

Tadeusz Szpunar, Paweł Budak

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Prosty sposób oceny przepuszczalności pionowej warstwy izolacyjnej złoża

Przedstawiono konstrukcję zestawu pomiarowego, sposób wykonania pomiarów służących do określania przepuszczalności pionowej strefy przyodwiertowej warstwy izolacyjnej złoża oraz model matematyczny, na podstawie którego opracowano sposób określania tej przepuszczalności. Znajomość przepuszczalności strefy przyodwiertowej, a raczej stwierdzenie jej braku, jest warunkiem koniecznym do oceny przydatności wyeksploatowanego złoża do magazynowania płynów, jak również do podejmowania decyzji o ewentualnych zabiegach mających na celu likwidację tej przepuszczalności. Przy ocenie wielkości przepuszczalności pionowej strefy przyodwiertowej zastosowano metodę wpasowania krzywej pomiarowej do jednej z pęku krzywych teoretycznych.

Słowa kluczowe: strefa przyodwiertowa, przepuszczalność pionowa, przepływ płynów w ośrodku porowatym, równanie typu dyfuzji.

A simple procedure for the evaluation of the vertical permeability of the wellbore zone opposite the isolation layers overlying the hydrocarbon reservoir

Proposed is a configuration of packers and pressure gauges in down hole equipment used for the evaluation of the vertical permeability of the wellbore zone of layers overlying the hydrocarbon reservoir and presented is a mathematical model which supports the proposed method. Knowledge of vertical permeability of zones overlying the hydrocarbon reservoir is necessary when the reservoir is expected to be used for gas/fluid storage purposes. The curve fitting method is used for the calculation of the vertical permeability value of the wellbore zone of layers overlying the reservoir.

Key words: wellbore zone, vertical permeability, fluid flow in porous media, diffusivity equation.

Wstęp

Warunkiem akumulacji gazu lub innych węglowodorów w warstwach porowatych i przepuszczalnych jest istnienie tak zwanej pułapki geologicznej, to jest specjalnego ukształtowania tych warstw (synklina lub antyklina), które przykryte są nieprzepuszczalnymi osadami uniemożliwiającymi migrację węglowodorów ze złoża. Przepuszczalność takich warstw jest w praktyce równa zero, czego dowodem jest fakt istnienia złoża przez miliony lat, czyli przez tzw. czas geologiczny. Brak migracji węglowodorów ze złoża świadczy zatem o nieprzepuszczalności warstw izolujących złoże, czyli bezpośredniego nadkładu. Procesy wiercenia, rurowania i cementowania oraz wszystkie inne czynności technologiczne wykonywane w otworze wpływają na integralność warstwy izolującej złoże od góry przez oddziaływania mechaniczne, które prowadzą do powstania wokół odwiertu tak zwanej strefy przyodwiertowej. Charakteryzuje się ona występowaniem sieci mikropeknięć łączących system porów, co sprawia, że strefa przyodwiertowa może stać się przepuszczalna.

W przypadku gdy wyeksploatowane złoże gazu lub ropy przeznaczone zostanie do magazynowania węglowodorów ciekłych lub gazowych lub innych substancji, wcześniej należy ustalić, czy nadległa nad złożem warstwa nie straciła swoich zdolności izolujących w strefie przyodwiertowej. W razie stwierdzenia przepuszczalności warstwy izolującej złoże od góry

można zakładać, że występuje ona jedynie w pewnym bezpośrednim otoczeniu otworu i próbować ją zlikwidować przez zatłaczanie na chłonność rozmaitych żeli uszczelniających. Zasięg strefy o zmienionej przepuszczalności można określić, na przykład, metodą podaną przez autorów w pracy [5]. Jeżeli warstwa izolująca jest przepuszczalna w strefie wokół otworu, wtedy należy uznać, że wyeksploatowane złożo węglowodorów nie będzie szczelne i nie nadaje się na magazyn.

