

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Analityczno-graficzny sposób interpretacji danych testu przyływu cieczy do rurowego próbnika złoża oraz porównanie wyników z otrzymanymi metodą *slug test*

W artykule omówiono metodę interpretacji danych pomiarowych początkowego okresu przyływu do rurowego próbnika złoża podaną w pracy „*How to assess the depth of permeability impairment of the wellbore zone using DST flow period data*” oraz przedstawiono wyniki interpretacji takich danych dla odwiertów z krajowego przemysłu naftowego. Wyniki te są w przybliżeniu zgodne z otrzymanymi powszechnie stosowaną metodą wpasowania krzywych tzw. *slug testu* i testów produkcyjnych, co potwierdza poprawność proponowanego podejścia. Przedstawiona metoda nadaje się również do interpretacji zachowania lustra cieczy w studniach wierconych lub odwiertach ropnych o niskim ciśnieniu złożowym po usunięciu porcji cieczy z odwiertu/studni oraz do interpretacji zachowania ciśnienia dennego w czasie przy dopływie cieczy do takich odwiertów. Przedstawiony w wyżej wymienionej pracy model umożliwia obliczenie przepuszczalności skał strefy przyodwiertowej, przepuszczalności złoża, skin efektu oraz głębokości, na jakiej uszkodzona lub poprawiona została przepuszczalność strefy przyodwiertowej, co ma istotne znaczenie przy projektowaniu zabiegów takich jak kwasowanie lub wygrzewanie odwiertów przegrzaną parą wodną.

Słowa kluczowe: studnie wiercone, przepuszczalność, strefa przyodwiertowa, opadanie/podnoszenie lustra cieczy, lustro cieczy, okres przyływu do rpz.

A simple analytical-graphical method for the interpretation of DST flow period data and comparison of results with those obtained using the slug test method

Discussed, is a method for the interpretation of DST flow period data given in „*How to assess the depth of permeability impairment of the wellbore zone using DST flow period data*”. Presented, are results of DST data interpretation for several wells from the domestic oil industry and comparison with results of the “slug test” method. The presented method may be also used for the interpretation of pressure/water level behavior in water wells and other wells in which reservoir pressure, is lower than hydrostatic pressure or in wells which do not flow to the surface. The model presented in above mentioned paper also enables computation of permeability of a wellbore zone, reservoir permeability, skin effect and depth of permeability impairment in the low flow rate wells.

Key words: water well, permeability, wellbore zone, slug test, water table, DST flow period.

Po odizolowaniu opróbowywanego rurowym próbnikiem złoża (rpz) interwału przez zapięcie pakera oraz po otwarciu zaworu głównego próbnika płyn złożowy zacznie wpływać do przewodu, na którym zapuszczono próbnik. W okresie przed wypływem płynu złożowego na powierzchnię zarówno ciśnienie naprzeciw opróbowywanego interwału, jak i natężenie wypływu będą zmieniać się w czasie.

Zaobserwowany zostanie wzrost ciśnienia w wyniku zwiększenia się ciśnienia hydrostatycznego cieczy złożowej gromadzącej się w przewodzie oraz spadek natężenia wypływu ze złoża spowodowany malejącą depresją. Stan taki trwać będzie do momentu wypływu cieczy na powierzchnię lub do ustania wypływu ze złoża w wyniku zrównoważenia ciśnienia złożowego przez ciśnienie hydrostatyczne cieczy

w przewodzie, co nastąpi w przypadku, gdy ciśnienie złożowe będzie niewystarczające do spowodowania wypływu na powierzchnię. W okresie poprzedzającym wypływ cieczy złożowej na powierzchnię ciśnienie naprzeciw opróbowywanego interwału oraz natężenie wypływu są funkcjami czasu, podobnie jak w przypadku odwiertu, w którym lustro płynu ustaliło się na pewnej głębokości i z którego usunięto porcję cieczy, na przykład w wyniku odpompowania.

Metoda interpretacji zmian ciśnienia w funkcji czasu w trakcie przyprływu do rurowego próbnika złoża lub ciśnienia w odwiercie, z którego odpompowano porcję cieczy, dotyczy tylko danych ciśnieniowych zarejestrowanych przed wypływem cieczy na powierzchnię. Niejednokrotnie wymagania dotyczące ochrony środowiska uniemożliwiają dopuszczenie do wypływu cieczy złożowej na powierzchnię, jak to może mieć miejsce, na przykład, przy opróbowaniu rzc odwiertów morskich. W takim przypadku zapis zmian ciśnienia dennego ruchowego w funkcji czasu dla początkowego okresu przyprływu do próbnika jest wszystkim, czym dysponuje się do oceny parametrów zbiornikowych złoża. Do interpretacji takich danych stosowana była dotychczas tzw. metoda *slug test*, podana np. w pracy [1], która polega na wpasowaniu krzywej pomiarowej zależności ciśnienia dennego ruchowego od czasu do jednej krzywej z rodziny krzywych wzorcowych. Wpasowanie takie jest trudne i obciążone niepewnością, gdyż wszystkie krzywe wzorcowe mają bardzo podobny kształt, a niewłaściwy wybór krzywej skutkuje otrzymaniem błędnych wyników. Uzyskane tą metodą rezultaty nie są, zdaniem autorów, jednoznaczne.

