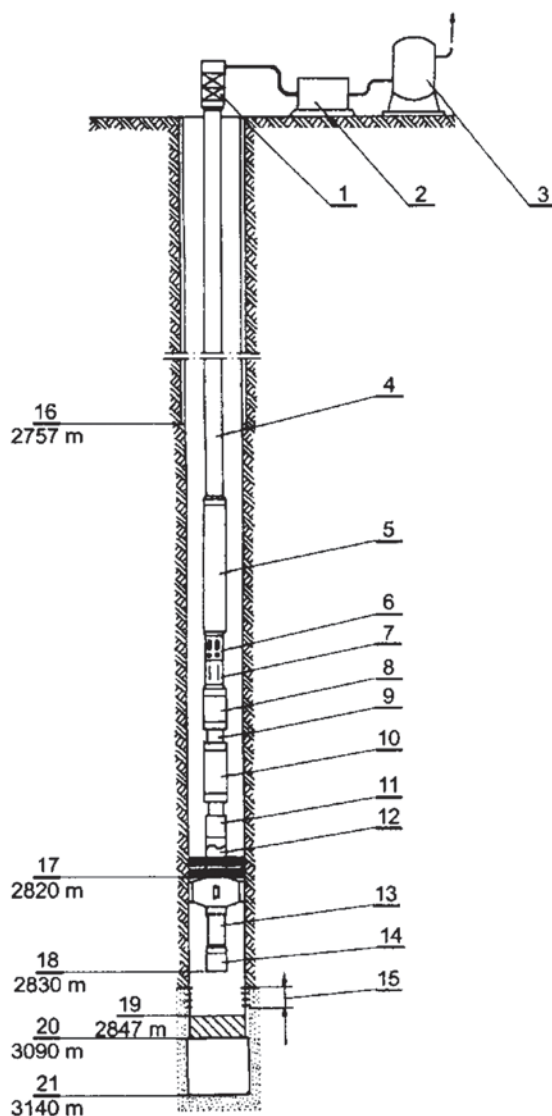
Zestaw próbnikowy typu Ful-Flo użyty do testu DST węglanowych skał zbiornikowych dewonu (interwał 2832-2844) w Karpatach Zachodnich, po wcześniejszej perforacji eksploatacyjnej kolumny rur okładzinowych o średnicy nominalnej 7", w odwiercie L-7 (test nr 133/94), umożliwił wykonanie trójcyklowej technologii testu DST wraz z syfonowaniem gazu ziemnego z odwiertu. Odwiert ten orurowany jest techniczną kolumną rur okładzinowych o średnicy nominalnej 9 5/8" do głębokości 2757 m, a kolumną eksploatacyjną o średnicy 7" – do głębokości 3090 m. Przed zapięciem zestawu próbnikowego wykonano w dolnej, nieorurowanej części odwiertu korek cementowy w interwale 3090 do 3140 m.

Wartość początkowej depresji ciśnienia ograniczono do 2,49 MPa w wyniku zastosowania w kolumnie próbnikowej słupa przybitki wodnej o wysokości 450 m (tab.1) oraz dławienia na manifoldzie wypływu płynu z kolumny próbnikowej. Podczas pierwszego testu przyływu, trwającego łącznie 74 minuty, przez około 65 minut obserwowano słaby wypływ powietrza z kolumny próbnikowej, a następnie wypływ gazu ziemnego. Podczas pierwszego testu odbudowy trwającego 251 minut, ciśnienie denne wzrosło do wartości 26,74 MPa. Podczas drugiego testu przyływu trwającego 15 minut, obserwowano stałą intensywność wypływu gazu ziemnego z kolumny próbnikowej (tab.1). Po zamknięciu głowicy na wylocie kolumny próbnikowej i upływie około trzech godzin, ciśnienie głowicowe wzrosło do wartości około 8 MPa. Następnie kilkakrotnie syfonowano gaz z odwiertu. Podczas trzeciego testu przyływu, trwającego 1881 minut, występował ciągle wypływ gazu ziemnego, z wydajnością około 14 m³/min. (w warunkach dennych), a w czasie drugiego testu odbudowy ciśnienie głowicowe ustabilizowało się przy wartości 26,85 MPa. Podczas wyciągania próbnika, stwierdzono przyływ do kolumny próbnikowej około 720 litrów gazoliny i około 240 litrów solanki (tab. 2).

W odwiertach L-7 i S-2K wykonano łącznie 12 jedno-, dwu- lub wielocyklowych testów DST dewonu zaraz po ich przewierceniu (jeden do kilkunastu dni) w interwałach nieorurowanych lub po dłuższym czasie (ponad 30 dni) w interwale orurowanym i perforowanym (tab.1).

