

Prosty sposób przybliżonego określania przepuszczalności horyzontu gazowego na podstawie danych okresu przyływu i bilansu masy gazu

How to approximate the permeability of the gas zone using the gas flowing pressure data and the mass balance

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Procedura określania przepuszczalności i skin efektu warstwy porowatej z danych okresu przyływu wymaga rejestracji zmienności dennego ciśnienia przyływu w funkcji czasu oraz sporządzenia wykresu zależności różnicy kwadratów ciśnienia średniego złożowego i dennego ruchowego od logarytmu czasu przyływu i aproksymacji przebiegu punktów pomiarowych linią prostą metodą najmniejszych kwadratów. Przepuszczalność określana jest na podstawie nachylenia tej prostej. W metodzie tej zakłada się, że natężenie przepływu gazu podczas testu nie ulega zmianie, co jest założeniem problematycznym, gdyż w początkowym okresie przyływu szybko zmienia się depresja i gradient ciśnienia, a zatem wydatek gazu. Metoda znana jest od dziesięcioleci i nie jest tutaj omawiana. W niniejszym artykule zaproponowano nieco inny, prosty sposób przybliżonego określania przepuszczalności oparty na modelu matematycznym podanym przez Szpunara (2001). Podobnie jak w metodzie wspomnianej wyżej, wymagana jest rejestracja zmian ciśnienia dennego okresu przyływu w funkcji czasu i naniesienie punktów pomiarowych w prostokątnym układzie współrzędnych, gdzie w odróżnieniu od metody standardowej na osi rzędnych zaznaczany jest logarytm tzw. ciśnienia bezwymiarowego, a czas przyływu na osi odciętych. Przebieg punktów pomiarowych aproksymowany jest linią prostą metodą najmniejszych kwadratów, a przepuszczalność określa się na podstawie nachylenia tej linii oraz bilansu masy przez porównanie masy gazu wydobytego z masą gazu przewidzianą przez model. W artykule podano przykłady obliczeniowe. Ze względu na brak danych pochodzących z odwiertów z krajowego przemysłu naftowego metodę przetestowano na danych zaczerpniętych z literatury. Rozbieżność wyników interpretacji testów przyływu metodą standardową i opisywaną w artykule jest niewielka (rzędu kilku procent) i mieści się w akceptowalnych granicach.

Słowa kluczowe: metoda standardowa, wykres ciśnienia dennego, przepuszczalność skały, skin efekt, bilans masy, modelowanie matematyczne.

ABSTRACT: The routine procedure for evaluation of the permeability and skin of the gas zone consists in flowing the gas well until the bottomhole pressure is nearly stabilized. The pressure values must be recorded versus time of flow, initial reservoir pressure must be known and the constant flow rate should be maintained during the flow test. The permeability and skin are calculated using the straight line approximation of bottomhole pressures versus logarithm of flowing time, and the permeability is calculated using the slope of this line. The standard method for calculation of permeability and skin is known for decades and will not be discussed here. This paper proposes somewhat different technique for calculation of permeability which is based on mathematical model of gas flow in porous rocks given by Szpunar (2001). The total volume of gas produced during the flow period is used for calculation of permeability instead of using the flow rate which is never known precisely. The reliability of the calculated results is checked by comparing the total mass of gas produced during the flow test (evaluated at standard conditions of temperature and pressure) with the mass of gas evacuated from the reservoir predicted by the mathematical model. The article provides calculation examples. Because no data from domestic oil industry was available, the method was tested using the data from technical literature. The discrepancies between the results of both methods are within the acceptable range of a few percent.

Key words: standard method, drawdown pressure curve, rock permeability, skin effect, mass balance, mathematical modelling.

Autor do korespondencji: P. Budak, e-mail: pawel.budak@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 03.08.2020 r. Zatwierdzono do druku: 27.11.2020 r.

Podstawy teoretyczne przybliżonego określania przepuszczalności na podstawie zmian ciśnienia dennego w funkcji czasu oraz bilansu masy gazu

Uruchomienie przyływu gazu do odwiertu ze złoża przy ciśnieniu równym p_1 na ścianie odwiertu powoduje stopniowy spadek ciśnienia dennego na ścianie tego odwiertu, które po pewnym czasie stabilizuje się na poziomie p_o , będącym końcowym ciśnieniem przyływu, a prędkość spadku ciśnienia na ścianie odwiertu staje się bliska zera. Stan ten w inżynierii złożowej określa się jako stan pseudoustalony. Generalnie przyływ podczas testu kontynuowany jest do momentu ustania zmian ciśnienia dennego i ustabilizowania się ciśnienia. Dalszy spadek ciśnienia oczywiście zachodzi, ale jest pomijalnie mały i ciśnienie praktycznie utrzymuje się na stałym poziomie przez bardzo długi czas, a przebieg ciśnienia w złożu w funkcji promienia r staje się bardziej płaski. Czas, po którym następuje stabilizacja ciśnienia, zależy od przepuszczalności złoża i wydatku wypływu gazu, a w przypadku horyzontów o wysokiej przepuszczalności jest on krótki. W okresie dopływu gazu do odwiertu zmienia się ciśnienie denne i depresja wywierana na złożu oraz zmienia się natężenie wypływającego gazu.

