



STANISŁAW DUBIEL*, BARBARA ULIASZ-MISIAK**

Wykorzystanie testów DST w rozpoznaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów na przykładzie utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego

Wprowadzenie

Rozpoznanie złóż węglowodorów odbywa się różnorodnymi metodami, a spośród nich szczególnie często wykorzystywane są metody pośrednie (np. badania geofizyczne, hydrodynamiczne, termodynamiczne). Do badań hydrodynamicznych zalicza się testy złożowe rurowymi próbnikami złoża (DST – *Drill Stem Testing*). Ażeby uzyskać pełny sukces w dziedzinie planowania i realizacji testów złożowych DST wykonywanych w ramach procesu rozpoznawania i udostępniania złoża, konieczna jest ścisła współpraca geologów, geofizyków, wiertników, specjalistów laboratoryjnych oraz specjalistów z zakresu dowiercania i opróbowania złóż węglowodorów. Umożliwi to pełną integrację wymienionej problematyki badawczej i obejmuje decyzje w zakresie doboru sprzętu, technologii oraz metod analizy i interpretacji danych.

Perspektywiczność utworów zbiornikowych (porowatość i miąższość) określana jest głównie na podstawie wyników badań geofizyki wiertniczej. Równocześnie wykorzystuje się tutaj często wyniki laboratoryjnych badań rdzeni wiertniczych oraz obserwacji procesu przewiercania tych utworów (objawy węglowodorów, zaniki płuczki wiertniczej, erupcje wstępne).

* Prof. dr hab. inż. ** Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Inżynierii Naftowej; e-mail: sdubiel@agh.edu.pl

Produktywność utworów zbiornikowych (rodzaj i wydatek płynu złożowego, ciśnienie złożowe, przepuszczalność skał kolektorskich) określana jest na podstawie interpretacji wyników testów: DST oraz produkcyjnych. Wykorzystuje się również w tym celu wyniki badań laboratoryjnych (skład chemiczny i parametry fizyczne pobranych w czasie badań DST próbek płynów złożowych).

Planowanie technologii testów złożowych DST utworów zbiornikowych (jednocyklowe z przyływem cieczy, dwucyklowe z przyływem cieczy i objawami gazu, wielocyklowe z syfonowaniem gazu) realizowanych w interwale nieorutowanym lub po perforacji okładziny odwiertu, ma istotny wpływ na rodzaj i jakość uzyskiwanych rezultatów. Konieczne jest uwzględnienie przy tym wszystkich dostępnych danych geologicznych, geofizycznych, wiertniczych oraz danych z badań DST uzyskanych w sąsiednich odwiertach, a także rezultatów przetwarzania tych danych, np. dane geostatystyczne (Dubiel i Uliasz-Misiak 2013). Planowanie podstawowych parametrów technologii testów złożowych DST (początkowa depresja ciśnienia, czas testów przyływów płynu złożowego, czas testów odbudowy ciśnienia dennego) zależy od warunków geologicznych (rodzaju skały zbiornikowej, spodziewanego rodzaju płynu złożowego, warunków udostępnienia złoża – interwał orutowany i perforowany lub nieorutowany w trakcie dowiercania, względnie nad korkiem cementowym) oraz stosowanych metod interpretacji rezultatów testów (np. metoda Hornera, metoda log-log) (Dubiel i in. 2003).

Udostępnianie złoża do eksploatacji może być realizowane odwiertem pionowym lub kierunkowym, nieorutowanym lub orutowanym w strefie złożowej (z perforacją rur okładzinowych) oraz z zastosowaniem pakerów lub korków cementowych, umożliwiających selektywne wykonywanie poszczególnych zabiegów technologicznych (testowanie, stymulacja, produkcja) (Uliasz-Misiak i Dubiel 2013). Proces udostępniania złoża obejmuje także zabiegi intensyfikacji przyływu płynu złożowego do odwiertu (płukanie strefy przyotworowej środkami powierzchniowo-czynnymi, kwasowanie matrycy skalnej, hydrauliczne szczelinowanie skał kolektorskich).

Możliwości wykorzystania wyników testów DST przy rozpoznaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów przedstawiono na przykładzie opróbowań skał zbiornikowych wieku górnej jury–dolnej kredy. Testy DST przeprowadzono w latach 1985–1998 w węglanowych utworach jury górnej–kredy dolnej, występujących w podłożu centralnej części zapadliska przedkarpacciego, w obszarze Bochnia–Dębica. Na analizowanym obszarze osady górnej jury–dolnej kredy wykształcone są jako zróżnicowane facjalnie utwory węglanowe, w których występują akumulacje ropy naftowej i gazu ziemnego (Krajewski i in. 2011; Kuśmierk 2004; Maksym i in. 2001).