Analizując dane zestawione w tabeli 1 można stwierdzić, że:

- Gęstość płuczki polimerowej stosowanej do dowiercania złoża wahała się w granicach: od 1030 ÷ 1240 kg/m³; przy stosunkowo niskim gradiencie ciśnienia złożowego, wynoszącym około 0,0094 MPa/m. Zalecana gęstość płuczki powinna wynosić nie więcej niż 1100 kg/m³, uwzględniając przy tym bezpieczeństwo erupcyjne. Zbyt duża gęstość płuczki powoduje bowiem nadmierne uszkodzenie przepuszczalności skał szczelinowo-porowych (wskaźnik S znacznie większy od zera).
- Wysokość słupa przybitki wodnej w większości przypadków dobierana była prawidłowo i wynosiła od 16% do 54% głębokości odwiertu (przy zalecanej wartości dla gazonośnych, węglanowych skał szczelinowo-porowych : 25% do 45%); umożliwiło to autorom określenie strumienia objętości (wydatku) przyływu gazu ziemnego z początkowego odcinka testu przyływu.
- Czas testów przyływu wahał się w bardzo szerokich granicach (4,5 ÷ 7800) min. Warto zauważyć właściwą prawidłowość, że dłuższe czasy przyływu (niekiedy połączone z syfonowaniem odwiertu) stosowano w drugich cyklach testów przyływu, a zwłaszcza w orurowanych interwałach odwiertu L-7.
- Czas testów odbudowy ciśnienia wynosił w granicach 17 ÷ 1086 min; był on w większości przypadków zde-



Rys. 1. Schemat zestawu próbnika firmy Halliburton o średnicy 5" typu Ful-Flo użytego do testu DST (nr 133/94) utworów dewonu w odwiercie L-7: 1 - głowica obrotowa; 2 - manifold podłogowy, 3 - separator; 4, 13 - rury płuczkowe o średnicy 3 1/2"; 5, 8, 10 - obciążniki o średnicy 3 1/2"; 6 - uniwersalny zawór główny typu Ful-Flo; 7, 14, 18 - osłona z przyrządami pomiarowymi 5"; 9 - łącznik teleskopowy, 11 - nożyce hydrauliczne, 12 - łącznik bezpieczeństwa, 15 - odcinek perforacji okładziny odwiertu, 16 - but rur okładzinowych o średnicy 9 5/8", 17 - uszczelniacz typu RTTS, 19 i 20 - odpowiednio strop i spąg korka cementowego, 21 - dno odwiertu

Fig. 1. Scheme of Halliburton Ful-Flo drill stem tester 5" used for DST test (no 133/94) in the Devonian formation in well L-7: 1 - LT swivel; 2 - floor manifold; 3 - separator; 4, 13 - drill pipe 3 1/2" diameter; 5, 8, 10 - drill collars 3 1/2" diameter; 6 - universal master valve Ful-Flo; 7, 14, 18 - running casing of manometers 5"; 9 - slip joint; 11 - hydraulic jar, 12 - safety joint; 15 - perforation; 16 - casing shoe 9 5/8" diameter; 17 - packer RTTS; 19, 20 - top and floor of cement plug; 21 - bottom hole

cydowanie dłuższy od testów przyływu i taka relacja jest właściwa, gdyż umożliwia badanie strefy złożowej o większym promieniu. Ponadto, wykresy długich czaso-

- wo testów odbudowy w drugim cyklu opróbowania można było interpretować metodą log-log, otrzymując ważne informacje o występowaniu granicy złoża.
- Ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy (28,75 ÷ 35,04) MPa w kilku przypadkach było zbyt duże i mogło spowodować głęboką filtrację płuczki wiertniczej w skałę szczelinowo-porową.
 - Naddatek ciśnienia słupa płuczki nad ciśnienie złożowe mieścił się w granicach 1,60 ÷ 8,38 MPa i był w kilku

- przypadkach dość duży, gdyż gradient ciśnienia złożowego jest stosunkowo mały (średnio około 0,0094 MPa/m).
- Początkowa depresja podczas testu DST wahała się w szerokich granicach 2,49 MPa ÷ 16,97 MPa. Należy w tym miejscu zauważyć, że dla skał węglanowych (szczelinowo-porowych) zbyt duża początkowa wartość depresji (większa od 10 MPa) może powodować ograniczenie dopływu płynu złożowego na skutek zwierania się szczelin i mikroszczelin.