Wszystkie metody interpretacji danych ciśnieniowych okresu przyływu gazu do odwiertu przyjmują pewne założenia upraszczające, które umożliwiają uzyskanie prostych rozwiązań analitycznych do obliczenia przepuszczalności k i skin efektu S . W najczęściej stosowanej metodzie interpretacji nie uwzględnia się zmian natężenia wypływu gazu i przyjmuje, że jest ono stałe i równe wartości średniej dla okresu przyływu.

Celem każdego testu otworowego jest określenie przepuszczalności złoża i skin efektu, przy czym przepuszczalność złoża – ośrodka porowatego, w którym zachodzi przepływ gazu – jest właściwością fizyczną tego ośrodka, natomiast skin efekt jest parametrem, który może się zmieniać w trakcie eksploatacji, na przykład w wyniku wytrącania się cięższych węglowodorów pod wpływem zmian temperatury spowodowanych zmianami natężenia wypływu gazu, co skutkuje zmianami przepuszczalności skutecznej strefy przyodwiertowej dla gazu. Załóżmy, że w trakcie przyływu w okresie odpowiadającym spadkowi ciśnienia na ścianie odwiertu od p_1 do p_o w czasie $t = t_k$ (gdzie t_k – czas trwania przyływu) wyeksploatowano gaz o objętości V_p .

Wykażemy, że przedstawiony sposób określania przepuszczalności daje wyniki zbliżone do uznanych klasycznych metod interpretacji danych ciśnieniowych okresu przyływu gazu do odwiertu. Stosujemy wykorzystywane w literaturze (Szpunar, 2001; Szpunar i Budak, 2012, 2016; Civan, 2015; Szpunar et al., 2018) równanie opisujące zachowanie ciśnienia w złożu przy przepływie medium złożowego. Szczegółowe wyprowadzenie równania (1) podał Szpunar (2001), a wersję

skróconą zamieszczono w następnym rozdziale w dalszej części artykułu. Równanie to, w postaci przystosowanej do wykorzystania do obliczenia przepuszczalności, podano poniżej:

$$p(r, t) = p_o - \frac{(p_o - p_1)}{Y_o \left(r_o \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right)} Y_o \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) e^{-Et} \quad (1)$$

gdzie:

p_1 i p_o – odpowiednio ciśnienie początkowe i końcowe okresu przyływu,

r_o – promień odwiertu,

ϕ – porowatość złoża,

μ_g – lepkość gazu w warunkach złożowych,

c_t – ściśliwość całkowita ośrodka porowatego,

k – przepuszczalność,

E – parametr wyznaczany na podstawie zachowania ciśnienia dennego w funkcji czasu podczas przyływu równy nachyleniu prostej, którą aproksymowano przebieg punktów pomiarowych zależności $\ln p_D$ od t ,

t – czas liczony od momentu uruchomienia przyływu,

Y_o – funkcja Bessela pierwszego rodzaju rzędu zerowego.

W podanym sposobie przybliżonego określania przepuszczalności nie operujemy średnim wydatkiem gazu w okresie przyływu, który trudno jest ustalić dokładnie – jest on funkcją czasu, gdyż w początkowym okresie przyływu szybko zmienia się depresja wywierana na złożu, a zatem wydatek gazu. Zdaniem autorów użycie sumarycznej objętości wydobytego gazu jest wygodniejsze. Warunkiem korzystania z podanego sposobu przybliżonego określania przepuszczalności jest odpowiednio długa kontynuacja przyływu do czasu stabilizacji ciśnienia na poziomie p_o przez czas $t = t_k$.

Model matematyczny dopływu gazu do odwiertu

Poniżej w skrócie podano podstawowe założenia przyjęte przy wyprowadzaniu równania (1). Założono, że w pewnym otoczeniu odwiertu prędkość spadku ciśnienia podczas przyływu jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy aktualnym ciśnieniem w złożu a końcowym ciśnieniem przyływu p_o – to jest ciśnieniem stabilizacji, które po czasie $t = t_k$ (gdzie t_k – czas trwania przyływu) ustala się na w przybliżeniu stałym poziomie i które przyjmujemy za równe ciśnieniu na ścianie odwiertu. Rozpatrujemy zachowanie ciśnienia w czasie od $t = 0$, któremu odpowiada ciśnienie początkowe przyływu p_1 na ścianie odwiertu, do $t = t_k$, któremu odpowiada ciśnienie stabilizacji p_o .

$$\frac{\partial p(r, t)}{\partial t} = -E[p(r, t) - p_o] \quad (2)$$

skąd:

$$p(r, t) = p_o + C(r)e^{-Et} \quad (3)$$

gdzie C nie zależy od t .

Ciśnienie w złożu powinno spełniać równanie:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu_g c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad r \geq r_o \quad (4)$$

skąd:

$$C''(r) + \frac{1}{r} C'(r) + \frac{\phi \mu_g c_t}{k} EC(r) = 0 \quad (5)$$

Rozwiązaniem (5) jest:

$$C(r) = a_1 J_o \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) + a_2 Y_o \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) \quad (6)$$

gdzie J_o i Y_o są to funkcje Bessela pierwszego rodzaju, rzędu zerowego.