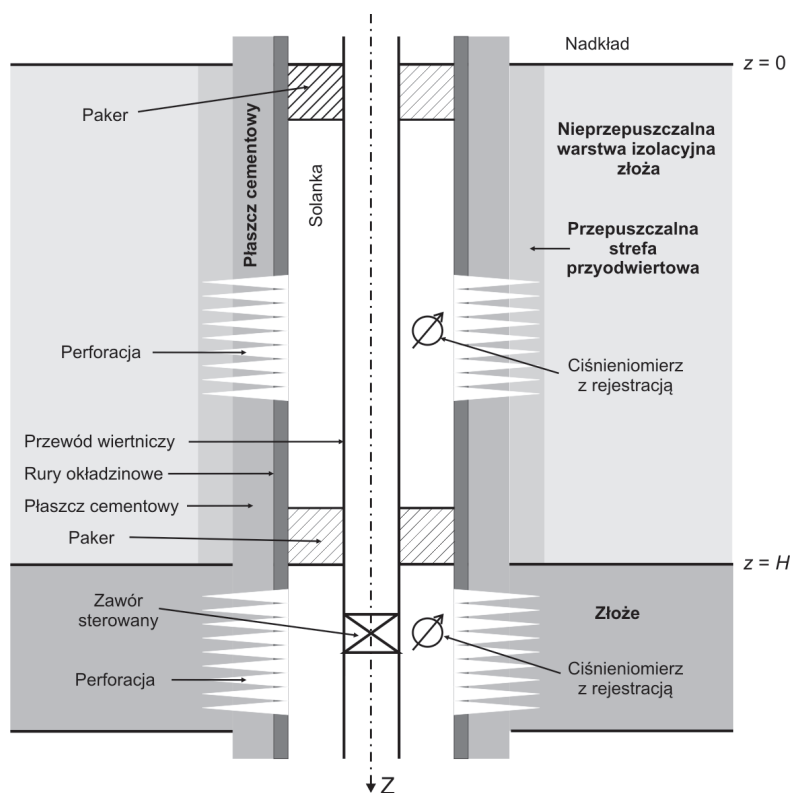
Przed przeznaczaniem złoża na magazyn należy zatem ocenić szczelność strefy przyodwiertowej nadległej warstwy izolacyjnej, która była szczególnie narażona na rozszczelnienie w trakcie wiercenia i eksploatacji. Firma Schlumberger wykonuje w tym celu test interferencji pionowej (*vertical interference test*) za pomocą specjalnego zestawu składającego się z systemu pakerów służących do izolacji złoża i/lub warstwy izolującej oraz przyrządów do pomiaru ciśnienia i natężenia przepływu. Sposób przeprowadzania testu interferencji pionowej podano w pracach [1, 3, 4]. Sam zestaw do badania szczelności oraz metoda interpretacji wyników są przedmiotem ochrony prawnej. Firma Schlumberger wykonuje komercyjnie testy pozwalające na ocenę łączności hydrodynamicznej w strefie przyodwiertowej pomiędzy pokładami produktywnymi zlokalizowanymi powyżej i poniżej warstwy izolującej, co pozwala orzekać o przydatności złoża do magazynowania płynów.

W niniejszej publikacji zaprezentowano prosty alternatywny zestaw pomiarowy, który może być użyty w przypadku wystąpienia pewnych warunków w otworze, oraz sposób interpretacji wyników oparty na rozwiązaniu modelu matematycznego, przy przyjęciu odpowiednich warunków brzegowych i warunku początkowego. Podano również hipotetyczny przykład obliczeniowy, gdyż autorzy nie dysponowali pomiarami przemysłowymi – nie były one jak dotąd wykonywane w krajowym przemyśle naftowym, a także brak jest wyników takich pomiarów w literaturze.

Konstrukcja zestawu pomiarowego oraz założenia modelu i jego rozwiązanie

Konstrukcję zestawu pomiarowego pokazano na rysunku 1.

Zestaw składa się z dwóch pakerów zainstalowanych na przewodzie, dwóch manometrów, z których jeden umieszczony jest na głębokości perforacji złoża, a drugi w połowie miąższości warstwy izolacyjnej, oraz ewentualnie ze sterowanego zaworu przepływowego umieszczonego w przewodzie pod dolnym pakerem. Zakładamy, że otwór w interwale warstwy izolacyjnej jest zarurowany i szczelnie zacementowany, tak że przepływ płynów poza rurami okładzinowymi nie jest możliwy, oraz że przestrzeń pierścieniowa naprzeciw warstwy izolacyjnej, pomiędzy przewodem a rurami okładzinowymi, po zapięciu pakerów i odizolowaniu jej, wypełniona jest solanką, jak również że w środku tej warstwy wykonano perforację rur okładzinowych zapewniającą kontakt hydrodynamiczny pomiędzy przestrzenią pierścieniową a tą warstwą. Zakładamy również, że z powodu całkowitego braku ściśliwości solanki jej ciśnienie w przestrzeni pierścieniowej zamkniętej pomiędzy pakerami naprzeciw perforacji warstwy izolacyjnej równe jest ciśnieniu w strefie przyotworowej w tej warstwie na tej głębokości. Brak jest także możliwości przepływu radialnego (poziomego) w warstwie izolacyjnej z uwagi na odizolowanie przestrzeni pierścieniowej naprzeciw niej przez pakery oraz nieściśliwość solanki wypełniającej tę przestrzeń, jak również brak przepuszczalności warstwy poza strefą przyodwiertową. Warunek wypełnienia solanką przestrzeni pierścieniowej pomiędzy pakerami zestawu pomiarowego jest łatwy do spełnienia, gdyż w polskich warunkach w przypadku większości złożów gazu lub ropy w końcowym okresie eksploatacji na spodzie odwiertu dochodzi do gromadzenia się wody złożowej, która przykrywa złożo i warstwę nadległą.