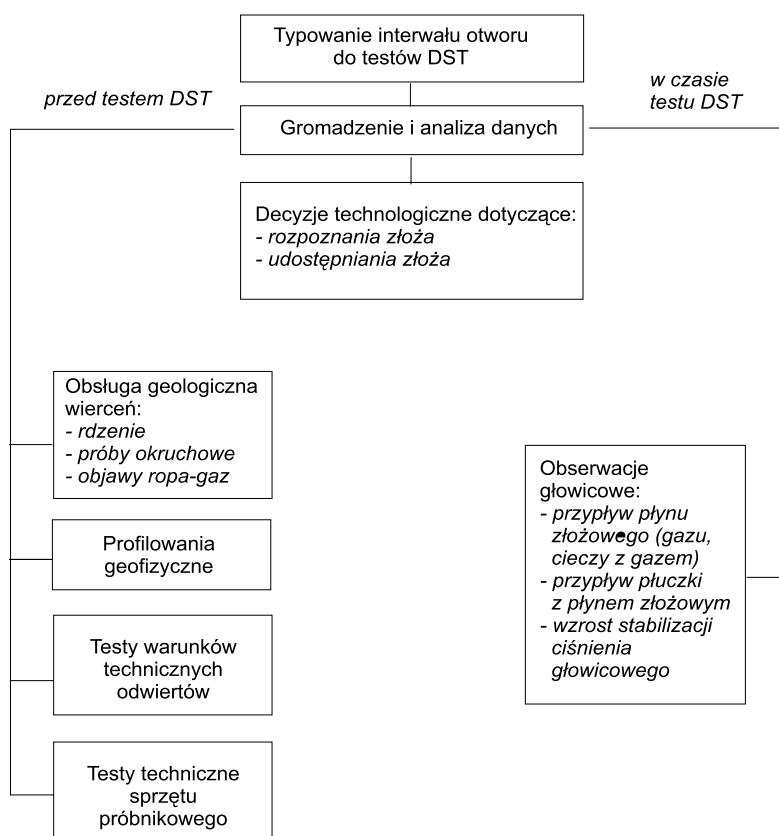
1. Zastosowanie danych z testów DST

Poprawnie przeprowadzone testy DST umożliwiają uzyskanie licznych danych, zarówno z bezpośrednich pomiarów – temperatura, ciśnienie – jak również z interpretacji wykresów

ciśnienia oraz próbek płynów złożowych. Zgromadzone dzięki testom DST dane stanowią bardzo ważne źródło informacji przy poszukiwaniu, rozpoznawaniu (planowanie technologii DST) i udostępnianiu złóż ropy naftowej i gazu ziemnego (dobór konstrukcji strefy eksploatacyjnej odwiertu, projektowanie trajektorii odwiertów horyzontalnych, dobór zabiegów stymulacyjnych).

Przy ustalaniu technologii DST i projektowaniu parametrów technologicznych tych testów bardzo ważnym elementem jest gromadzenie oraz analiza danych dostępnych przed testem oraz pozyskiwanych w jego trakcie (rys. 1). Niezbędna jest dobra znajomość danych geologicznych (stratygrafia, litologia, tektonika) oraz złożowych (porowatości i przepuszczalności skał oraz miąższości poziomu perspektywicznego). Ponieważ warunki geologiczno-złożowe rozpoznawane są zawsze z określoną dokładnością, stanowią one jeden z głównych elementów wpływających na niepewność i ryzyko związane z poszukiwaniem złóż węglowodorów i oceną produktywności testowanych odwiertów.

Przedstawione na schemacie rodzaje danych są przydatne przy podejmowaniu decyzji technologicznych tak podczas planowania, jak też i w czasie realizacji testów DST.



Rys. 1. Schemat akwizycji i analizy danych dotyczących badań DST

Fig. 1. Schematic of DST data acquisition and processing

Planowanie technologii testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej opiera się na podejmowaniu decyzji dotyczących m. in.:

- ◆ ustalenia liczby oraz czasu trwania cykli testu,
- ◆ doboru wartości początkowej depresji ciśnienia,
- ◆ technologii syfonowania odwiertu w przypadku stwierdzenia przyływu gazu ziemnego.

Planowanie to ma na celu otrzymanie wiarygodnych rezultatów badań umożliwiających:

- ◆ typowanie poziomów produktywnych do zabiegów stymulacji wydobywania (kwasowanie, szczelinowanie hydrauliczne),
- ◆ podejmowanie decyzji dotyczących sposobu uzbrojenia wglębnego i powierzchniowego odwiertów eksploatacyjnych,
- ◆ opracowywanie i kalibrację modeli symulacyjnych złoża węglowodorów.

Jest to zwykle możliwe dopiero dzięki wykorzystaniu połączonych zasobów wiedzy specjalistów, stosowanych technologii i urządzeń oraz dostępności danych i form ich przetwarzania na każdym etapie poszukiwania, rozpoznania i udostępniania złoża.

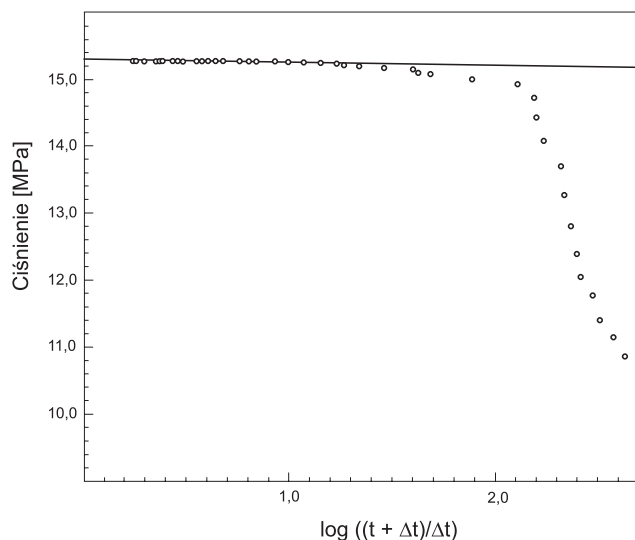
2. Rozpoznanie złóż węglowodorów w utworach jury górnej–kredy dolnej na podstawie rezultatów testów DST

2.1. Dane z testów DST w rozpoznaniu warunków geologicznych i złożowych jury górnej–kredy dolnej

Badania rurowymi próbnikami złoża mogą dostarczyć wiarygodnych danych dotyczących właściwości zbiornikowych skał (przewodność hydrauliczna, przepuszczalność efektywna skał) oraz parametrów złożowych (ciśnienie złożowe, wskaźnik wydobywania płynu złożowego) już na wstępnym etapie rozpoznawania złoża (t.j. w trakcie wiercenia otworu). Podczas testów DST dokonuje się między innymi rejestracji wykresów ciśnienia dennego oraz pobiera próbkę płynu złożowego.