Przyjmujemy $a_1 = 0$, ponieważ dla małych wartości r wyrażenie

$r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}}$ jest bardzo małe w zakresie występujących

w nim pozostałych wielkości, a dla małych wartości argumentu funkcja Y_o ma wartość wielokrotnie większą od J_o ($J_o(0) = 1$). Podstawiając (6) do (3), otrzymujemy:

$$p(r, t) = p_o + a_2 Y_o \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) e^{-Et} \quad r \geq r_o \quad (7)$$

W momencie uruchomienia wydobycia gazu dla $t = 0$, $r = r_o$ ciśnienie wynosi p_1 , skąd:

$$a_2 = \frac{p_1 - p_o}{Y_o \left(r_o \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right)} \quad (8)$$

a podstawiając (8) do (3), otrzymamy równanie (1).

Dla małych wartości argumentu funkcję Y_o można aproksymować wyrażeniem (Trajdos i Wróbel, 1965):

$$Y_o \left(r \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) = -\frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{r}{2} \sqrt{\frac{\phi \mu_g c_t E}{k}} \right) \quad r \geq r_o \quad (9)$$

skąd otrzymamy ostatecznie wzór (10):

$$p(r, t) = p_o - \frac{(p_o - p_1)}{\ln \sqrt{\frac{r_o^2 \phi \mu_g c_t E}{4k}}} \ln \sqrt{\frac{r^2 \phi \mu_g c_t E}{4k}} e^{-Et} \quad (10)$$

a przyjmując $r = r_o$, czyli rozpatrując ciśnienie na ścianie odwiertu, mamy:

$$\ln p_D = -Et \quad (11)$$

$$\text{gdzie } p_D = \frac{p(r_o, t) - p_o}{p_1 - p_o}$$

Z (11) wynika, że zaznaczając w prostokątnym układzie współrzędnych punkty pomiarowe p_D vs. t i aproksymując ich przebieg linią prostą, można określić wielkość E jako współczynnik nachylenia tej prostej. Do aproksymacji należy przyjmując końcowe punkty pomiarowe odpowiadające dłuższemu czasom przyływu z uwagi na potrzebę uzyskania stabilizacji zachowania ciśnienia przyływu.

Z prawa Darcy'ego i równania (10) mamy:

$$v(r_o, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{(p_o - p_1)}{\ln \sqrt{\frac{r_o^2 \phi \mu_g c_t E}{4k}}} \frac{1}{r_o} e^{-Et} \quad (12)$$

Porównując masę gazu, która teoretycznie wypłynęła ze złoża w czasie testu od $t = 0$ do $t = t_k$, z masą gazu realnie wydobytego na powierzchnię, otrzymamy:

$$V_p \rho_N = 2\pi r_o h \rho_Z \text{średnie} \int_0^{t_k} v(r_o, t) dt \quad (13)$$

skąd po wykonaniu zaznaczonych działań otrzymamy, przyjmując, że dla odpowiednio długiego czasu przyływu t_k wielkość wyrażenia $\exp(-E t_k)$ jest wielkością bardzo małą dla $t = t_k$ i można ją pominąć:

$$\ln \sqrt{\frac{r_o^2 \phi \mu_g c_t E}{4k}} = \frac{-2\pi \rho_Z k (p_1 - p_o)}{\mu E V_p \rho_N} \quad (14)$$

Wyrażenie (14) można zapisać jako:

$$e^{-u} = \sqrt{\frac{a}{u}} \quad (15)$$

gdzie:

$$a = \frac{\pi r_o^2 \phi c_t h \rho_Z (p_1 - p_o)}{2 V_p \rho_N} \quad (16)$$

oraz

$$u = \frac{2\pi h \rho_Z k (p_1 - p_o)}{\mu_g E V_p \rho_N} \quad (17)$$

Wyrażenie (15) można przedstawić w postaci:

$$u = \frac{1}{2} \ln u - \frac{1}{2} \ln a \quad (18)$$

Jak wykazał Szpunar (2001), w zależności od wielkości a , równanie (18):

- nie ma pierwiastków dla $a > 1/2e$;

- ma jeden pierwiastek $u = 1/2$ dla $a = 1/2e$;
- ma dwa pierwiastki \dot{u} i \ddot{u} , dla $a < 1/2$;
- pierwszy pierwiastek \dot{u} zawiera się w przedziale $(0, 1/2)$.

Ponieważ w zakresie wielkości występujących w praktyce a jest bardzo małe, równanie (18) ma dwa pierwiastki, tj. \dot{u} i \ddot{u} , przy czym, jak wykazał Szpunar (2001), pierwszy pierwiastek \dot{u} należy odrzucić, a drugi, większy z pierwiastków równania (18), tj. \ddot{u} , można łatwo obliczyć metodą iteracyjną z równania (18), przyjmując jako pierwsze przybliżenie wielkość u z przedziału $(\frac{1}{2}, \infty)$. Znając \ddot{u} , można wyznaczyć przepuszczalność ze wzoru (17), skąd otrzymamy:

$$k = \frac{\mu E V_p \rho_N \ddot{u}}{2\pi h \rho_Z (p_1 - p_o)} \quad (19)$$

Procedura obliczeń

⇒ Obliczamy gęstość gazu w warunkach normalnych oraz złożowych:

$$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]} = (1,2)(10^2) \frac{m_g p}{Z(p, T) T}$$

gdzie:

- m_g – masa molowa gazu [g/mol],
- p – ciśnienie (odpowiednio złożowe lub normalne) [MPa],
- Z – współczynnik uwzględniający odstępstwa zachowania gazu rzeczywistego od gazu doskonałego,
- T – temperatura gazu [K].