Tabela 1. Zestawienie danych o warunkach technicznych i parametrach technologicznych testów DST w odwiertach L-7 i S-2K

Table 1. Summary of data on technical and technological parameters from DST tests in wells L - 7 and S-2K

| | | | | | | | | |
|-----|--|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------|
| Lp. | Nazwa otworu, nr testu | L-7, 39/94 | L-7, 44/94 | L-7, 53/94 | L-7, 62/94 | L-7, 70/94 | L-7, 78/94 | |
| 1 | Stratygrafia | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | |
| 2 | Opróbowany interwał, m n.o.- nieorurowany; perf.- perforacja rur | 2757 – 2815 n.o. | 2817 – 2845 n.o. | 2757 – 2845 n.o. | 2857 – 2887 n.o. | 2887 – 2911 n.o. | 2910 – 2941 n.o. | |
| 3 | Średnica otworu, m | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | |
| 4 | Głębokość posadowienia manometru, m | 2722,5 | 2805 | 2765 | 2888 | 2899 | 2866 | |
| 5 | Gęstość płuczki polimerowej podczas przewiercania, kg/m ³ | 1220 | 1200 - 1150 | 1240 - 1190 | 1040 | 1040 - 1030 | 1040 - 1030 | |
| 6 | Czas od nawiercenia do opróbowania, doba | 1 | 1 | 13 | 3 | 1 | 1 | |
| 7 | Wysokość słupa przybitki wodnej, m | 1510 | 1500 | 1000 | 500 | 800 | 855 | |
| 8 | Czas testów | czas I testu przyływu (i syfonowania), min | 125 | 10 | 77 | 4,5 | 18,5 | 26 |
| | | czas II testu przyływu, min | - | 82 | 7800 | 89 | 99 | 15 |
| | | czas III testu przyływu, min | | | | | | 6 |
| | | czas I testu odbudowy, min | 173 | 35 | 353 | 50 | 17 | 30 |
| | | czas II testu odbudowy, min | - | 97 | - | 146 | 50 | 70 |
| | | czas III testu odbudowy, min | | | | | | 67 |
| 9 | Wartości ciśnienia | ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy, MPa | 32,57 | 33,01 | 33,62 | 29,45 | 30,13 | 29,23 |
| | | naddatek ciśnienia słupa płuczki (represja) na poziom zbiornikowy, MPa | 6,57 | 6,92 | 6,80 | 3,19 | 8,38 | 1,72 |
| | | początkowa depresja podczas opróbowania, MPa | 9,27 | 11,27 | 14,8 | 11,67 | 12,49 | 8,34 |
| Lp. | Nazwa otworu, nr testu | L-7, 87/94 | L-7, 112/94 | L-7, 117/94 | L-7, 121/94 | L-7, 133/94 | S-2K, 8/97 | |
| 1 | Stratygrafia | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | Dewon | |
| 2 | Opróbowany interwał, m | 3019 – 3140 n.o. | 3045 – 3054 perf. | 2875 – 2877 perf. | 2857 – 2864 perf. | 2832 – 2844 perf. | 3255-3265 n.o. | |
| 3 | Średnica otworu, m | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | 0,216 | |
| 4 | Głębokość posadowienia manometru, m | 3010 | 3017,5 | 2855 | 2819 | 2768 | 2994 | |
| 6 | Gęstość płuczki polimerowej podczas przewiercania, kg/m ³ | 1040 – 1030 | 1040 - 1030 | 1040 | 1040 | 1240 - 1190 | 1195 | |
| 6 | Czas od nawiercenia do opróbowania, doba | 5 | ponad 30 dni | ponad 30 dni | ponad 30 dni | ponad 30 dni | 3 | |
| 7 | Wysokość słupa przybitki wodnej, m | 1220 | 1476 | 1185 | 1016 | 450 | 1343 | |
| 8 | Czas testów | czas I testu przyływu (i syfonowania), min | 59 | 117 | 186 | 66 | 74 | 9,2 |
| | | czas II testu przyływu, min | | 1095 | 2068 | 2198 | 575 | 56,5 |
| | | czas III testu przyływu, min | | | | | 1881 | |
| | | czas I testu odbudowy, min | 51 | 314 | 167 | 111 | 251 | 62,2 |
| | | czas II testu odbudowy, min | | 167 | 500 | 961 | 1086 | 84,6 |
| | | czas III testu odbudowy, min | | | | | | |
| 9 | Wartości ciśnienia | ciśnienie hydrostatyczne płuczki na poziom zbiornikowy, MPa | 30,70 | 30,76 | 29,12 | 28,75 | 33,66 | 35,04 |
| | | naddatek ciśnienia słupa płuczki (represja) na poziom zbiornikowy, MPa | 2,31 | 1,60 | 2,28 | 1,88 | 6,81 | 8,05 |
| | | początkowa depresja ciśnienia podczas opróbowania, MPa | 11,35 | 14,2 | 14,66 | 16,97 | 2,49 | 13,107 |