Interpretację wykresów ciśnienia realizuje się w przemyśle tradycyjną metodą Hornera lub nowoczesną metodą log-log (Horner 1967; Bourdet i in. 1983; Bourdet 2003). W metodzie Hornera parametry złożowe określa się na podstawie analizy końcowej części wykresu odbudowy ciśnienia dennego w półlogarytmicznym układzie współrzędnych (rys. 2). Metoda log-log bazuje na analizie porównawczej rzeczywistych i modelowych wykresów przyrostów ciśnienia oraz pierwszej pochodnej przyrostu ciśnienia w funkcji czasu, w układzie podwójnie logarytmicznym. Na tej podstawie dokonuje się diagnozy modelu złoża, modelu udostępniania złoża oraz modelu granicy złoża, a także szacuje się parametry złożowe (Bourdet 2003).

Kilkadziesiąt krótkotrwałych (60–100 min.) jedno- lub dwucyklowych rejestracji wykresów ciśnienia podczas testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego interpretowane było metodą Hornera.



Rys. 2. Interpretacja metodą Hornera wykresu II odbudowy ciśnienia dennego zarejestrowanego podczas testu DST utworów jury górnej–kredy dolnej w odwiercie Ż-42

Fig. 2. Interpretation of II downhole build-up pressure registered during DST tests of Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata in Ż-42 well with Horner method

Interpretacje rezultatów testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej wykonanych w otworze Z-42 metodą Hornera (rys. 2) umożliwiły uzyskanie informacji o podstawowych parametrach złożowych (tab. 1).

Opróbowanie dwucykłowe utworów jury górnej–kredy dolnej w otworze Ż-42 wykonane w przedziale głębokości 1635–1701 m pozwoliło na otrzymanie wykresów zmian ciśnienia dennego nadających się do interpretacji nie tylko metodą Hornera, ale również

Tabela 1. Parametry złożowe utworów jury górnej–kredy dolnej oszacowane na podstawie rezultatów testu DST zinterpretowanych metodą Hornera w otworze Ż-42

Table 1. Reservoir parameters of Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata calculated from DST tests interpreted with Horner method in Ż-42 well

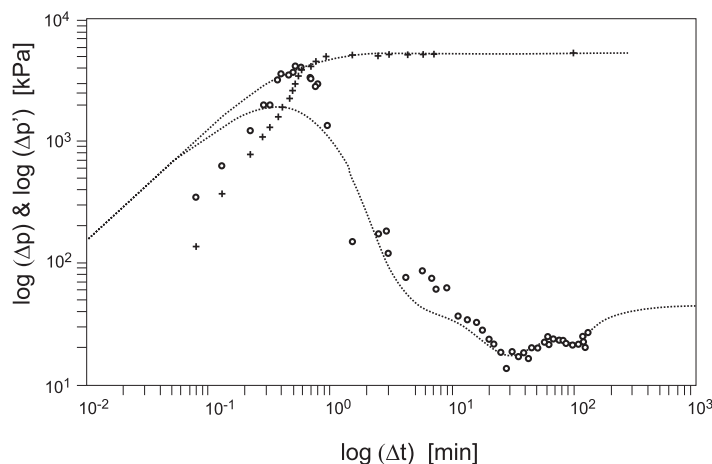
Lp.	Parametr	Test odbudowy ciśnienia	
		I	II
1.	Wydajność solanki [m ³ /godz.]	2,6	2,3
2.	Ciśnienie złożowe[MPa]	15,3	15,3
3.	Przewodność hydrauliczna [10 ⁻¹² m ³ /Pa·s]	2 744,6	2 596,0
4.	Przepuszczalność efektywna skał [mD]	128,6	121,6
5.	Skin-efekt [-]	+264,7	+120,5
6.	Promień strefy badanej DST [m]	234,0	457,0

metodą log-log. W trakcie badania DST uzyskano przyływ nagazowanej solanki o zasoleniu 124 g NaCl/dm^3 .

W kilkunastu przypadkach do interpretacji rezultatów dłuższych czasowo (ponad 100 minut do kilku godzin) testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego stosowana była metoda log-log.

Interpretacja rezultatów II testu odbudowy ciśnienia tego samego testu DST utworów jury górnej–kredy dolnej wykonanego w otworze Ż-42 metodą log-log (rys. 3) umożliwiła dokonanie diagnostyki złożowej badanej skały. Na jej podstawie dopasowano teoretyczny model złoża; jest to złożo o podwójnej porowatości z przepływem w stanie pseudoustalonym, co odpowiada skale porowo-szczelinowej. Dopasowano również teoretyczny model udostępnienia złoża; jest to odwiert charakteryzujący się znacznym współczynnikiem magazynowym. W strefie przyodwiertowej stwierdzono duży skin-efekt świadczący o znacznym uszkodzeniu strefy przyodwiertowej. Dopasowano teoretyczny model granicy złoża; jest to złożo nieograniczone w promieniu badania DST, w II cyklu testu promień ten wynosił 315 m (tab. 2).

Badany poziom wodonośny z objawami gazu ziemnego charakteryzuje się dobrymi właściwościami zbiornikowymi (por. tab. 1 i 2). Stwierdzone na podstawie nagazowania solanki występowanie nasycenia gazem ziemnym wskazuje na możliwość, że poziom ten w innej części badanej struktury geologicznej może mieć większe nasycenie węglowodorami. Stanowi to przesłankę do kontynuacji poszukiwań węglowodorów w innych obszarach występowania badanego poziomu. Uzyskane rezultaty, a zwłaszcza obliczone parametry złożowe utworów jury górnej–kredy dolnej stanowią cenne dane dla rozpatrywanego obszaru poszukiwań naftowych (Dubiel i Uliasz-Misiak 2013).