W przypadku obliczania gęstości gazu w warunkach złożowych należy przyjąć wartości średnie ciśnienia i temperatury w złożu panujące podczas testu przyływu.

⇒ Sporządzamy wykres zależności $\ln p_D = \ln \frac{p(r, t) - p_o}{p_1 - p_o}$

od czasu t [min] i aproksymujemy przebieg punktów pomiarowych dla dłuższych czasów przyływu linią prostą metodą najmniejszych kwadratów. Przez punkty odpowiadające „dłuższym czasom” przyływu rozumiemy te, które układają się wzdłuż linii prostej na wykresie $\ln p_D$ vs. t , gdyż początkowy okres przyływu może być zaburzony i nie mieć liniowego charakteru.

⇒ Odczytujemy nachylenie E [1/min] linii prostej, którą aproksymowano przebieg punktów pomiarowych zależności $\ln p_D$ vs. t .

⇒ Obliczamy współczynnik a

$$a = 1,57 \frac{h r_o^2 \phi c_t \rho_Z (p_1 - p_o) \ddot{u}}{V_p \rho_N}$$

gdzie:

- h – miąższość pokładu gazowego [m],

r_o – promień odwiertu [m],

ϕ – porowatość [ułamek],

c_t – ściśliwość całkowita (skała plus media ją nasycające) [1/MPa],

ρ_N – gęstość gazu w warunkach normalnych [kg/m³],

ρ_Z – gęstość gazu w warunkach złożowych [kg/m³],

V_p – objętość gazu wydobyta w okresie przyływu [Nm³],

p_1 – ciśnienie początkowe okresu przyływu [MPa],

p_o – ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji) [MPa].

⇒ Sprawdzamy, czy $a < \frac{1}{2e}$. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, to kończymy obliczenia, gdyż nie są spełnione założenia modelu. W olbrzymiej większości przypadków warunek $a < \frac{1}{2e}$ jest spełniony i obliczenia można kontynuować.

⇒ Obliczamy pierwiastek \ddot{u} równania:

$$u = \frac{1}{2} \ln u - \frac{1}{2} \ln a$$

stosując procedurę iteracyjną. W tym celu przyjmujemy dowolne u z przedziału $u \in (\frac{1}{2}, \infty)$ i obliczamy kolejno $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$. Jeżeli $u_{i+1} - u_i \leq \varepsilon$ (gdzie ε jest to dowolnie przyjęta bardzo mała wielkość), to obliczenia przerywamy i przyjmujemy $u_i = \ddot{u}$.

⇒ Obliczamy przepuszczalność złoża wzorem:

$$k \text{ [mD]} = (2,654)(10^3) \frac{\mu_g E V_p \rho_N \ddot{u}}{\rho_Z h (p_1 - p_o)}$$

gdzie E [1/min] – nachylenie linii prostej wykresu $\ln p_D$ vs. t , a pozostałe wielkości jak w zestawieniu powyżej.

Przykłady obliczeniowe

Dane dla pierwszych dwóch testów przyływu gazu zaczerpnięto z książki Dake’a (1998), natomiast dla trzech kolejnych z książki Chaudhry’ego (2003).

Przykład 1

Ciśnienie początkowe okresu przyływu, $p_1 = 29,579$ MPa
Ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji),

$p_o = 24,545$ MPa

Temperatura złożowa, $T_z = 323$ K

Miąższość warstwy gazonośnej, $h = 15,24$ m

Promień odwiertu, $r_o = 0,091$ m

Porowatość skał warstwy gazonośnej, $\phi = 0,15$

Lepkość gazu w warunkach złożowych, $\mu_g = 0,0224$ mPas

Ściśliwość całkowita ośrodka porowatego, $c_t = 0,0028$ 1/MPa

Czas przyływu, $t_p = 180$ min

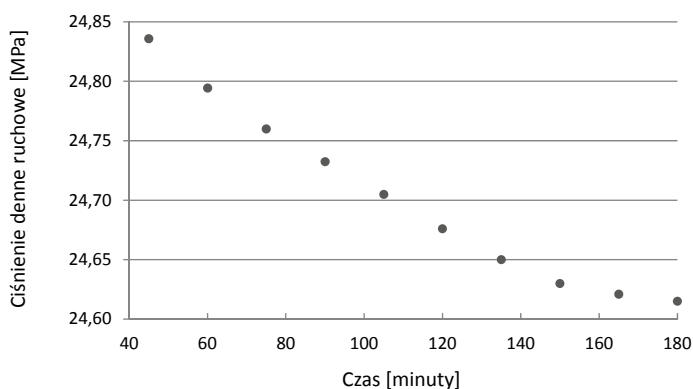
Objętość gazu wydobyta w okresie przyływu, $V_p = 141\,600$ Nm³