4. Analiza rezultatów testów DST uzyskanych w odwiertach L-7 i 2-SK

4.1. Analiza rezultatów testu nr 133/94 w odwiercie L-7 interpretowanych metodą Hornera:

Do interpretacji danych uzyskanych z testu nr 133/94 zastosowano metodę Hornera [6], uzyskując następujące rezultaty:

- ciśnienie złożowe 26,84 MPa, a gradient tego ciśnienia wynosi: 0,0097 MPa/m; jest to wartość bliska wartości normalnej, wywieranej przez słup wody złożowej;
- współczynnik przewodności hydrodynamicznej badanej warstwy dla gazu ziemnego: $1072 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$; jest to wartość wystarczająca dla komercyjnego wydobycia gazu ziemnego;
- współczynnik przepuszczalności skał zbiornikowych dla gazu ziemnego: $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (około 3 mD); dość dobre warunki filtracyjne dla przepływu gazu ziemnego;
- skin-efekt dodatni, świadczy o znacznym uszkodzeniu przepuszczalności skał w badanej strefie; może to stanowić podstawę do zastosowania zabiegu stymulacji wydobycia gazu ziemnego;
- współczynnik produktywności rzeczywistej gazu (po usunięciu uszkodzenia przepuszczalności skał): $5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{MPa})$ w warunkach powierzchniowych;
- promień strefy złożowej badanej próbnikiem wynosi około 50 m; jest to wystarczająco duży zasięg testu DST, a uzyskane rezultaty mają duże znaczenie przemysłowe.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń można stwierdzić, że badany poziom gazonośnych skał węglanowych dewonu charakteryzuje się dość dobrymi parametrami złożowymi. Stwierdzone próbnikiem znaczne uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej może stanowić podstawę do wykonania zabiegu intensyfikacji przyływu gazu ziemnego do odwiertu w postaci hydraulicznego szczelinowania skał.

4.2. Przykładowa analiza rezultatów testu nr 117/94 w odwiercie L-7, interpretowanych metodą log-log:

Poprzez dopasowanie wykresów rzeczywistych (pomiarowych) do wykresów diagnostycznych (modelowych), przy użyciu programu „Saphir 202B”, otrzymano następujące informacje o złożu i odwiercie:

- a) złożo ma budowę jednorodną, przy czym gorsze dopasowanie uzyskano dla złoża o podwójnej porowatości: szczelinowej i porowej, być może z powodu zbyt dużej kolmatacji skał zbiornikowych przez płuczkę;
 - b) odwiert charakteryzuje się znacznym efektem magazynowym ($9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{MPa}$) i skin-efektem, wskazującym na uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej;
 - c) stwierdzona, pojedyncza granica złoża występuje w postaci uskoku w odległości około 154 m od odwiertu.
- Pozostałe rezultaty tego testu DST są następujące:
- do próbnika przyłączyła się płuczka wiertnicza z solanką (NaCl około 59 g/l) słabo nagazowana gazem palnym; powrotny przyływ płuczki wiertniczej do odwiertu świadczy o dużej inwazji płuczki na złożo;
 - wydatek przyływu płynu do próbnika złoża był mały i wynosił $0,021 \text{ m}^3/\text{godz.}$;
 - stwierdzono niski gradient ciśnienia złożowego: $0,0094 \text{ MPa/m}$;
 - bardzo mała przewodność hydrauliczna badanego poziomu zbiornikowego (kh) wynosząca $1,67 \text{ mD} \cdot \text{m}$ (szkodliwy wpływ płuczki);
 - mała przepuszczalność skał zbiornikowych ($0,7 \text{ mD}$), z powodu uszkodzenia przez płuczkę;
 - promień strefy badanej próbnikiem jest duży i wynosi około 200 m.

Podsumowanie: badany poziom wodo- i gazonośny charakteryzuje się bardzo niskimi parametrami złożowymi, znacznie obniżonymi przez szkodliwy wpływ płuczki wiertniczej.

W tabeli 2 zestawiono wszystkie obliczone przez autorów wartości parametrów złożowych dewonu testowanych w odwiertach L-7 i S-2K.