W niniejszym artykule przedstawiono analityczno-graficzny sposób interpretacji danych ciśnieniowych okresu przyprływu do rurowego próbnika złoża lub zebranych podczas dopływu do odwiertu po usunięciu z niego porcji cieczy dający jednoznaczne wyniki, oparty na modelu matematycznym. Sposób ten opisany jest w pracy [6], w której wykazano, że w okresie przyprływu ropy lub solanki do rurowego próbnika złoża, a przed jej wypływem na powierzchnię słuszna jest zależność:

$$\log p_D = -5,11 \cdot 10^{-7} \frac{kh\rho}{r_w^2 \mu} \frac{1}{u} t - \log \left(1 - \frac{S}{u} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$$p_D = \frac{p(t) - p_0}{p_1 - p_0} \quad (2)$$

$p(t)$ – ciśnienie na poziomie opróbowywanego interwału,
 p_0 – ciśnienie złożowe,
 p_1 – ciśnienie początkowe na poziomie opróbowywanego interwału (równe ciśnieniu hydrostatycznemu cieczy ponad zaworem próbnika),
 p_D – ciśnienie bezwymiarowe.

Znaczenie pozostałych symboli jest następujące:

k – przepuszczalność złoża [mD],
 h – miąższość opróbowywanego interwału [m],
 ρ – gęstość cieczy [kg/m³],
 r_w – promień wewnętrzny przewodu próbnika [m],
 μ – lepkość cieczy [kg/m · s],
 t – czas [minuty],
 S – skin efekt, bezwymiarowy.

We wzorze (1) u jest pierwiastkiem równania:

$$u = \frac{1}{2} (\ln u - \ln \bar{a}) \quad (3)$$

gdzie:

$$\bar{a} = 0,049 \left(\frac{r_0}{r_w} \right)^2 h \phi \rho c_i \quad (4)$$

przy czym ϕ jest to porowatość skały, r_0 – promień otworu [m], a c_i to ściśliwość skały opróbowywanego horyzontu wraz z nasycającymi go mediami [1/at].

Pierwiastek $u \in \left(\frac{1}{2}, \infty \right)$ równania (3) obliczany jest metodą iteracyjną, którą podajemy za pracą [6]:

Niech dowolna wartość $u = u_0$ z interwału $\left(\frac{1}{2}, \infty \right)$ będzie pierwszą aproksymacją u . Mamy: $u_{i+1} = \frac{1}{2} (\ln u_i - \ln \bar{a})$ dla $i = 0 \dots n$.

Jeżeli $u_{i+1} - u_i \leq \varepsilon$, gdzie ε jest przyjętą stałą, to iterację kończymy, przyjmując $u_{i+1} = u$.

Zazwyczaj kilka iteracji wystarczy do otrzymania przybliżonej wartości u .

Z równania (1) wynika, że sporządzony na podstawie pomiarów wykres zależności $\log p_{Di}$ od t_i dla okresu dopływu do próbnika lub odwiertu, a przed wypływem cieczy na powierzchnię, będzie linią prostą o równaniu:

$$\log p_{Di} = -at_i - b \quad (5)$$

gdzie:

$$a = 5,11 \cdot 10^{-7} \frac{kh\rho}{r_w^2 \mu} \frac{1}{u} \quad (6)$$

$$b = \log \left(1 - \frac{S}{u} \right) \quad (7)$$

W okresie przyprływu mierzona jest wielkość p_{Di} dla rozmaitych czasów przyprływu t_i . W celu określenia wielkości a i b minimalizujących sumę kwadratów błęd:

$$K = \sum_{i=1}^N [\log p_{D_i} + at_i + b]^2 \quad (8)$$

obliczane są pochodne K względem a i b oraz przyrównywane do zera.

Można zatem wykazać, że a i b mają postać:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \log p_{D_i} \sum_{i=1}^N t_i - N \sum_{i=1}^N t_i \log p_{D_i}}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \quad (9)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \sum_{i=1}^N t_i \log p_{D_i} - \sum_{i=1}^N \log p_{D_i} \sum_{i=1}^N t_i^2}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \quad (10)$$

a znając a i b , możemy określić wielkość przepuszczalności k horyzontu oraz wielkość skin efektu S . Istotnie, porównując (6) i (9) oraz (7) i (10), otrzymamy:

$$k = -1,957 \cdot 10^6 \frac{r_w^2 \mu u^{**}}{h\rho} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \log p_{D_i} \sum_{i=1}^N t_i - N \sum_{i=1}^N t_i \log p_{D_i}}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \quad (11)$$

$$S = u^{**} \left[1 - 10 \frac{\sum_{i=1}^N t_i \sum_{i=1}^N t_i \log p_{D_i} - \sum_{i=1}^N \log p_{D_i} \sum_{i=1}^N t_i^2}{N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N t_i \right)^2} \right] \quad (12)$$

Przedstawiona metoda określania k i S pozwala również na wyznaczenie przepuszczalności strefy przyodwiertowej k_s oraz zasięgu uszkodzenia lub poprawy przepuszczalności Δr poprzez przyjęcie następującego rozumowania [3]:

Na podstawie zależności logarytmu ciśnienia bezwymiarowego od czasu zauważono, że dla wyraźnie różnych od zera wartości skin efektu (niezależnie od jego znaku) nachylenie wykresu $\log p_D$ od t zmienia się po pewnym czasie przyływu, przy czym nadal zachowana jest prostoliniowość tego wykresu, zarówno dla krótkiego, jak i dłuższego okresu przyływu, oraz obydwaj odcinki prostoliniowe rozdzielone są krzywą odpowiadającą okresowi przejściowemu.