Rys. 3. Interpretacja wyników testu DST utworów jury górnej–kredy dolnej w otworze Ż- 42 metodą log-log (Dubiel i in. 1993–1997)

Fig. 3. Interpretation of DST results from Upper Jurassic Lower Cretaceous strata in Ż-42 well with log-log method (Dubiel et al. 1993–1997)

Tabela 2. Parametry złożowe utworów jury górnej–kredy dolnej oszacowane na podstawie rezultatów testu DST zinterpretowanych metodą log-log w otworze Ż-42

Table 2. Reservoir parameters of Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata evaluated on the basis of DST results interpreted with log-log method in Ż-42 well

Lp.	Parametr	Wartość
1.	Ciśnienie złożowe [MPa]	15,3
2.	Przewodność hydrauliczna [mD·m]	892,4
3.	Przepuszczalność efektywna skał [mD]	55,0
4.	Skin –efekt [–]	+50,4
5.	Współczynnik magazynowy odwiertu [m ³ /kPa]	$2,9 \cdot 10^{-6}$
6.	Bezwymiarowy współczynnik magazynowy [–]	114,8
7.	Mobilność (ruchliwość) [–]	74,4
8.	Iloraz pojemności szczelin i pojemności całkowitej skały porowo-szczelinowej [–]	0,19
9.	Współczynnik przepływu międzyporowego [–]	$5,8 \cdot 10^{-7}$
10.	Promień strefy badania DST [m]	315,0

2.2. Dane uzyskane z testów DST w projektowaniu technologii opróbowań

Przy projektowaniu testów DST istotną rolę odgrywa właściwy dobór wartości początkowej depresji ciśnienia ($Dp_o = p_z - p_p$). Parametr ten wpływa na możliwość uzyskania i wielkość strumienia objętości przyływu płynu złożowego oraz na jakość rejestracji krzywych zmian ciśnienia dennego. Ponadto wywarcie zbyt dużej depresji na skały porowo-szczelinowe jury górnej–kredy dolnej może spowodować zwieranie się szczelin i mikroszczelin. Natomiast zbyt mała wartość ilorazu początkowej depresji ciśnienia do repesji ciśnienia, może nie gwarantować oczyszczenia się skał z płuczki wiertniczej, a zwłaszcza jej fazy stałej.

Celowe jest więc, aby każdy dobór tego parametru poprzedzony był badaniami jego wpływu na wyniki opróbowań (Dubiel i Uliasz-Misiak 2010).

Przy projektowaniu technologii testów DST poziomów perspektywicznych można stosować wartości parametrów technologicznych prognozowane metodami statystycznymi (Dubiel i Uliasz-Misiak 2012, 2013).

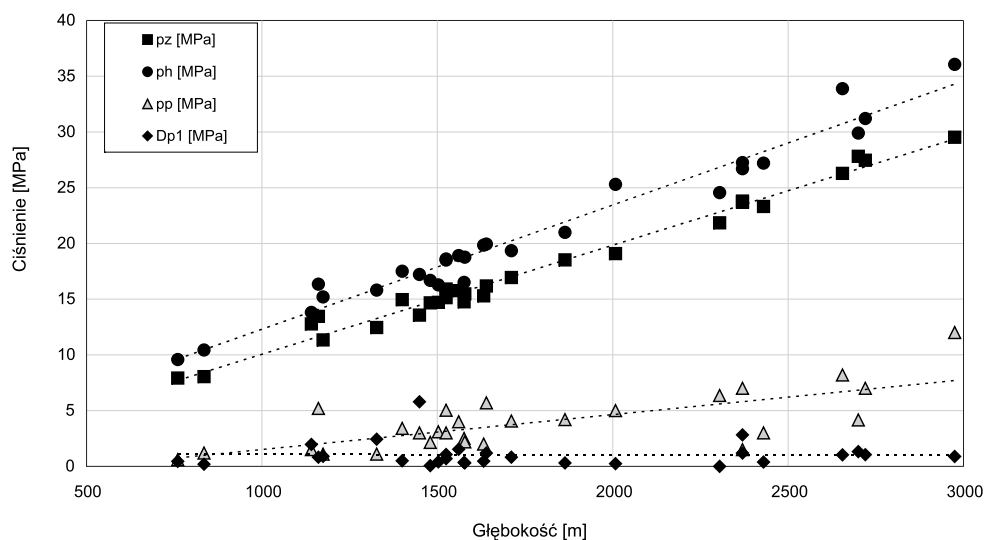
Dla utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego przeanalizowano metodami statystycznymi następujące zależności (tab. 3 i rys. 4):

- ◆ ciśnienie złożowe (p_z) w funkcji głębokości umieszczenia manometru (H_m),
- ◆ ciśnienie hydrostatyczne słupa płuczki w odwiercie (p_h) w funkcji głębokości umieszczenia manometru (H_m),
- ◆ przeciwcisnienie na złożo na początku testu przyływu w funkcji głębokości umieszczenia manometru (H_m),

Tabela 3. Zestawienie wyników analizy statystycznej zmian wybranych ciśnień w zależności od głębokości

Table 3. Results of statistical analyses of selected build-up pressures depending on depth