Gęstość gazu w warunkach normalnych, $\rho_{std} = 0,7097$ kg/m³

Gęstość gazu w warunkach złożowych, $\rho_{res} = 177,47$ kg/m³

Średni współczynnik ściśliwości gazu, $Z_s = 0,9152$

Masa molowa gazu, $m_g = 16,15$ g/mol



Rys. 1. Ciśnienie denne ruchowe w funkcji czasu podczas testu

Fig. 1. Drawdown pressure versus time during the test

Ściśliwość całkowita ośrodka porowatego, $c_t = 0,0028$ 1/MPa

Czas przyływu, $t_p = 180$ min

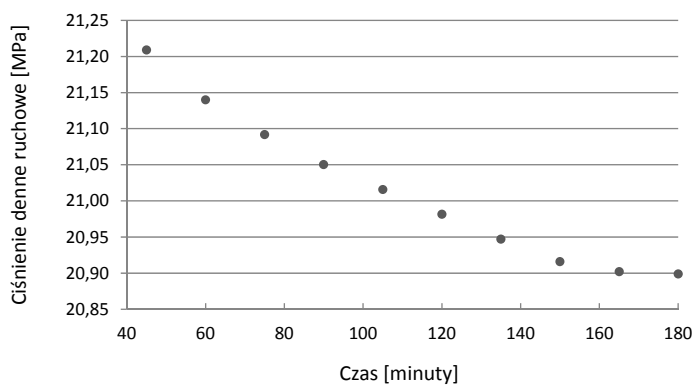
Objętość gazu wydobyta w okresie przyływu, $V_p = 212\,400$ Nm³

Gęstość gazu w warunkach normalnych, $\rho_{std} = 0,7097$ kg/m³

Gęstość gazu w warunkach złożowych, $\rho_{res} = 168,11$ kg/m³

Średni współczynnik ściśliwości gazu, $Z_s = 0,8977$

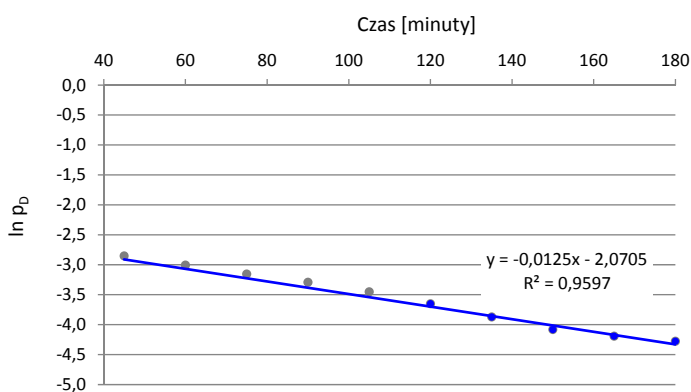
Masa molowa gazu, $m_g = 16,15$ g/mol



Rys. 3. Ciśnienie denne ruchowe w funkcji czasu podczas testu

Fig. 3. Drawdown pressure versus time during the test

Wyniki obliczeń



Rys. 2. Logarytm ciśnienia bezwymiarowego w funkcji czasu

Fig. 2. Logarithm of dimensionless pressure versus time

Obliczona przepuszczalność: $k = 48,08$ mD

Obliczona hydroprzewodność: $kh = 732,78$ mD m

Obliczona przepuszczalność dla przykładu podanego przez

Dake'a (1998): $k = 45$ mD

Przykład 2

Ciśnienie początkowe okresu przyływu, $p_1 = 29,504$ MPa

Ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji),

$p_o = 20,788$ MPa

Temperatura złożowa, $T_z = 323$ K

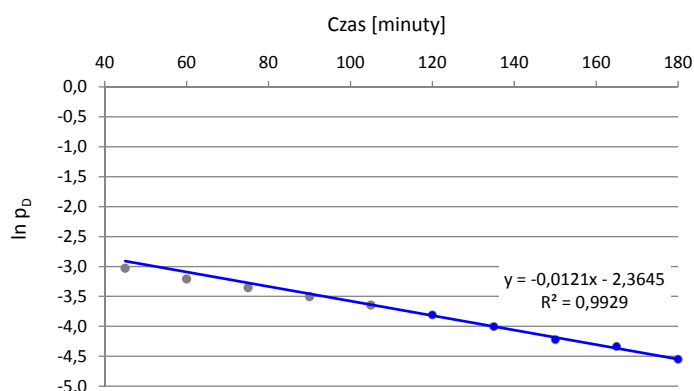
Miąższość warstwy gazonośnej, $h = 15,24$ m