Tabela 2. Zestawienie obliczonych wartości parametrów złożowych gazonośnych skał zbiornikowych dewonu w odwiertach L-7 i S-2K na podstawie rezultatów testów DST

Table 2. List of calculated reservoir parameters of gas-bearing reservoirs of the Devonian in wells L-7 and S-2K on the basis of DST test results

| Lp. | Nazwa otworu, nr testu | L-7, 39/94 | L-7, 44/94 | L-7, 53/94 | L-7, 62/94 | L-7, 70/94 | L-7, 78/94 |
|-----|---|------------|------------|------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | Rodzaj płynu złożowego | gaz | gaz | gaz | nagazowana płuczka z wodą złożową | płuczka nagazowana | nagazowana woda złożowa |
| 2 | Strumień objętości przyływu cieczy (wydatek), m^3/godz | | | | 12,3 | 0,3 | 8 |
| 3 | Strumień objętości przyływu gazu, m^3/godz . | 1380 | 1080 | 1104 | | | |
| 4 | Gradient ciśnienia złożowego, MPa/m | 0,00955 | 0,0093 | 0,0097 | 0,0093 | - | 0,0096 |
| 5 | Przewodność hydrauliczna ($k \cdot h/\mu$), $10^{-12} \text{ m}^3/\text{Pa} \cdot \text{s}$ | 858 | 1621 | 469 | 1461 | 2 | 273 |
| 6 | Przepuszczalność skał, mD | 0,4 | 2 | 0,2 | 22 | 0,07 | 7 |
| 7 | Wsp. pojemności magazynowej odwiertu, m^3/MPa | | | | | | |
| 8 | Wsp. produktywności rzeczywistej, $\text{m}^3/\text{godz} \cdot \text{MPa}$ | 79,716 | 111,781 | 112,815 | 1,299 | 0,0227 | 0,586 |
| 9 | Stan strefy przyodwiertowej, S_1, S_2, S_3 | $S_1 > 0$ | $S_2 > 0$ | $S_1 > 0$ | $S_2 > 0$ | $S_2 < 0$ | $S_3 > 0$ |
| 10 | Odległość odwiertu do granicy złoża, m | | | | | | |
| 11 | Promień strefy badanej, m | 13 | 40 | 12 | 70 | 16 | 108 |

Tabela 2. cd

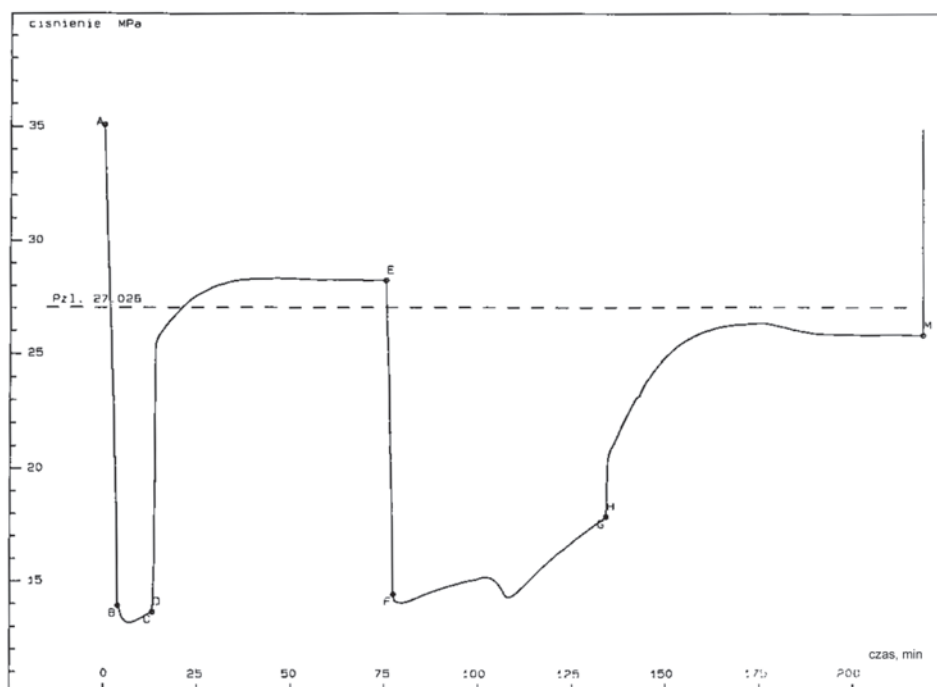
| | Nazwa otworu, nr testu | L-7, 87/94 | L-7, 112/94 | L-7, 117/94 | L-7, 121/94 | L-7, 133/94 | S-2K, 8/97 |
|----|---|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1 | Rodzaj płynu złożowego | nagazowana płuczka z wodą złożową | solanka średnio nagazowana | nagazowana płuczka z solanką | silnie nagazowana płuczka z solanką | gaz z domieszką gazolinową i solanki | gaz |
| 2 | Strumień objętości przyływu cieczy, m ³ /godz. | 14,7 | 0,27 | 0,021 | 0,2 | | |
| 3 | Strumień objętości przyływu gazu, m ³ /godz. | | | | 8,76 | 840 | 50 |
| 4 | Gradient ciśnienia złożowego, MPa/m | 0,0094 | 0,00967 | 0,0094 | 0,00953 | 0,0097 | 0,0090 |
| 5 | Przewodność hydrauliczna ($k\cdot h/\mu$), 10 ⁻¹² m ³ /Pa·s | 4003 | | | 1630 | 1702 | 483,880 |
| 6 | Przepuszczalność skał, mD | 26 | 4 | 0,7 | 105 | 3 | 2,48 |
| 7 | Wsp. pojemności magazynowej odwiertu, m ³ /MPa | | | 9·10 ⁻⁴ | | | |
| 8 | Wsp. produktywności rzeczywistej, m ³ /godz·MPa | 44,183 | | | 0,382 | 43,397 | 327,19 |
| 9 | Stan strefy przyodwiertowej, S ₁ , S ₂ , S ₃ | S ₁ < 0 | S ₂ < 0 | S ₂ > 0 | S ₂ > 0 | S ₂ > 0 | S ₂ > 0 |
| 10 | Odległość odwiertu do granicy złoża, m | | | 154 | | | |
| 11 | Promień strefy badanej, m | 131 | | 200 | 938 | 46 | 20,0 |