Lp.	Równanie regresji liniowej	Współczynnik korelacji R	Krytyczna wartość R	Stopnie swobody	Zakres pomiarowy
1.	$p_h = 0,0111 \cdot H_m + 1,1701$	$R^2 = 0,9645$ $R = 0,9821$	0,3809	27	H_m [760–2975 m] p_h [9,58–36,06 MPa]
2.	$p_z = 0,0098 \cdot H_m + 0,2871$	$R^2 = 0,9842$ $R = 0,9921$	0,3809	27	H_m [760–2975 m] p_z [7,93–29,52 MPa]
3.	$p_p = 0,0031 \cdot H_m - 1,6178$	$R^2 = 0,5196$ $R = 0,7208$	0,3809	27	H_m [760–2975 m] p_p [0,5–12,0 MPa]
4.	$\Delta p_1 = -2E-05 \cdot H_m + 1,0725$	$R^2 = 7E-05$ $R = 0,0084$	0,3809	27	H_m [760–2975 m] Δp_1 [0,06–5,8 MPa]



Rys. 4. Zależność ciśnienia p_h , p_z , p_p i Δp_1 od głębokości dla utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego

Fig. 4. Dependence of pressure p_h , p_z , p_p i Δp_1 on depth for Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata in the Carpathian Foredeep

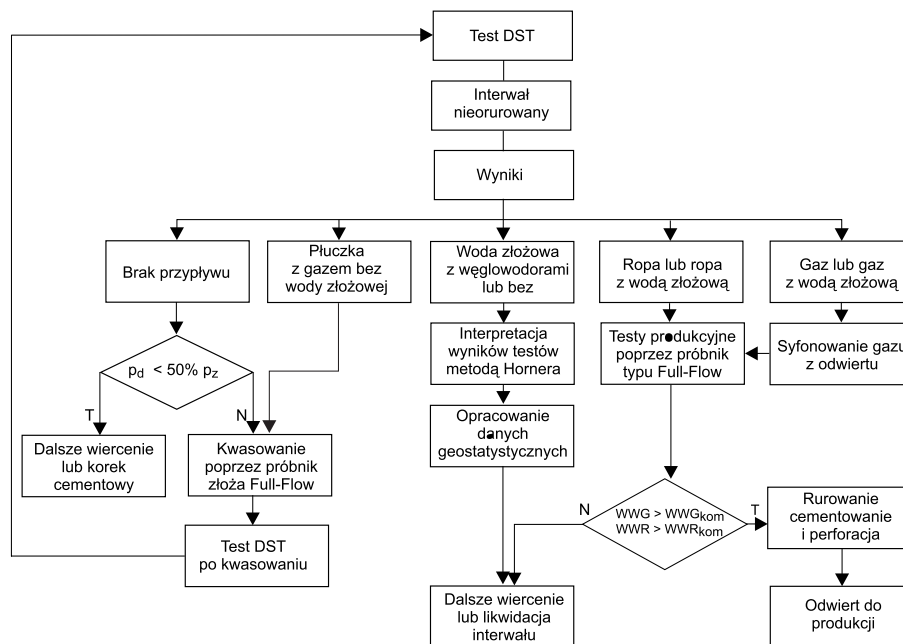
- ◆ przyrost przeciwcisnienia na złożę Δp_1 (spowodowanego oporami przyływu płynu złożowego do próbnika) w funkcji głębokości umieszczenia manometru (H_m).

Dla pierwszych dwóch zależności (por. tab. 3) stwierdzono bardzo dobrą korelację, a dla trzeciej zadowalającą korelację pomiędzy analizowanymi wielkościami. Wyniki tej analizy umożliwiają więc prognozowanie wartości ciśnień p_h , p_z , p_p dla potrzeb projektowania kolejnych testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej w nowych odwiertach. W czwartym przypadku nie stwierdzono korelacji pomiędzy badanymi wielkościami.

Na podstawie rysunku 4 można dobrać wartość początkowej różnicy ciśnienia Δp_0 , a także określić korzystną wartość ilorazu represji ciśnienia płuczki do depresji ciśnienia w początkowym momencie testu przyływu: $(p_z - p_p)/(p_h - p_z)$. Zakres zalecanych wartości tego ilorazu wynosi od 3,6 (na głębokości 760 m) do 4,4 (na głębokości 2975 m). Przy projektowaniu tych parametrów można przyjmować wartość tego ilorazu na około 4.

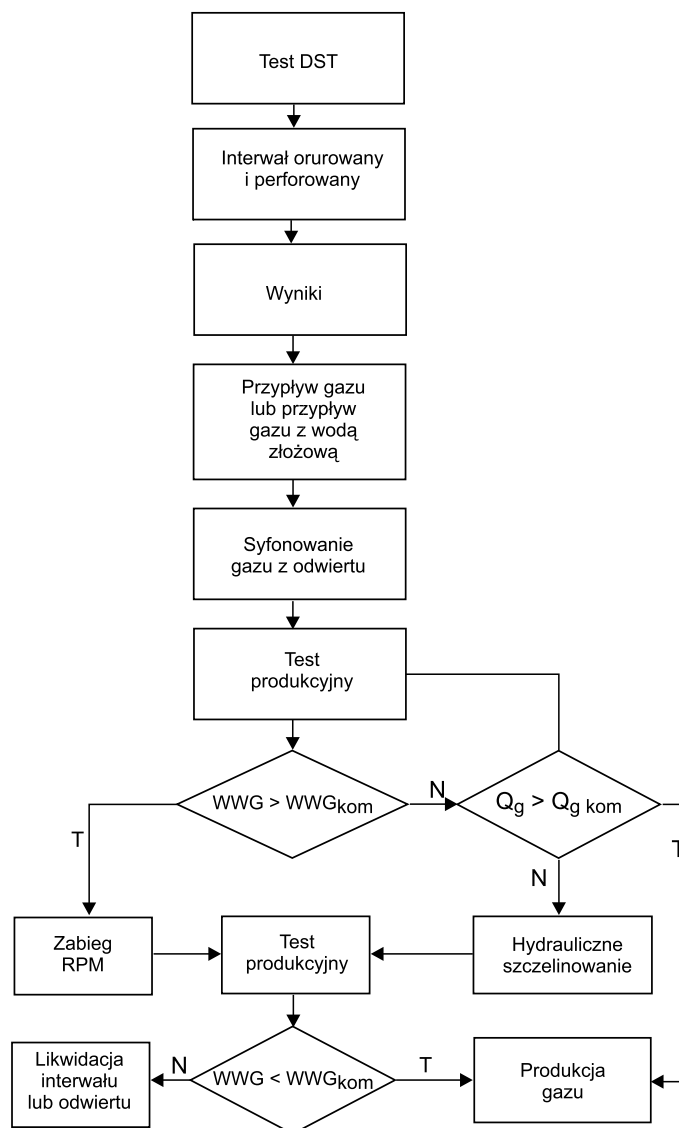
3. Decyzje w zakresie udostępniania złóż węglowodorów w utworach jury górnej–kredy dolnej na podstawie rezultatów testów DST