Mechanizm takiego zachowania funkcji $\log p_D$ od t można wyjaśnić następująco:

Jeżeli założymy, że przepuszczalność strefy przyodwiertowej wynosi k_s dla $r_0 < r < \Delta r$ oraz k dla reszty złoża, to dla krótkich czasów przyływu zmianami ciśnienia objęta jest jedynie strefa przyodwiertowa i wykres $\log p_D$ od t jest liniowy, tak jakby złożo było jednorodne, a jego przepuszczalność równała się k_s (brak oddziaływania skin efektu). W miarę

kontynuacji przyływu zmianami ciśnienia obejmowana jest coraz większa objętość złoża, a na nieliniowy kształt zależności $\log p_D$ od t ma wpływ zarówno przepuszczalność strefy przyodwiertowej k_s , jak i przepuszczalność dalszych części złoża k , z wzrastającym udziałem tej drugiej – taki kształt wykresu odpowiada okresowi przejściowemu spowodowanemu przez różnicę przepuszczalności pomiędzy strefą przyodwiertową a złożem.

Dla długiego czasu przyływu punkty pomiarowe $\log p_D$ od t ponownie zaczynają się układać wzdłuż linii prostej, tak jak wykazano w [3], gdyż objętość złoża o przepuszczalności k objęta zmianami ciśnienia jest wielokrotnie większa od objętości strefy przyodwiertowej, a istnienie strefy przyodwiertowej o odmiennej od złoża przepuszczalności przejawia się występowaniem skin efektu. W konsekwencji punkty pomiarowe zależności $\log p_D$ od t układają się wzdłuż linii prostej zarówno dla krótkiego, jak i długiego czasu przyływu, pozwalając na obliczenie przepuszczalności strefy przyodwiertowej k_s , złoża k oraz skin efektu S , a w konsekwencji również zasięgu uszkodzenia/poprawy przepuszczalności ze znanego wzoru:

$$\Delta r = r_0 \left(e^{\frac{Sk_s}{k}} - 1 \right) \quad (13)$$

We wzorach od (8) do (12) N oznacza liczbę punktów pomiarowych wziętych do konstrukcji linii prostej zależności $\log p_D$ od t dla krótkich i długich czasów przyływu, przy czym przez „krótki” i „długi” czas przyływu rozumiemy okresy, w których punkty pomiarowe $\log p_D$ od t układają się wzdłuż linii prostej odpowiednio po raz pierwszy i drugi, tak jak to widać na załączonych wykresach od 1 do 4.

Przedstawiony sposób interpretacji zależności ciśnienia na poziomie opróbowywanego rurowym próbnikiem złoża horyzontu lub na poziomie warstwy produktywnej w odwiercie ropnym po usunięciu z niego porcji cieczy jest zatem analityczno-graficzny, ponieważ do obliczenia k_s , k , S i Δr używane są wzory analityczne (11), (12) i (13), natomiast punkty pomiarowe zależności $\log p_D$ od t oraz ich liczba N , służące do obliczenia k_s , k i S dla krótkich i długich czasów przyływu, odpowiadających niezależnie pierwszemu i drugiemu odcinkowi prostoliniowemu, wybierane są wizualnie z wykresu $\log p_D$ od t .

W przypadku zbyt krótkiego czasu przyływu cieczy do rprz zmianami ciśnienia objęta jest jedynie strefa przyodwiertowa i na wykresie zależności $\log p_D$ od t nie wystąpi drugi odcinek prostoliniowy, co uniemożliwia obliczenie zasięgu uszkodzenia i przepuszczalności dalej zalegających partii złoża. Podobny – w postaci pojedynczej linii prostej – kształt wykresu zależności $\log p_D$ od t świadczyć może o braku skin efektu w przypadku, gdy czas przyływu był dostatecznie długi.

Przykład 1 (odwiert Pre-2)

- promień otworu $r_0 = 0,108$ m
- promień wewnętrzny rur wydobywczych $r_w = 0,049$ m
- miąższość złoża $2,5$ m
- porowatość złoża $\phi = 0,1$
- gęstość cieczy złożowej $\rho = 1074$ kg/m³
- lepkość cieczy złożowej $\mu = 0,59$ mPa
- ściśliwość całkowita $c_i = 0,00037$ 1/MPa
- ciśnienie złożowe $p_0 = 20,39$ MPa
- ciśnienie początku przyływu $p_1 = 14,43$ MPa

W rozpatrywanym przypadku dla obliczonego wzorem (4) $\bar{a} = 2,3 \cdot 10^{-6}$ otrzymamy po kilku iteracjach $u = 7,4942$, a przyjmując dla $\varepsilon = 0,01$, z (9) i (10) mamy:

$$a = -0,03091 \text{ oraz } b = 0,73674$$

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
0,5	14,91	-0,0370
0,9	14,97	-0,0419
1,6	15,04	-0,0472
2,2	15,13	-0,0545
2,7	15,20	-0,0608
3,3	15,28	-0,0668
4,0	15,35	-0,0735
4,5	15,43	-0,0798
4,9	15,50	-0,0866
5,3	15,59	-0,0939
5,8	15,66	-0,1005
6,2	15,74	-0,1077
6,9	15,81	-0,1148
7,4	15,89	-0,1228
8,3	15,99	-0,1318
8,9	16,09	-0,1423
9,8	16,21	-0,1539
10,9	16,33	-0,1668
11,8	16,44	-0,1786
12,9	16,55	-0,1911
13,8	16,65	-0,2025
14,9	16,76	-0,2158
16,1	16,89	-0,2312
17,2	17,00	-0,2450
18,3	17,12	-0,2613
19,4	17,25	-0,2781
20,5	17,38	-0,2965
21,6	17,50	-0,3150
23,2	17,64	-0,3368
24,5	17,76	-0,3554

skąd na podstawie (11) i (12) otrzymujemy:

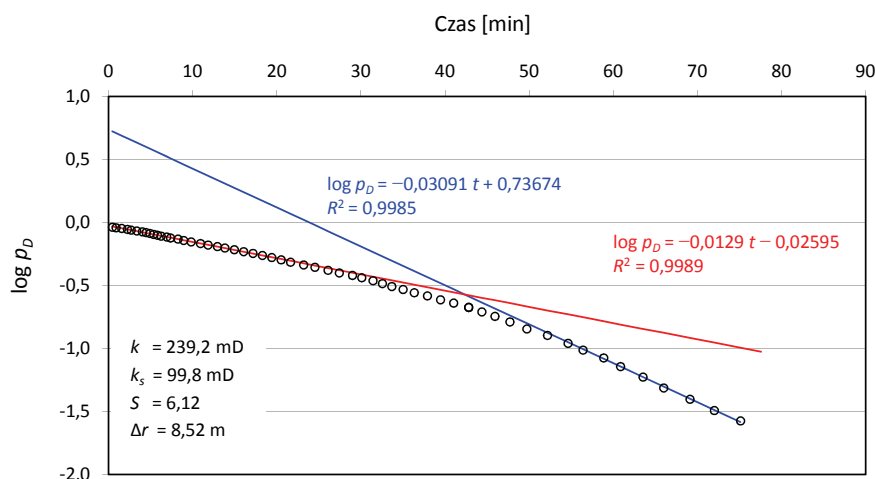
$$k = 239,2 \text{ mD}, S = 6,12, k_s = 99,8 \text{ mD i } \Delta r = 8,52 \text{ m}$$

Wykres zależności $\log p_{D_i}$ od t_i pokazano na rysunku 1.

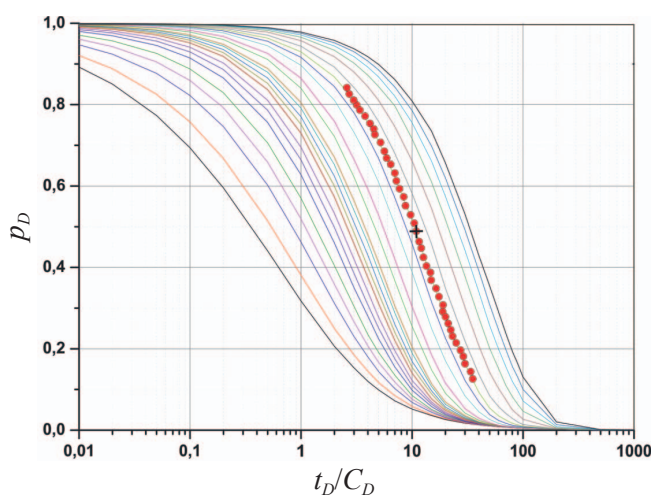
Na rysunku 2 został z kolei przedstawiony wykres zależności p_D od t_D/C_D w przypadku interpretowania danych przyływu za pomocą *slug testu*, gdzie t_D i C_D oznaczają odpowiednio czas bezwymiarowy i bezwymiarowy współczynnik nagromadzenia. Po dopasowaniu krzywych przepuszczalność złoża, obliczona za pomocą specjalnego programu komputerowego na podstawie współrzędnych punktu dopasowania, wynosi 226,1 mD i jej wielkość jest bardzo zbliżona do wyznaczonej prezentowaną metodą. Obliczona wielkość skin efektu ($S = 8,02$) również nie odbiega od określonej omawianą metodą ($S = 6,12$).

cd.

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
26,1	17,90	-0,3793
27,4	18,02	-0,4003
29,0	18,12	-0,4201
30,1	18,22	-0,4385
31,4	18,33	-0,4617
32,5	18,44	-0,4848
33,7	18,54	-0,5079
35,0	18,64	-0,5316
36,3	18,74	-0,5576
37,9	18,83	-0,5825
39,5	18,94	-0,6133
41,0	19,02	-0,6397
42,8	19,13	-0,6740
42,8	19,13	-0,6740
44,4	19,23	-0,7094
45,9	19,32	-0,7450
47,7	19,42	-0,7890
49,7	19,54	-0,8450
52,2	19,63	-0,8962
54,6	19,73	-0,9592
56,4	19,81	-1,0129
58,8	19,89	-1,0749
60,9	19,96	-1,1435
63,5	20,04	-1,2271
66,0	20,10	-1,3134
69,1	20,15	-1,4031
72,0	20,20	-1,4927
75,1	20,23	-1,5751
77,6	20,26	-1,6589



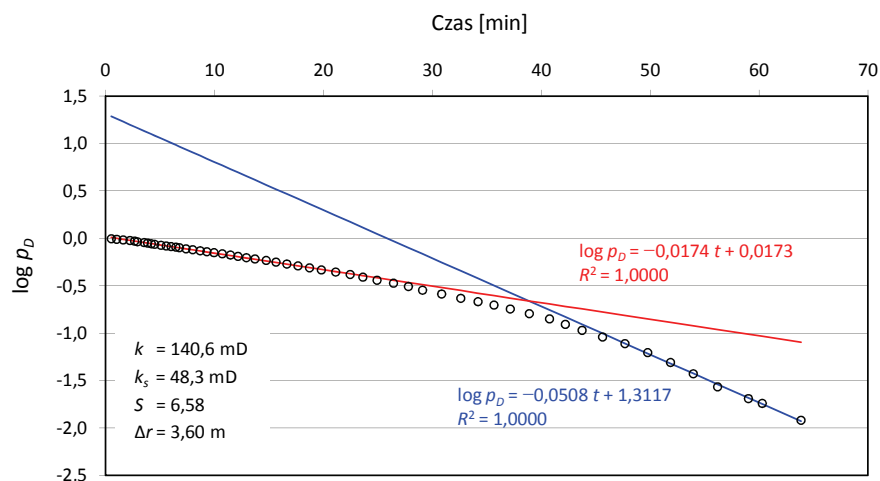
Rys. 1. Wykres zależności ciśnienia bezwymiarowego od czasu dla odwiertu Pre-2