Promień odwiertu, $r_o = 0,091$ m

Porowatość skał warstwy gazonośnej, $\phi = 0,15$

Lepkość gazu w warunkach złożowych, $\mu_g = 0,0214$ mPas

Wyniki obliczeń



Rys. 4. Logarytm ciśnienia bezwymiarowego w funkcji czasu

Fig. 4. Logarithm of dimensionless pressure versus time

Obliczona przepuszczalność: $k = 41,27$ mD

Obliczona hydroprzewodność: $kh = 628,93$ mD m

Obliczona przepuszczalność dla przykładu podanego przez

Dake'a (1998): $k = 43$ mD

Przykład 3

Ciśnienie początkowe okresu przyływu, $p_1 = 20,685$ MPa

Ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji),

$p_o = 11,915$ MPa

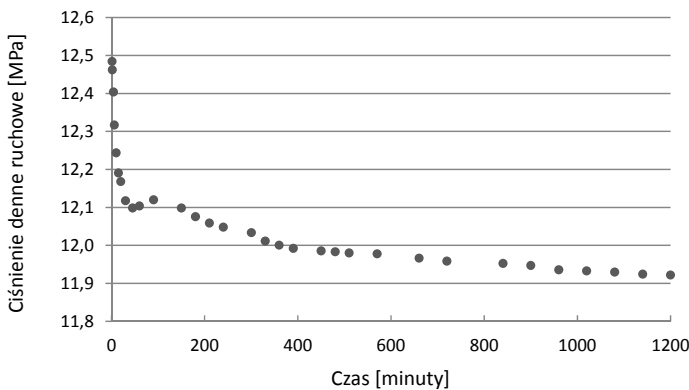
Temperatura złożowa, $T_z = 372$ K

Miąższość warstwy gazonośnej, $h = 3,66$ m

Promień odwiertu, $r_o = 0,12$ m

Porowatość skał warstwy gazonośnej, $\phi = 0,20$

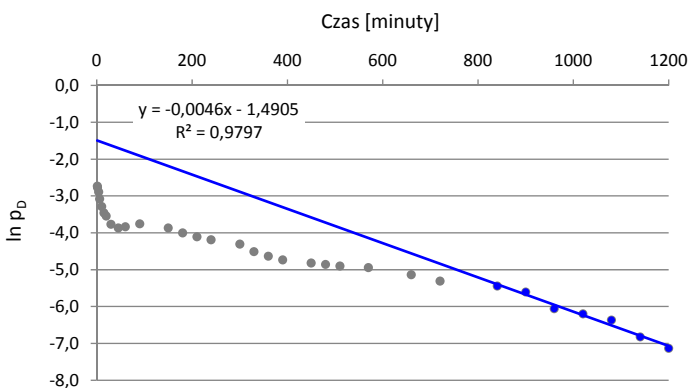
Lepkość gazu w warunkach złożowych, $\mu_g = 0,0193$ mPas
 Ścisłość całkowita ośrodka porowatego, $c_i = 0,0483$ 1/MPa
 Czas przyływu, $t_p = 1200$ min
 Objętość gazu wydobyta w okresie przyływu, $V_p = 23\ 600$ Nm³
 Gęstość gazu w warunkach normalnych, $\rho_{std} = 0,8368$ kg/m³
 Gęstość gazu w warunkach złożowych, $\rho_{res} = 113,47$ kg/m³
 Średni współczynnik ścisłości gazu, $Z_s = 0,8733$
 Masa molowa gazu, $m_g = 18,85$ g/mol



Rys. 5. Ciśnienie denne ruchowe w funkcji czasu podczas testu

Fig. 5. Drawdown pressure versus time during the test

Wyniki obliczeń



Rys. 6. Logarytm ciśnienia bezwymiarowego w funkcji czasu

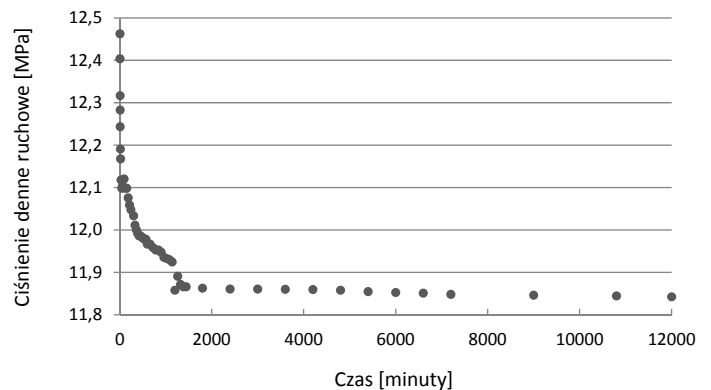
Fig. 6. Logarithm of dimensionless pressure versus time

Obliczona przepuszczalność: $k = 7,45$ mD
 Obliczona hydroprzewodność: $kh = 27,27$ mD × m
 Obliczona przepuszczalność dla przykładu podanego przez Chaudhry'ego (2003): $k = 8,47$ mD

Przykład 4

Ciśnienie początkowe okresu przyływu, $p_1 = 27,339$ MPa
 Ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji), $p_o = 11,842$ MPa
 Temperatura złożowa, $T_z = 394$ K
 Miąższość warstwy gazonośnej, $h = 12,50$ m
 Promień odwiertu, $r_o = 0,13$ m