4.3. Przykładowa analiza rezultatów testu DST nr 8/97 uzyskanych w odwiercie S-2K interpretowanych metodą Hornera:

Podczas drugiego testu przyływu, po upływie kilkunastu minut (rys. 2 - rys. 3), spadkowy efekt wykresu drugiego przyływu), obserwowano na głowicy wpływ gazu ziemnego o niewielkiej intensywności. Ocena autorska uzyskanych wyników obliczeń jest następująca:

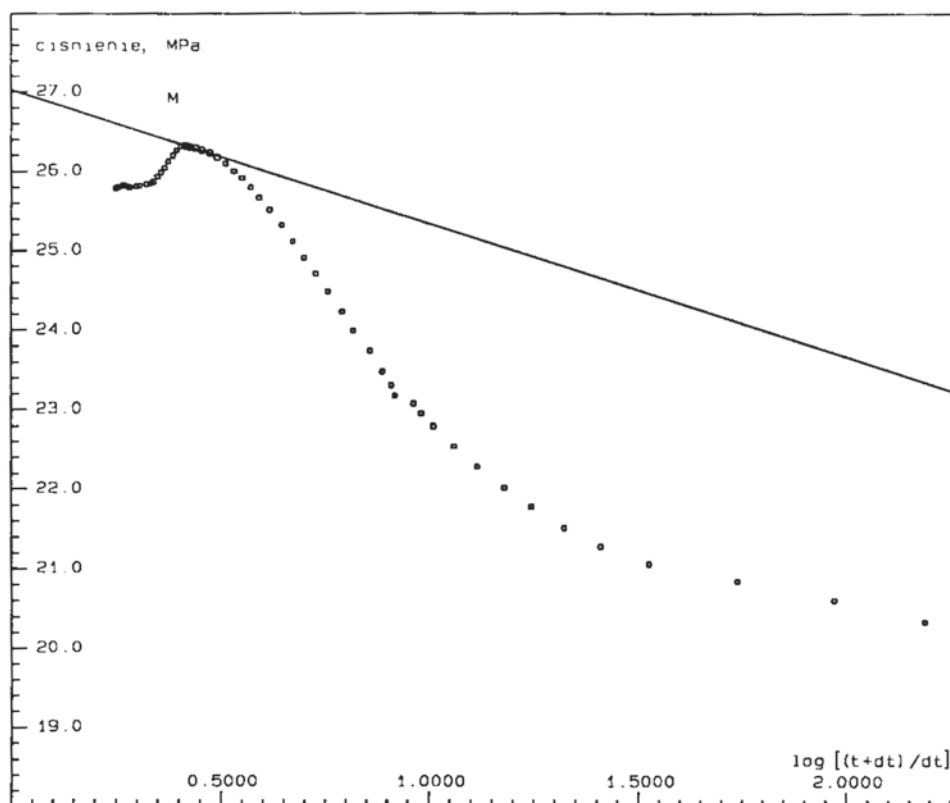
- niska wartość ciśnienia złożowego: 27,03 MPa;
- niski gradient ciśnienia złożowego: 0,0090 MPa/m;
- współczynnik nachylenia prostej w układzie Hornera (rys. 2) m: 1,68 MPa/cyklog, wskazuje na dość dobre właściwości filtracyjne skał;
- współczynnik ściśliwości gazu, obliczony przez autorów na podstawie składu chemicznego gazu pobranego podczas testu DST, ma dużą wartość (gaz gazolinowy) i wynosi 0,926;
- współczynnik objętościowy gazu ma dość dużą wartość: 0,00532 m³/m³;