Rys. 2. Interpretacja danych przyływu metodą slug test dla odwiertu Pre-2

Przykład 2 (odwiert Prz-2)

- promień otworu $r_o = 0,119$ m
- promień wewnętrzny rur wydobywczych $r_w = 0,0535$ m
- miąższość złoża $h = 9$ m
- porowatość złoża $\phi = 0,08$
- gęstość cieczy złożowej $\rho = 1072$ kg/m³
- lepkość cieczy złożowej $\mu = 0,69$ mPas
- ścisłość całkowita $c_t = 0,00037$ 1/MPa
- ciśnienie złożowe $p_0 = 16,94$ MPa
- ciśnienie początkowe przyływu $p_1 = 4,90$ MPa



Rys. 3. Wykres zależności ciśnienia bezwymiarowego od czasu dla odwiertu Prz-2

W rozpatrywanym przypadku dla obliczonego wzorem (4) $\bar{a} = 6,8 \cdot 10^{-6}$ otrzymamy po kilku iteracjach $u = 6,9171$, a przyjmując $\varepsilon = 0,01$, z (9) i (10) uzyskujemy:

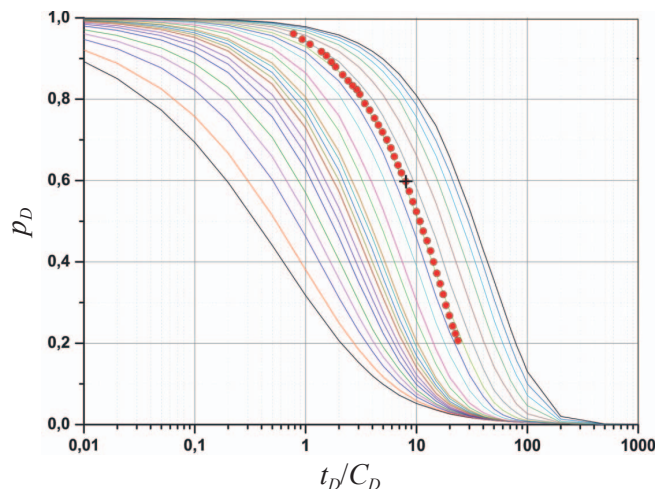
$$a = -0,05075 \text{ oraz } b = 1,3117$$

skąd na podstawie (11) i (12) mamy:

$$k = 140,6 \text{ mD}, S = 6,58, k_s = 48,3 \text{ mD} \text{ i } \Delta r = 3,60 \text{ m}$$

Wykres zależności $\log p_{D_i}$ od t_i pokazano na rysunku 3.

Interpretując dane przepływu za pomocą *slug testu* (rysunek 4), otrzymujemy wielkość przepuszczalności złoża równą 153,4 mD, $S = 7,7$, co jest praktycznie zgodne z przepuszczalnością i skin efektem oszacowanymi powyżej ($k = 140,6 \text{ mD}, S = 6,58$).



Rys. 4. Interpretacja danych przepływu metodą *slug test* dla odwiertu Prz-2

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
0,51	5,00	-0,0038
1,00	5,15	-0,0093
1,60	5,34	-0,0163
2,22	5,50	-0,0222
2,65	5,67	-0,0288
2,91	5,85	-0,0358
3,53	6,07	-0,0445
3,84	6,19	-0,0494
4,18	6,38	-0,0570
4,49	6,52	-0,0627
5,07	6,75	-0,0726
5,55	6,93	-0,0801
6,00	7,07	-0,0864
6,44	7,19	-0,0915
6,76	7,32	-0,0976
7,37	7,59	-0,1101
7,98	7,79	-0,1192
8,67	8,02	-0,1305
9,28	8,23	-0,1405
9,94	8,43	-0,1509
10,70	8,66	-0,1626
11,45	8,90	-0,1754
12,14	9,15	-0,1893
12,91	9,40	-0,2035
13,70	9,63	-0,2169
14,73	9,89	-0,2323
15,63	10,17	-0,2502
16,63	10,48	-0,2703
17,65	10,77	-0,2901

cd.

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
18,71	11,05	-0,3105
19,80	11,34	-0,3329
21,11	11,62	-0,3550
22,44	11,93	-0,3805
23,61	12,25	-0,4091
24,91	12,58	-0,4410
26,42	12,89	-0,4729
27,79	13,20	-0,5075
29,09	13,52	-0,5465
30,84	13,82	-0,5866
32,60	14,13	-0,6321
34,18	14,35	-0,6677
35,65	14,56	-0,7036
37,14	14,77	-0,7447
38,89	15,01	-0,7941
40,75	15,24	-0,8491
42,20	15,45	-0,9069
43,74	15,65	-0,9698
45,62	15,84	-1,0399
47,67	16,00	-1,1099
49,76	16,19	-1,2050
51,86	16,35	-1,3091
53,95	16,49	-1,4282
56,18	16,61	-1,5661
59,01	16,69	-1,6901
60,28	16,72	-1,7408
63,84	16,79	-1,9187

Przykład 3 (odwiert Wit-1)