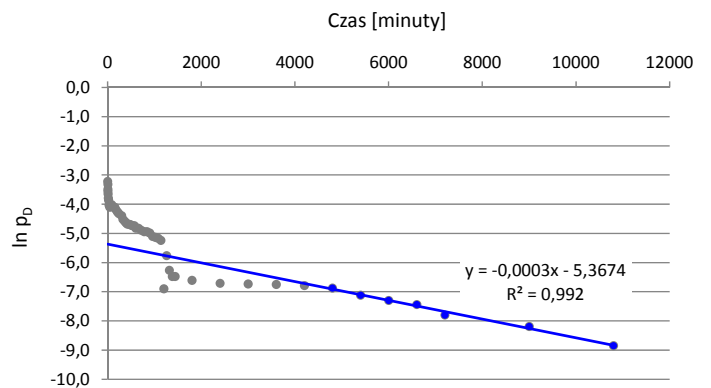
Porowatość skał warstwy gazonośnej, $\phi = 0,137$
 Lepkość gazu w warunkach złożowych, $\mu_g = 0,0246$ mPas
 Ścisłość całkowita ośrodka porowatego, $c_i = 0,0333$ 1/MPa
 Czas przyływu, $t_p = 12\ 000$ min
 Objętość gazu wydobyta w okresie przyływu, $V_p = 1\ 450\ 800$ Nm³
 Gęstość gazu w warunkach normalnych, $\rho_{std} = 0,810$ kg/m³
 Gęstość gazu w warunkach złożowych, $\rho_{res} = 115,86$ kg/m³
 Średni współczynnik ścisłości gazu, $Z_s = 0,9397$
 Masa molowa gazu, $m_g = 18,25$ g/mol



Rys. 7. Ciśnienie denne ruchowe w funkcji czasu podczas testu

Fig. 7. Drawdown pressure versus time during the test

Wyniki obliczeń



Rys. 8. Logarytm ciśnienia bezwymiarowego w funkcji czasu

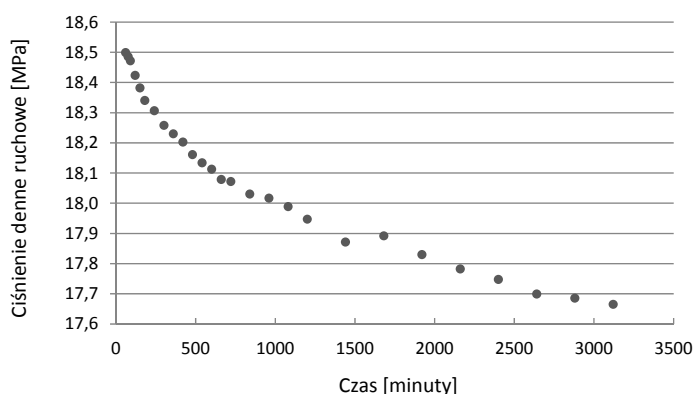
Fig. 8. Logarithm of dimensionless pressure versus time

Obliczona przepuszczalność: $k = 8,12$ mD
 Obliczona hydroprzewodność: $kh = 101,51$ mD × m
 Obliczona przepuszczalność dla przykładu podanego przez Chaudhry'ego (2003): $k = 8,96$ mD

Przykład 5

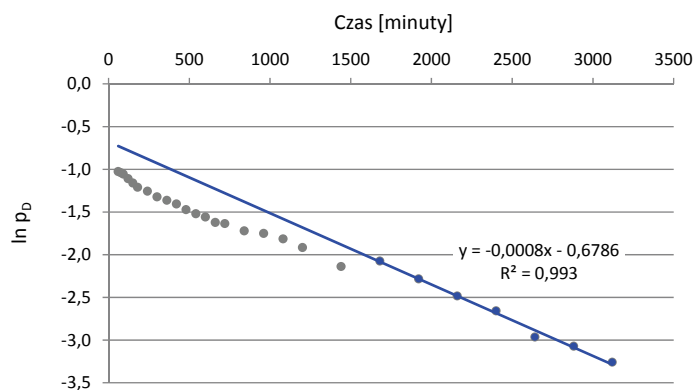
Ciśnienie początkowe okresu przyływu, $p_1 = 20,168$ MPa
 Ciśnienie końcowe okresu przyływu (ciśnienie stabilizacji), $p_o = 17,565$ MPa
 Temperatura złożowa, $T_z = 394$ K
 Miąższość warstwy gazonośnej, $h = 12,50$ m

Promień odwiertu, $r_o = 0,0762$ m
 Porowatość skał warstwy gazonośnej, $\phi = 0,137$
 Lepkość gazu w warunkach złożowych, $\mu_g = 0,0186$ mPa s
 Ścisliwość całkowita ośrodka porowatego, $c_t = 0,0397$ 1/MPa
 Czas przyływu, $t_p = 3120$ min
 Objętość gazu wydobyta w okresie przyływu, $V_p = 198\,200$ Nm³
 Gęstość gazu w warunkach normalnych, $\rho_{std} = 0,810$ kg/m³
 Gęstość gazu w warunkach złożowych, $\rho_{res} = 111,71$ kg/m³
 Średni współczynnik ścisliwości gazu, $Z_s = 0,9387$
 Masa molowa gazu, $m_g = 18,25$ g/mol



Rys. 9. Ciśnienie denne ruchowe w funkcji czasu podczas testu
 Fig. 9. Drawdown pressure versus time during the test

Wyniki obliczeń



Rys. 10. Logarytm ciśnienia bezwymiarowego w funkcji czasu
 Fig. 10. Logarithm of dimensionless pressure versus time

Obliczona przepuszczalność: $k = 14,98$ mD
 Obliczona hydroprzewodność: $kh = 187,29$ mD \times m
 Obliczona przepuszczalność dla przykładu podanego przez Chaudhry'ego (2003): $k = 14,41$ mD

Przedstawiony sposób nie pozwala na obliczenie skin efektu S , wychodząc z jego definicji:

$$\Delta p_{skin} = \frac{Q\mu_g}{2\pi kh} S \quad (20)$$

ponieważ wydatek gazu Q z odwiertu w przedstawionym

podejściu jest funkcją czasu i ciśnienia, a w metodzie klasycznej założono, że jest on wielkością stałą.