- średnia wartość przewodności hydraulicznej badanego poziomu dla : 483,9(m³/Pa·s)·10⁻¹²;
- dość duża przepuszczalność skał zbiornikowych dla gazu: 2,5 mD;
- niewielka wartość skin-efektu (S = 1,36) wskazuje na nieznaczne uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej;
- wskaźnik strat (1,99 MPa) wskazuje na niewielkie opory hydrauliczne przepływu płynu złożowego do odwiertu;
- współczynnik produktywności rzeczywistej (uwzględniający uszkodzenie przepuszczalności skał): 5,45 (m³/min)/MPa, ma wartość porównywalną ze współczynnikiem produktywności potencjalnej, uwzględniającym usunięcie uszkodzenia przepuszczalności skał 6,97 (m³/min)/MPa;
- współczynnik uszkodzenia przepuszczalności skał przez płuczkę jest mały 1,28;
- próbnikiem testowano strefę złoża o stosunkowo niewielkim promieniu wynoszącym około 20 m.



Rys. 2. Wykres zmian ciśnienia dennego podczas testu DST nr 8/97 utworów dewonu (3255-3265) w odwiercie S-2K; pzi – ekstrapolowana wartość ciśnienia złożowego, MPa

Fig. 2. Downhole pressure while making DST test no. 8/97 of Devonian strata (3255-3265 m deep) in well S-2K; pzi – extrapolated reservoir pressure value, MPa



Rys. 3. Wyznaczanie wartości ciśnienia złożowego metodą Hornera na podstawie ekstrapolacji II krzywej odbudowy ciśnienia dennego zarejestrowanej w odwiercie S-2K podczas testu DST nr 8/97; t - czas testu przyływu w drugim cyklu DST, min; dt - czas testu odbudowy ciśnienia w drugim cyklu DST, min.

Fig. 3. Determination of reservoir pressure values with Horner method on the basis of extrapolation of II build-up curve in well S-2K while making DST test no. 8/97; t - time of flow test in the second cycle of DST, min; dt - time of build-up test in the second cycle of DST test, min

Analizując obliczone przez autorów wartości parametrów złożowych utworów dewonu zestawione w tabeli 2, można stwierdzić, że:

- rodzaj płynu złożowego przyływającego do testowanego odwiertu jest zróżnicowany (gaz, gazolina, solanka), lecz jednak z przewagą przypadków przyływu gazu ziemnego;
- gradient ciśnienia złożowego jest nieco niższy od wartości normalnej (około 0,01 MPa/m) i waha się w granicach (0,0090 ÷ 0,0097) MPa/m; niewielki strumień objętości przyływu cieczy (woda złożowa, płuczka): (0,2 ÷ 14,7) m³/godz.

Stwierdzono bardzo szerokie granice zmian obliczonych wartości parametrów złożowych (tab 2., wiersze: 2 - 6):

- strumień objętości przyływu gazu jest bardzo zróżnicowany, (8,76 ÷ 1380) m³/godz, w warunkach normalnych;
- gradient ciśnienia złożowego (0,0093 ÷ 0,0097) MPa/m;
- przewodność hydrauliczna ($k \cdot h / \mu$) (2 ÷ 4003) · 10⁻¹² m³/Pa · s;
- przepuszczalność skał (0,07 ÷ 105) mD;
- współczynnik produktywności rzeczywistej (0,0227 ÷ 327,19) m³/godz · MPa.

Stan strefy przyodwiertowej będącej pod oddziaływaniem płuczki wiertniczej oceniano na podstawie wartości S1, S2, S3, stwierdzając w 9 przypadkach uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej ($S > 0$), a w trzech przypadkach polepszenie tej przepuszczalności ($S < 0$).