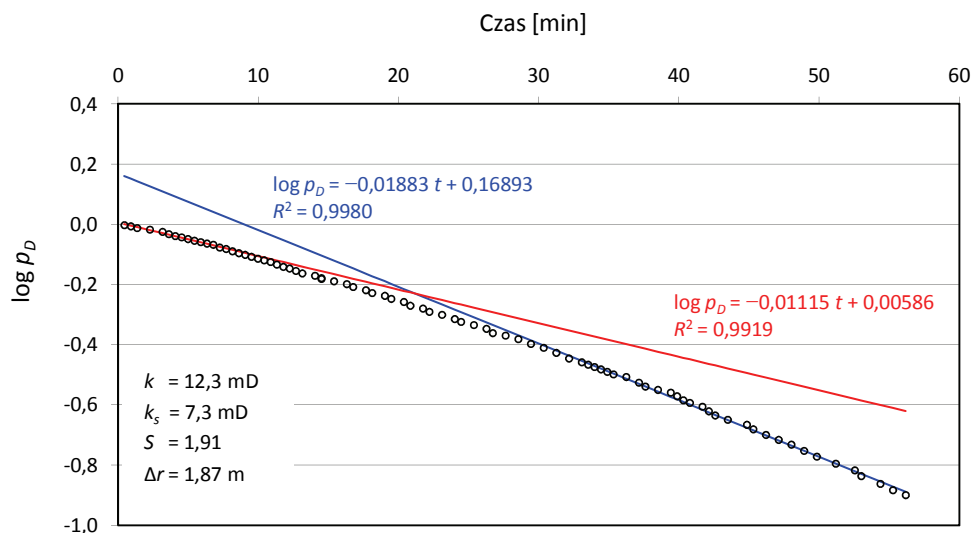
- promień otworu $r_0 = 0,125$ m
- promień wewnętrzny rur wydobywczych $r_w = 0,0545$ m
- miąższość złoża $h = 30$ m
- porowatość złoża $\phi = 0,14$

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
0,4	3,66	-0,0025
0,9	3,78	-0,0064
1,4	3,96	-0,0124
2,3	4,11	-0,0174
3,2	4,32	-0,0247
3,6	4,55	-0,0326
4,1	4,73	-0,0390
4,5	4,84	-0,0430
5,0	5,00	-0,0488
5,4	5,15	-0,0543
5,9	5,27	-0,0589
6,3	5,40	-0,0638
6,8	5,51	-0,0678
7,3	5,74	-0,0768
7,7	5,87	-0,0818
8,2	6,06	-0,0893
8,6	6,22	-0,0957
9,1	6,35	-0,1011
9,5	6,50	-0,1076
10,0	6,65	-0,1139
10,4	6,78	-0,1194
10,9	6,92	-0,1252
11,3	7,11	-0,1337
11,8	7,28	-0,1413
12,2	7,40	-0,1467
12,7	7,57	-0,1546
13,1	7,74	-0,1628
14,0	7,91	-0,1706
14,5	8,07	-0,1787
14,5	8,13	-0,1814
15,4	8,28	-0,1891
16,3	8,47	-0,1986
16,8	8,65	-0,2081
17,7	8,85	-0,2189
18,1	9,02	-0,2281
19,0	9,18	-0,2373
19,5	9,36	-0,2475
20,4	9,54	-0,2576
20,8	9,75	-0,2702
21,7	9,90	-0,2797
22,2	10,07	-0,2905
23,1	10,23	-0,3006
24,0	10,44	-0,3147

- gęstość cieczy złożowej $\rho = 1070$ kg/m³
- lepkość cieczy złożowej $\mu = 0,61$ mPa
- ściśliwość całkowita $c_i = 0,00037$ 1/MPa
- ciśnienie złożowe $p_0 = 16,88$ MPa
- ciśnienie początkowe przyływu $p_1 = 3,59$ MPa

cd.

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
24,5	10,58	-0,3241
25,4	10,73	-0,3344
26,3	10,90	-0,3468
26,7	11,10	-0,3614
27,6	11,20	-0,3695
28,5	11,36	-0,3813
29,4	11,55	-0,3971
30,4	11,71	-0,4101
31,3	11,90	-0,4267
32,2	12,12	-0,4456
33,1	12,25	-0,4582
33,5	12,33	-0,4660
34,0	12,42	-0,4739
34,4	12,50	-0,4817
34,9	12,58	-0,4900
35,3	12,66	-0,4983
36,2	12,74	-0,5071
37,1	12,92	-0,5258
37,6	13,04	-0,5389
38,5	13,13	-0,5498
39,4	13,21	-0,5590
39,9	13,31	-0,5710
40,3	13,42	-0,5842
40,8	13,49	-0,5931
41,7	13,59	-0,6058
42,1	13,70	-0,6210
42,6	13,80	-0,6348
43,5	13,90	-0,6491
44,8	14,01	-0,6658
45,3	14,11	-0,6807
46,2	14,23	-0,6996
47,1	14,32	-0,7158
48,0	14,41	-0,7317
48,9	14,53	-0,7524
49,8	14,63	-0,7717
51,2	14,75	-0,7952
52,5	14,85	-0,8171
53,0	14,94	-0,8362
54,4	15,05	-0,8622
55,3	15,14	-0,8830
56,2	15,20	-0,8995



Rys. 5. Wykres zależności ciśnienia bezwymiarowego od czasu dla odwiertu Wit-1

W rozpatrywanym przypadku dla obliczonego wzorem (4) $\bar{a} = 4,0 \cdot 10^{-5}$ otrzymamy po kilku iteracjach $u = 5,9254$, a przyjmując $\varepsilon = 0,01$, z (9) i (10) dostajemy:

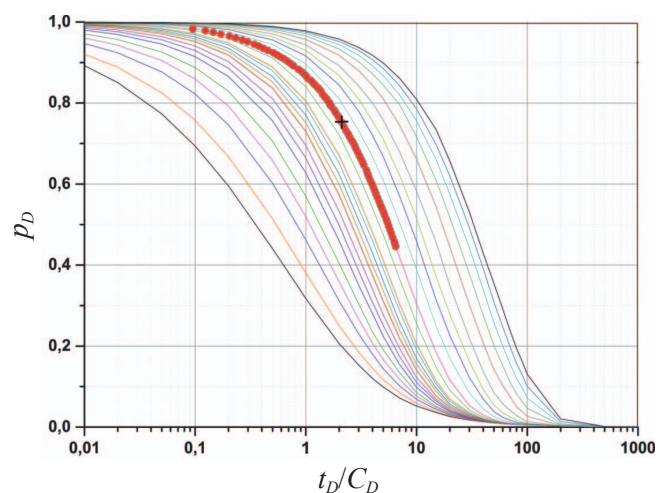
$$a = -0,01883 \text{ oraz } b = 0,16893$$

skąd na podstawie (11) i (12) mamy:

$$k = 12,3 \text{ mD}, S = 1,91, k_s = 7,3 \text{ mD} \text{ i } \Delta r = 1,87 \text{ m}$$

Wykres zależności $\log p_{D_i}$ od t_i pokazano na rysunku 5.