Testy DST mogą stanowić podstawę do podejmowania decyzji technologicznych na etapie udostępniania złoża. Na podstawie analizy danych przemysłowych oraz własnych doświadczeń, autorzy opracowali schematy decyzyjne w zakresie udostępniania utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Schemat blokowy decyzji technologicznych udostępniania złoża podejmowanych na podstawie danych z testów DST jury górnej–kredy dolnej w interwałach nieorurowanych:
 p_d – ciśnienie denne; p_z – ciśnienie złożowe; WWG, WWG_{kom}, WWR, WWR_{kom} – obliczony i graniczny (komercyjny) wykładnik wodno-gazowy lub wodno-ropny

Fig. 5. Block diagram of technological decisions on deposit development taken on the basis of DST tests in Upper Jurassic-Lower Cretaceous strata in open intervals:
 p_d – bottom pressure; p_z – reservoir pressure; WWG, WWG_{kom}, WWR, WWR_{kom} – calculated and boundary (commercial) water/gas or water/oil index



Rys. 6. Schemat blokowy decyzji technologicznych udostępniania złoża w interwale orurowanym i perforowanym, podejmowanych na podstawie danych z testów DST jury górnej–kredy dolnej w przypadku przyływu gazu lub cieczy nagazowanej:

Q_g , $Q_{g\text{ kom}}$ – wydatek przyływu gazu ziemnego oraz gazu o wartości komercyjnej;
 WWG , WWG_{kom} – obliczony i graniczny (komercyjny) wykładnik wodno-gazowy;
 RPM – zabieg modyfikacji względnej przepuszczalności skał dla wody

Fig. 6. Block diagram of technological decisions regarding deposit development in cased and perforated interval based on DST tests of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata in the presence of gas flow or gas-saturated fluid in uncased interval:

Q_g , $Q_{g\text{ kom}}$ – yield of natural gas and gas of commercial value; WWG , WWG_{kom} – calculated and boundary (commercial) water/gas index; RPM – relative permeability modification of rocks for water

Procedury opracowano oddzielnie dla przypadku udostępnienia złoża interwałem nieorurowanym i testowaniu go po upływie do kilkunastu dni po jego przewierceniu (por. rys. 5) oraz dla przypadku udostępnienia złoża poprzez perforację rur okładzinowych (por. rys. 6).

Pierwszy etap testu DST to test przyływu. Na podstawie wyników testu przyływu, w przypadku utworów jury górnej–kredy dolnej, stwierdza się niekiedy brak przyływu lub przyływ płuczki z gazem ziemnym bez wody złożowej. Przy braku przyływu płynu z badanego interwału i małej odbudowie ciśnienia dennego (mniejszej niż 50%) podejmuje się decyzję o dalszym wierceniu lub likwidacji badanego interwału korkiem cementowym. Taki przypadek świadczy o występowaniu skał zbiornikowych o niskiej przepuszczalności i małej energii złożowej. Jeżeli wartość ciśnienia odbudowy jest znacznie większa od 50% ciśnienia złożowego, świadczy to o kontakcie hydraulicznym próbnika ze skałami zbiornikowymi w warunkach o uszkodzonej przepuszczalności. Należy wówczas wykonać w nieorurowanym interwale kwasowanie skał przy użyciu próbnika złoża np. firmy Halliburton typu Full-Flow 5” wyposażonego w kotwicę hydrauliczną typu RTTS (*Retrievable Test-Treat-Squeeze*). Podobny zabieg należy wykonać w przypadkach przyływu płuczki nagazowanej, wskazującej na uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej płuczką powracającą ze złoża do próbnika. Po zabiegu kwasowania skał z dodatkiem środków powierzchniowo-czynnych wykonuje się powtórne testowanie.

Przypadki przyływu nagazowanej wody złożowej (o różnym stopniu nagazowania) stanowią podstawę podjęcia decyzji o likwidacji badanego interwału lub odwiertu, jednak po wcześniejszym ukończeniu pełnego testu DST – zwykle w postaci testu dwucyklowego. Wyniki tych testów wykorzystuje się do określenia podstawowych parametrów złożowych (np. metodą Hornera). Parametry te umożliwiają ocenę warunków złożowych występujących w zawodnionej części rozpoznawanej struktury geologicznej, która w innej części może być gazonośna (Dubiel i Rzyczniak i in. 1993–1998; Dubiel i in. 2012). W takich przypadkach rezultaty testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej można wykorzystać do opracowania danych geostatystycznych, stosowanych przy planowaniu, projektowaniu i modelowaniu złóż. W przypadku zastosowania metody log-log można określić występowanie oraz rodzaj granicy złoża, a także parametry charakteryzujące skałę porowoszczelinową. Następnie kontynuuje się wiercenie lub likwiduje interwał.