Rys. 1. Schemat zestawu pomiarowego

Zakładamy, że ciśnienie w stropie warstwy izolacyjnej przez cały czas trwania testu jest stałe i równe ciśnieniu w porowatej warstwie nadległej – z racji kontaktu hydraulicznego z nią.

Wersja A

Zakładamy, że w strefie przyodwiertowej w wyniku oddziaływania ciśnienia nadkładu doszło w warstwie izolacyjnej do powstania mikropęknięć, skutkujących powstawaniem przepuszczalności pionowej i poziomej oraz możliwości pionowego przepływu przez warstwę solanki w przypadku wystąpienia różnicy ciśnień pomiędzy stropem a spągiem. Ciśnienie w strefie przyodwiertowej jest funkcją położenia z i czasu t .

Kierujemy oś głębokości z w dół (rysunek 1) i przyjmujemy, że strop strefy przyodwiertowej znajduje się na głębokości $z = 0$, natomiast spąg na głębokości $z = H$. Zakładamy, że przed rozpoczęciem testu $p(0, t) = p_0$, czyli ciśnienie w stropie równe jest ciśnieniu w warstwie nadległej, gdzie $p_0 = \text{const}$, oraz $p(H, 0) = p_1$, gdzie p_1 to ciśnienie w spągu strefy przyodwiertowej warstwy izolacyjnej równe ciśnieniu złożowemu.

Test polega na uruchomieniu eksploatacji przez otwarcie zaworu pod dolnym pakerem i rejestrowaniu zmian ciśnienia dennego naprzeciw złoża oraz w połowie grubości warstwy izolacyjnej przy użyciu manometrów o wysokiej czułości.

Zakładamy, że po uruchomieniu eksploatacji przebieg zmian ciśnienia dennego ruchowego naprzeciw złoża pod dolnym pakerem w początkowym okresie przyływu aproksymować można funkcją:

$$p(H, t) = p_0 + (p_1 - p_0)e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0 \quad (\text{A1})$$

oraz że ciśnienie w spągu warstwy izolacyjnej w strefie przyodwiertowej równe jest ciśnieniu podanemu wzorem (A1). Współczynnik α we wzorze (A1) zależy od przepuszczalności warstwy złożowej i określany jest na podstawie pomiarów. Zgodnie z tym co powiedziano wcześniej, funkcja opisująca ciśnienie w warstwie izolacyjnej w zależności od głębokości i czasu musi spełniać następujące warunki:

$$p(z, 0) = p_0 + \frac{z}{H}(p_1 - p_0) \quad (\text{A2})$$

$$p(0, t) = p_0 \quad (\text{A3})$$

$$p(H, t) = p_0 + (p_1 - p_0)e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0 \quad (\text{A4})$$

oraz równanie typu dyfuzji opisujące zmiany ciśnienia przy liniowym przepływie cieczy słabo ściśliwej przez ośrodek porowaty [2, 7]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (\text{A5})$$

gdzie:

$$a = \left(\frac{k_v}{\phi \mu c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A6})$$

k_v – przepuszczalność pionowa,

ϕ – porowatość,

μ – lepkość płynu złożowego,

c – ściśliwość skały wraz z nasycającym ją płynem,

$z = 0$ i $z = H$ – odpowiednio poziom stropu i spągu warstwy izolacyjnej,

$p_0 = \text{const}$ – ciśnienie w stropie warstwy izolacyjnej,

p_1 – ciśnienie w złożu w chwili $t = 0$.

Funkcję $p(z, t)$ przedstawiamy w postaci sumy:

$$p(z, t) = v(z, t) + p_0 + \frac{z}{H}(p_1 - p_0)e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0 \quad (\text{A7})$$

Z (A7) mamy:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{z}{H}(p_1 - p_0)e^{-\alpha t}(-\alpha) \quad (\text{A8})$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{H}(p_1 - p_0)e^{-\alpha t} \quad \text{oraz} \quad \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (\text{A9})$$

Z równań (A5) i (A7) do (A9) wynika, że funkcja $v(z, t)$ spełnia równanie:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{z}{H}(p_1 - p_0)e^{-\alpha t}(\alpha) \quad (\text{A10})$$

oraz warunki:

$$\left. \begin{aligned} v(z, 0) &= 0 \\ v(0, t) &= 0 \\ v(H, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A11})$$