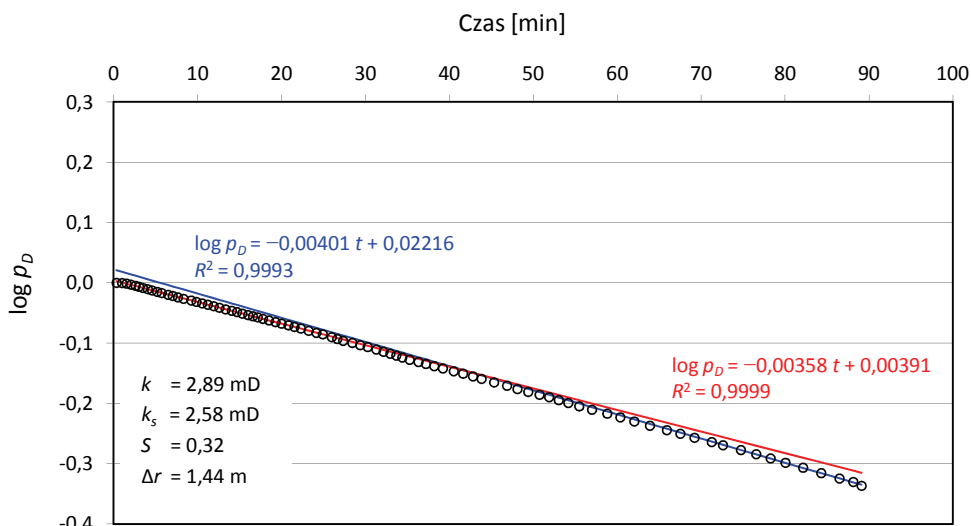
Obliczona przy wykorzystaniu metody *slug test* (rysunek 6) przepuszczalność złoza dla tego odwiertu wyniosła 15,4 mD, $S = 1,04$, co jest w przybliżeniu zgodne z wynikami przedstawionymi powyżej ($k = 12,3$, $S = 1,91$).



Rys. 6. Interpretacja danych przyływu metodą *slug test* dla odwiertu Wit-1

Przykład 4 (odwiert Wie-16)

- promień otworu $r_0 = 0,11 \text{ m}$
- promień wewnętrzny rur wydobywczych $r_w = 0,0488 \text{ m}$
- miąższość złoza $h = 30 \text{ m}$
- porowatość złoza $\phi = 0,075$



Rys. 7. Wykres zależności ciśnienia bezwymiarowego od czasu dla odwiertu Wie-16

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
0,3	7,36	-0,0001
1,0	7,37	-0,0003
1,5	7,39	-0,0011
2,1	7,43	-0,0030
2,6	7,48	-0,0048
3,0	7,52	-0,0064
3,5	7,57	-0,0084
4,1	7,62	-0,0105
4,6	7,68	-0,0126
5,2	7,73	-0,0148
5,7	7,78	-0,0168
6,5	7,85	-0,0196
7,0	7,90	-0,0216
7,7	7,96	-0,0240
8,3	8,02	-0,0264
9,2	8,08	-0,0292
9,9	8,14	-0,0316
10,5	8,20	-0,0339
11,2	8,25	-0,0362
11,9	8,31	-0,0386
12,6	8,37	-0,0412
13,3	8,43	-0,0439
14,1	8,49	-0,0464
14,7	8,53	-0,0484
15,3	8,59	-0,0509
16,0	8,65	-0,0534
16,6	8,69	-0,0554
17,2	8,73	-0,0572
17,8	8,79	-0,0598
18,5	8,85	-0,0623
19,3	8,91	-0,0651
20,0	8,97	-0,0677
20,8	9,03	-0,0704
21,5	9,09	-0,0731
22,3	9,14	-0,0758
23,2	9,22	-0,0795
24,1	9,30	-0,0829
24,9	9,35	-0,0853
26,0	9,45	-0,0901
26,6	9,51	-0,0930
27,3	9,57	-0,0961
28,4	9,64	-0,0996
29,4	9,72	-0,1033
30,3	9,78	-0,1065

cd.

t_i [min]	Ciśnienie [MPa]	$\log p_{D_i} = \frac{p_i(t) - p_0}{p_1 - p_0}$
31,3	9,87	-0,1107
32,1	9,94	-0,1142
33,0	10,00	-0,1175
33,7	10,06	-0,1205
34,4	10,12	-0,1238
35,3	10,20	-0,1275
36,3	10,27	-0,1313
37,2	10,33	-0,1345
38,2	10,40	-0,1381
39,2	10,47	-0,1419
40,5	10,55	-0,1465
41,6	10,63	-0,1506
42,8	10,71	-0,1551
43,8	10,78	-0,1592
45,3	10,88	-0,1651
46,9	10,98	-0,1707
48,1	11,08	-0,1762
49,4	11,16	-0,1809
50,7	11,24	-0,1857
51,9	11,30	-0,1895
53,0	11,39	-0,1946
54,2	11,46	-0,1993
55,5	11,55	-0,2047
57,0	11,64	-0,2105
58,8	11,74	-0,2169
60,4	11,84	-0,2230
62,0	11,94	-0,2299
63,9	12,05	-0,2369
65,9	12,16	-0,2442
67,5	12,24	-0,2504
69,2	12,34	-0,2569
71,3	12,44	-0,2640
72,6	12,51	-0,2693
74,7	12,62	-0,2773
76,6	12,71	-0,2841
78,3	12,81	-0,2912
80,0	12,90	-0,2984
82,1	13,01	-0,3067
84,3	13,12	-0,3156
86,5	13,23	-0,3245
88,1	13,30	-0,3302
89,1	13,37	-0,3366