Promień strefy badanej próbnikiem wahał się w granicach 13 ÷ 938 m i w porównaniu z innymi obszarami poszukiwań naftowych są to wartości zadawalające.

4. Wnioski

1. Należy podkreślić, że w wielu przypadkach przemysłowych zastosowana, nowoczesna technologia testów DST gazonośnych utworów dewonu (testy przyływu, stabilizacja ciśnienia głowicowego, testy odbudowy ciśnienia dennego oraz syfonowanie odwiertu - wstępny test produkcyjny) była możliwa do zrealizowania dzięki zastosowaniu próbnika typu Ful-Flo.
2. Dobry stan techniczny sprzętu próbnikowego typu Ful-Flo i sprawne działanie oraz właściwy jego dobór w zależności od warunków otworowych i złożowych, znacznie zmniejszyło ryzyko wystąpienia awarii i komplikacji oraz koszt opróbowania głęboko zalegających, gazonośnych utworów dewonu w odwiertach L-7 i S-2K. Pewność działania poszczególnych elementów tego próbnika jest najważniejszym czynnikiem bezkomplicyjnego opróbowania.
3. Analiza rezultatów testów DST uzyskanych tym próbnikiem obejmuje istotne dla poszukiwań naftowych informacje złożowe dotyczące:
 - rodzaju płynu złożowego (gaz ziemny i jego skład, gazolina, woda złożowa i jej zasolenie),

- podstawowych parametrów złożowych badanej warstwy gazonośnej (ciśnienie złożowe, współczynnik przewodności hydrodynamicznej dla gazu ziemnego, przepuszczalność skał dla gazu, współczynnik produktywności rzeczywistej),
 - występowania granic złoża (uskoki),
 - zmian przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej oraz w strefie badanej próbnikiem,
 - produktywności testowanego odwiertu,
 - decyzji o konieczności zastosowania zabiegów stymulacji wydobycia gazu.
4. Przyipywy gazu ziemnego do odwiertów L-7 i S-2K, określone na podstawie testów DST wynoszą od około 0,15 m³/min do około 23 m³/min w warunkach powierzchniowych i po zabiegach stymulacyjnych wydobycie gazu ziemnego może mieć znaczną wartość komercyjną.

Praca wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.190.555 Katedry Inżynierii Naftowej oraz Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH.

Literatura

1. Baran U., Jawor E., Jawor W.: Rozpoznanie geologiczne i wyniki prac poszukiwawczych za węglowodorami w zachodniej części polskich Karpat. „Przegląd Geologiczny” 1997, nr 1, s. 66-75.
2. Composite catalog of oil field equipment and services. World Oil. A Gulf Publishing Company Publication. Huston, Texas USA, 1986-87.
3. Dubiel S.: Metodyka interpretacji wyników dwucyklowego opróbowania gazo- i roponośnego poziomu perspektywicznego rurowym próbnikiem złoża. Kwartalnik „Górnictwo” AGH, 1987, z. 1.
4. Dubiel S., Rzychniak M., Wójtowicz T., Kulaga T.: Analiza i interpretacja wyników badań rurowymi próbnikami złoża warstw perspektywicznych w rejonie Przedgórze Karpat, w celu oceny właściwości zbiornikowych skał i parametrów złożowych poszczególnych poziomów. Praca naukowa – badawcza. WWNiG – AGH, Kraków 1993-1998.
5. Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzychniak M.: Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
6. Horner D. R.: Pressure build-up in wells. Third World Cong. Hagua 1951.
7. Jawor E.: Rozpoznanie geologiczno-złożowe i kierunki dalszych prac w środkowej i zachodniej części Karpat i Zapadliska Przedkarpacciego. „Nafta Gaz” 1997, nr 3.
8. Kamal M. M., Freyder D.G., Murray M.A.: Use of transient testing in reservoir management. Journal of Petroleum Technology. November 1995.
9. Materiały Konferencyjne firmy Schlumberger: Well test interpretation for monophasicoil and gas by analysis of pressure behavior. 19 - 20 stycznia. Warszawa 1993.
10. Oprogramowanie interpretacji testów otworowych firmy Kappa. ZPNiG, Kraków 1993-95.
11. Oprogramowanie interpretacji testów złożowych francuskiej firmy Kappa. Materiały firmy Kappa, ZPNiG, Kraków 1993-1995.
12. Uliasz-Misiak B., Dubiel S.: Diagnostowanie dopływów wody złożowej do odwiertów wydobywczych na złożach węglowodorów. „Przegląd Górniczy” 2013, nr 12, s. 49.