Przyływ gazu ziemnego z wodą lub bez wody złożowej wymaga wykonania syfonowania odwiertu celem oczyszczenia go z resztek płuczki i wody, a następnie wykonania testu odbudowy ciśnienia dennego, w celu określenia podstawowych parametrów złożowych. Istotne jest wówczas określenie wartości wykładnika wodno-gazowego (WWG) oraz ocena, czy jego wartość jest mniejsza od dopuszczalnej wartości komercyjnej (WWG_{kom}). Dopuszczalna wartość komercyjna WWG_{kom} odpowiada granicy opłacalności wydobycia gazu ziemnego z uzasadnioną ekonomicznie ilością wody złożowej. Uwzględnia się przy tym głównie koszty utylizacji wody złożowej wydobytej z gazem ziemnym. Jeśli $WWG > WWG_{kom}$, to realizuje się wiercenie lub likwiduje interwał, natomiast jeśli jest odwrotnie ($WWG < WWG_{kom}$), wówczas przystępuje się do rurowania odwiertu i cementowania rur okładzinowych, a następnie perforacji okładziny odwiertu. Po udostępnieniu złoża przez

perforację odwiert oddaje się do produkcji. Podobne procedury decyzyjne stosuje się w przypadku przyływu ropy naftowej lub ropy naftowej z wodą złożową (por. rys. 5).

W przypadku testowania poziomu jury górnej–kredy dolnej udostępnionego przez perforację rur okładzinowych i uzyskania przyływu gazu ziemnego lub gazu ziemnego z wodą złożową stosuje się odmienne procedury (por. rys. 6).

Jednocześnie testem produkcyjnym stwierdza się czy pomierzona wartość wskaźnika wodno-gazowego (WWG) jest większa, czy też mniejsza od wartości komercyjnej (WWG_{kom}) oraz sprawdza się czy pomierzony wydatek gazu (Q_g) jest większy czy też mniejszy od wartości komercyjnej ($Q_{g, kom}$). Jeżeli stwierdzimy, że $WWG > WWG_{kom}$, to wskazane jest wykonanie zabiegu modyfikacji przepuszczalności względnej skały zbiornikowej (RPM – *Relative Permeability Modification*) (Dubiel i Uliasz-Misiak 2013a; Falkowicz i in. 2012). Po wykonaniu takiego zabiegu należy przeprowadzić test produkcyjny. W przypadku, gdy wydatek przyływu gazu ziemnego przy odpowiednio małej wartości wykładnika wodno-gazowego ($WWG < WWG_{kom}$) jest większy od minimalnego wydatku komercyjnego ($Q_g > Q_{g, kom}$), wówczas można decydować o produkcji gazu. Analogiczne procedury decyzyjne obowiązują w przypadku przyływu ropy naftowej z utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego.

W przypadku gdy $WWG < WWG_{kom}$ oraz $Q_g < Q_{g, kom}$ należy podjąć decyzję o hydraulicznym szczelinowaniu skał zbiornikowych i uwzględnić wyniki kolejnego testu produkcyjnego, dotyczące głównie wykładnika wodno-gazowego.

Podsumowanie

1. Wyniki testów DST wykorzystywane są powszechnie przy poszukiwaniu, rozpoznaniu i udostępnianiu złóż węglowodorów, co przedstawiono na przykładzie utworów górnej jury–dolnej kredy zapadliska przedkarpackiego.
2. Analiza i interpretacja rezultatów testów DST utworów górnej jury–dolnej kredy tradycyjną metodą Hornera oraz nowoczesną metodą log-log (stosowanej w zależności od jakości uzyskanych wykresów ciśnienia) umożliwiła określenie podstawowych parametrów złożowych, a także dokonanie szczegółowej diagnostyki złożowej.
3. Wykazano na przykładzie utworów górnej jury–dolnej kredy zapadliska przedkarpackiego, że możliwe jest wykorzystanie danych statystycznych uzyskanych z testów DST w projektowaniu kolejnych testów.
4. W celu uporządkowania procedur decyzyjnych dotyczących technologii udostępniania i rozpoznania złoża węglowodorów, opracowano odpowiednie schematy blokowe oparte na analizach danych przemysłowych z testów DST utworów jury górnej–kredy dolnej.