- gęstość cieczy złożowej $\rho = 1133 \text{ kg/m}^3$
- lepkość cieczy złożowej $\mu = 0,83 \text{ mPas}$
- ścisłość całkowita $c_t = 0,00032 \text{ 1/MPa}$
- ciśnienie złożowe $p_0 = 18,51 \text{ MPa}$
- ciśnienie początkowe przyływu $p_1 = 7,36 \text{ MPa}$

W rozpatrywanym przypadku dla obliczonego wzorem (4) $\bar{a} = 2,0 \cdot 10^{-5}$ otrzymamy po kilku iteracjach $u = 6,3350$, a przyjmując $\varepsilon = 0,01$, z (9) i (10) dostajemy:

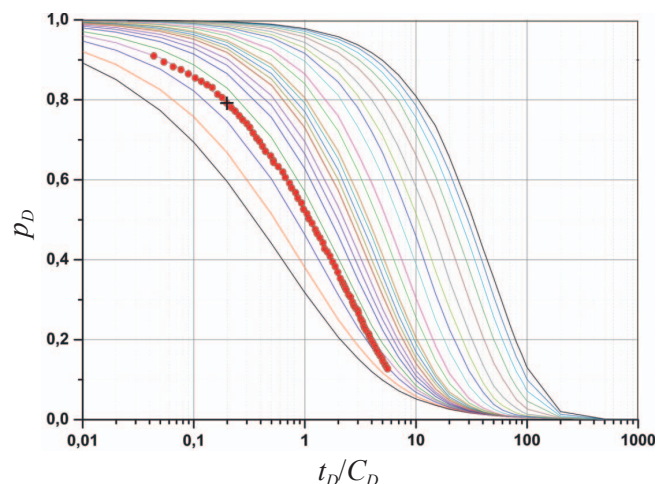
$$a = -0,00401 \text{ oraz } b = 0,02216$$

skąd na podstawie (11) i (12) mamy:

$$k = 2,9 \text{ mD}, S = 0,32, k_s = 2,6 \text{ mD} \text{ i } \Delta r = 1,44 \text{ m}$$

Wykres zależności $\log p_D$ od t_i pokazano na rysunku 7.

Również w tym przypadku interpretacji danych przyływu metodą *slug test* (rysunek 8) uzyskano akceptowalną zgodność wyników. Obliczone za pomocą *slug testu* i prezentowanej



Rys. 8. Interpretacja danych przyływu metodą *slug test* dla odwiertu Wie-16

metody wielkości przepuszczalności wyniosły odpowiednio 2,64 mD i 2,89 mD, a skin efektu S : 1,04 i 0,32.

Podsumowanie

Występowanie dwóch odcinków prostoliniowych na wykresie $\log p_D$ od t stwierdzono w 46 przypadkach na 52 analizowane. W żadnym przypadku wyniki obliczeń przepuszczalności złoża i skin efektu otrzymane omawianą metodą i za pomocą *slug testu* nie różniły się od siebie w sposób

znaczący. Liniowa zależność $\log p_D$ od t (tzn. bez okresu przejściowego) świadczyć może albo o zerowym skin efekcie (jednakowa przepuszczalność strefy przyodwiertowej i złoża), albo o zbyt krótkim czasie przyływu (zmianami ciśnienia objęta została jedynie strefa przyodwiertowa).

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 2, s. 77–86

Artykuł nadesłano do Redakcji 17.10.2014 r. Zatwierdzono do druku 24.12.2014 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Technologia likwidacji wodoprzepuszczalności słabo przepuszczalnych warstw wodonośnych z wykorzystaniem procesu karbokatalizy krzemianu sodu*; nr umowy: PBS/1/A2/1/2012, nr zlec.: 6105/SI.

Literatura

- [1] Ramey H. J., Agarval R. G., Martin J.: *Analysis of slug test or DST flow period data*. Drilling Engineering, QB, July-September 1975, pp. 37–47.
- [2] Sabet M. A.: *Well test analysis*. Contributions in Petroleum Geology and Engineering: Volume 8. Houston, Gulf Publishing Company, 1991.
- [3] Szpunar T., Budak P.: *How to assess the depth of permeability impairment of the wellbore zone using DST flow period data*. Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 51, issue 3, May 2012, pp. 215–227.
- [4] Szpunar T., Budak P.: *Ilościowe ujęcie zagadnienia usuwania wody z odwiertów gazowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 1, s. 27–31.
- [5] Szpunar T., Budak P.: *Sposób oceny zasięgu uszkodzenia przepuszczalności strefy przyodwiertowej*. Nafta-Gaz 2002, nr 10, s. 539–545.
- [6] Szpunar T.: *How to compute permeability and skin factor of the low pressure water zones*. Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 40, issue 7, July 2001, 45–51.



Dr inż. Tadeusz SZPUNAR
Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Naftowej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.szpunar@inig.pl



Mgr inż. Paweł BUDAK
Starszy specjalista naukowo-badawczy, kierownik
Zakładu Inżynierii Naftowej.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: budak@inig.pl