Podsumowanie

1. Przepuszczalności skał zbiornikowych obliczone przy zastosowaniu klasycznej metody interpretacji testu przyływu podane przez Dake'a (1998) dla pierwszego i drugiego przykładu wynoszą odpowiednio 45 mD i 43 mD – w porównaniu do 48,08 mD i 41,27 mD obliczonych prezentowanym sposobem. W przypadku przykładów 3, 4 i 5 podanych przez Chaudhry'ego (2003) wyniki otrzymane za pomocą interpretacji danych przyływu metodą standardową wynoszą odpowiednio 8,47 mD, 8,96 mD i 14,41 mD, a z użyciem prezentowanej metody odpowiednio: 7,45 mD, 8,12 mD i 14,98 mD. Można zauważyć, że rozbieżność wyników interpretacji testów przyływu metodą standardową i opisywaną w artykule jest niewielka (rzędu kilku procent) i mieści w akceptowalnych granicach.
2. W klasycznej metodzie interpretacji nie uwzględnia się zmian natężenia wypływu gazu i przyjmuje, że jest ono stałe i równe wartości średniej dla okresu przyływu. W rzeczywistości jest ono funkcją czasu, gdyż w początkowym okresie przyływu szybko zmienia się depresja wywierana na złożu, a zatem wydatek gazu. Zdaniem autorów użycie sumarycznej objętości wydobytego gazu jest wygodniejsze.
3. Do obliczeń wykonywanych za pomocą prezentowanej metody należy wykorzystywać końcowe punkty pomiarowe odpowiadające dłuższym czasom przyływu z uwagi na potrzebę uzyskania stabilizacji zachowania ciśnienia przyływu.
4. Ze względu na brak danych pochodzących z odwiertów z krajowego przemysłu naftowego metodę przetestowano na danych zaczerpniętych z literatury. Wydaje się, że przykłady podane przez Dake'a (1988) mają charakter poglądowy w odróżnieniu od podanych przez Chaudhry'ego (2003), które są autentycznymi przykładami przemysłowymi.

Przelicznik jednostek przepuszczalności

$$1 \text{ mD} \cong 1,0 \times E-15 \text{ m}^2$$

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie nowej metody obliczania przepuszczalności złóż gazu na podstawie przebiegu zmian ciśnienia dennego w okresie przyływu gazu* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0058/SI/2020, nr archiwalny: DK-4100-0046/2020.

Literatura

Chaudhry A.U., 2003. Gas Well Testing Handbook. Elsevier: 248–268. ISBN 0-7506-7705-8.

- Civan F., 2015. Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation. Third edition, *Gulf Professional Publishing*, chapter 20.6: 706–708. ISBN: 9780128018989.
- Dake L.P., 1998. Fundamentals of reservoir engineering. *Elsevier*: 282–288.
- Szpunar T., 2001. How to compute permeability and skin factor of the low pressure water zones. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 40(7): 45–51.
- Szpunar T., Budak P., 2012. How to assess a depth of permeability impairment of the well-bore zone using drill stem-testing flow-period data. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 51(3): 215–222.
- Szpunar T., Budak P., 2016. A simple method for in situ evaluation of hard coal permeability in horizontal drainage wells (in Polish). *Nafta-Gaz*, 12: 1054–1062. DOI: 10.18668/NG.2016.12.07.
- Szpunar T., Budak P., Dziadkiewicz M., 2018. A simple technique for approximate evaluation of permeability and skin of a dry gas zone with low to moderate permeability using wellhead pressure data. *Nafta-Gaz*, 12: 905–918. DOI: 10.18668/NG.2018.12.05.
- Trajdos K, Wróbel M., 1965. *Matematyka dla inżynierów*. PWN, Warszawa.



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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU MIKROBIOLOGII

- badania procesów mikrobiologicznych w środowisku złożowym podziemnych magazynów gazu ziemnego (PMG);
- działania prewencyjne – zastosowanie biocydów, środków typu neutralizatory H_2S oraz inhibitorów bakterii redukujących siarczany (SRB), generowanie biogennego H_2S ;
- bioremediacja gruntów skażonych związkami ropopochodnymi;
- biodegradacja związków polimerowych wchodzących w skład płynów wiertniczych;
- mikrobiologiczne technologie stymulacji eksploatacji złóż węglowodorów;
- mikrobiologiczne metody poszukiwawcze: metodą powierzchniową oraz mikrobiologicznego profilowania odwiertów;
- badania testowe preparatów antybakteryjnych (biocydów);
- badania bakteriologiczne wody pitnej;
- analizy mikrobiologiczne wód termalnych.



Kierownik: dr Piotr Kapusta **Adres:** ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
Telefon: 12 617 76 90 **Faks:** 12 430 38 85 **E-mail:** piotr.kapusta@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
 – Państwowy Instytut Badawczy