LITERATURA

- Bourdet, D.P. 2003. *Well Test Analysis the Use of Advanced Interpretation Models*. Handbook of Petroleum Exploration & Production Vol 3 (HPEP), Tom 3 z Handbook of Petroleum Exploration and Production. Elsevier Science, Amsterdam, 438 s. (in English).
- Bourdet D.P. i in. 1983 – Bourdet, D.P. Whittle, T.M., Douglas, A.A. i Pirard, Y.M. 1983. A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis. *World Oil* 196 (6), s. 95–106 (in English).
- Dubiel, S. Rzyczniak, M. i in. 1993–1998. *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 naukowo-badawcza. Archiwum WwNiG, AGH, Kraków.
- Dubiel, S. i in. 2003 – Dubiel, S., Chrząszcz, W. i Rzyczniak, M. 2003. *Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Dubiel, S. i Uliasz-Misiak, B. 2010. Przegląd wyników badań rurowymi próbnikami złoża mezozoicznych poziomów wodonośnych Nizu. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 26 (3), s. 67–84.
- Dubiel, S. i Uliasz-Misiak B., 2012. Wpływ ciśnienia różnicowego na wydatek wody złożowej podczas badań rurowymi próbnikami złoża utworów miocenu autochtonicznego w zapadlisku przedkarpackim. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 28 (1), s. 157–171.
- Dubiel, S. i Uliasz-Misiak, B. 2013. Analiza statystyczna parametrów zbiornikowych utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego uzyskanych z testów RPZ i pomiarów geofizycznych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 29 (2), s. 119–134.
- Uliasz-Misiak, B. i Dubiel, S. 2013a. Diagnostowanie dopływów wody złożowej do odwiertów wydobywczych na złożach węglowodorów. *Przegląd Górniczy* 69 (12), s. 51–58.
- Dubiel, S. i in. 2012 – Dubiel, S., Zubrzycki, A., Rybicki, C. i Maruta, M. 2012. Application of DST interpretation results by log – log method in the pore-space type estimation for the Upper Jurassic carbonate reservoir rocks of the Carpathian Foredeep basement. *Archives of Mining* 57 (2), s. 413–424 (in English).
- Falkowicz, S. i in. 2012 – Falkowicz, S., Dubiel, S., Cicha-Szot, R. 2012. Problemy ograniczania dopływu wody do odwiertów wydobywczych gazowych i ropnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 28 (1), s. 125–136.
- Horner, D.R. 1967. Pressure Build-Ups in Wells. Pressure Analysis Methods. *Reprint Series, SPE, Richard-son, Texas* 9, s. 25–43 (in English).
- Krajewski, M. i in. 2011 – Krajewski, M., Matyszkiewicz, J. i Król, K., 2011 – Facies of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous deposits from the southern part of the Carpathian Foredeep basement in the Kraków–Rzeszów area (southern Poland). *Annales Soc. Geol. Pol.* 81 (3), s. 269–290 (in English).
- Kuśmirek, J. 2004. Systemy naftowe: pierwotny potencjał węglowodorowy a zasoby prognostyczne ropy naftowej i gazu ziemnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 20 (3), s. 27–54.
- Maksym, A. i in. 2001 – Maksym, A., Baszkiewicz, A., Gregosiewicz, Z., Liszka, B., i Zdanowski, P. 2001. Środowiska sedymentacji i właściwości zbiornikowe utworów najwyższej jury i kredy dolnej rejonu Brzezówka–Zagorzyce na tle budowy geologicznej S części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* 49 (5), s. 401–407.

**WYKORZYSTANIE TESTÓW DST W ROZPOZNANIU I UDOSTĘPNIANIU ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW
NA PRZYKŁADZIE UTWORÓW JURY GÓRNEJ–KREDY DOLNEJ ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO****Słowa kluczowe**

poszukiwania naftowe, jura górna–kreda dolna, zapadlisko przedkarpackie, testy DST,
udostępnianie złóż

Streszczenie

W publikacji przedstawiono problemy wykorzystania wyników testów DST w pracach związanych z rozpoznaniem i udostępnianiem złóż węglowodorów. Możliwość zastosowania wyników testów do projektowania technologii badań DST w rozpoznawanych złożach oraz podejmowanie decyzji technologicznych w trakcie udostępniania złóż przedstawiono na przykładzie utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego.

W projektowaniu technologii testów DST zaproponowano wykorzystanie: wyników badań geofizycznych, prognozowania statystycznego warunków złożowych i parametrów technologicznych, wyników kontroli technicznej testu, stosowanych metod interpretacji oraz przetwarzania uzyskanych rezultatów.

Omówiono możliwość zastosowania informacji uzyskanych z interpretacji testów DST w rozpoznawaniu złóż węglowodorów. Umożliwiają one określenie podstawowych parametrów złożowych, a także dokonanie szczegółowej diagnostyki złożowej możliwe dzięki oparciu na analizie i interpretacji rezultatów testów DST tradycyjną metodą Hornera oraz nowoczesną metodą log-log w zależności od jakości uzyskanych wykresów ciśnienia.

Na przykładzie utworów jury górnej–kredy dolnej zapadliska przedkarpackiego przedstawiono sposób wykorzystania danych statystycznych uzyskanych z testów DST w projektowaniu kolejnych testów.

Na podstawie opracowanych schematów blokowych wykazano, że dogłębna analiza technologii testów DST może poprawić jakość i kompletność uzyskiwanych rezultatów oraz umożliwić podejmowanie efektywnych decyzji technologicznych w procesie udostępniania złóż oraz oceny produktywności badanych utworów.

APPLICATION OF DST TESTS TO HYDROCARBON DEPOSITS EXPLORATION AND DEVELOPMENT ON THE EXAMPLE OF UPPER JURASSIC–LOWER CRETACEOUS STRATA OF THE CARPATHIAN FOREDEEP

Key words

petroleum exploration, Upper Jurassic–Lower Cretaceous, Carpathian Foredeep, DST test, deposit development

Abstract

The problems related to the use of DST tests in works related to hydrocarbon deposits exploration and development are addressed in the paper. The possibility of using results of tests to designing DST technology in recognized deposits, and undertaking technological decisions in the development process are presented on the example of Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata of the Carpathian Foredeep.

At the stage of designing, the following elements were planned to be taken into account in the DST technology: results of well logs, statistical predictions of reservoir conditions and technological parameters as well as results of technological check-ups of the test itself, applied interpretation methods and processing of obtained results.

The possibility of using information obtained from interpretation of DST tests for hydrocarbon deposits recognition was considered. On this basis the main technological parameters can be determined and detailed reservoir diagnostics made on the basis of analysis and interpretation of DST results with traditional Horner method and new log-log method, depending on the quality of the obtained pressure logs.

A method of using statistical data from DST tests for designing successive tests was presented on the example of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous strata in the Carpathian Foredeep.

The analysis of the block diagrams revealed that a thorough study of the DST technology may increase the quality and completeness of the results and enable undertaking efficient technological decisions about the development of deposits and evaluating productivity of the analyzed strata.