Funkcję $v(z, t)$ przedstawiamy dla $0 \leq z < H$ w postaci szeregu Fouriera [6]:

$$v(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} \quad (\text{A12})$$

Podobnie:

$$f(z, t) = \frac{z}{H}(p_1 - p_0)e^{-\alpha t}(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} \quad (\text{A13})$$

Wzór (A13) jest słuszny w przedziale $0 \leq z < H$, a dla $z = H$ już nie, gdzie:

$$\begin{aligned} f_n(t) &= \frac{2}{H} \int_0^H \frac{\zeta}{H} (p_1 - p_0) e^{-\alpha t} \alpha \sin \frac{n\pi \zeta}{H} d\zeta = \frac{2\alpha}{H^2} (p_1 - p_0) e^{-\alpha t} \int_0^H \zeta \sin \frac{n\pi \zeta}{H} d\zeta = \\ &= \frac{2\alpha}{H^2} (p_1 - p_0) e^{-\alpha t} (-1)^{n+1} \frac{H^2}{n\pi} = \frac{2\alpha}{\pi} (p_1 - p_0) \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\alpha t} \end{aligned} \quad (\text{A14})$$

Podstawiając (A12) i (A13) do równania (A10), otrzymamy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} = a^2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) (-1) \left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 \sin \frac{n\pi z}{H} + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} \quad (\text{A15})$$

czyli:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi z}{H} \left[v_n(t) + \left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 v_n(t) - f_n(t) \right] = 0 \quad (\text{A16})$$

Równanie (A16) będzie spełnione, jeżeli wszystkie współczynniki rozwinięcia będą zerami, czyli funkcja $v_n(t)$ musi spełniać równanie:

$$v_n(t) + \left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 v_n(t) = f_n(t) = \frac{2\alpha}{\pi} (p_1 - p_0) \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\alpha t} \quad (\text{A17})$$

Należy pamiętać (A11), że ponieważ:

$$v(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(0) \sin \frac{n\pi z}{H} = 0 \quad (\text{A18})$$

to $v_n(0) = 0$.

$v_n(t)$ spełniająca równanie (A17) oraz warunek (A18) jest postaci:

$$v_n(t) = \frac{1}{\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 - \alpha} \cdot \frac{2\alpha}{\pi} (p_1 - p_0) \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left[e^{-\alpha t} - e^{-\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 t} \right] \quad (\text{A19})$$

Możemy obecnie podać wzór określający funkcję $p(z, t)$ spełniającą równanie (A5) oraz warunki (A2), (A3) i (A4), który posłużyć może do określenia wielkości przepuszczalności pionowej strefy przyotworowej warstwy izolacyjnej w sposób podany w załączonym hipotetycznym przykładzie obliczeniowym:

$$p(z, t) = \frac{2\alpha}{\pi} (p_1 - p_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 - \alpha} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left[e^{-\alpha t} - e^{-\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 t} \right] \sin \frac{n\pi z}{H} \right\} + p_0 + \frac{z}{H} (p_1 - p_0) e^{-\alpha t} \quad (\text{A20})$$

Równanie (A20) w przemysłowym układzie jednostek ma postać:

$$p(z, t) = 0,64\alpha (p_1 - p_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(\beta n)^2 - \alpha} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left[e^{-\alpha t} - e^{-(\beta n)^2 t} \right] \sin \frac{n\pi z}{H} \right\} + p_0 + \frac{z}{H} (p_1 - p_0) e^{-\alpha t} \quad (\text{A21})$$

$p(z, t)$ [MPa] – ciśnienie w punkcie z ,

$\alpha \left[\frac{1}{\text{min}} \right]$ – wykładnik obliczany na podstawie danych pomiarowych,

p_1 [MPa] – ciśnienie w spągu warstwy izolacyjnej w strefie przyotworowej w chwili $t = 0$, $z = H$ równe początkowemu ciśnieniu w złożu,

p_0 [MPa] – ciśnienie w stropie warstwy izolacyjnej w strefie przyotworowej dla $z = 0$ ($p_0 = \text{constans}$),

$n = 1, 2, \dots, N$

$$\beta^2 \left[\frac{1}{\text{min}} \right] = 5,92 \cdot 10^{-4} \frac{k[\text{mD}]}{\phi\mu[\text{mPas}]c[1/\text{MPa}]H^2[\text{m}^2]}$$

z [m] – współrzędna [m], $0 < z < H$,

H [m] – grubość pokładu,

N – liczba pomiarów.

Wersja B

Zestaw służący do oceny szczelności warstwy izolującej i jej przepuszczalności jest taki sam jak w wersji A, identyczne jest usytuowanie pakerów, ciśnieniomierzy i zaworu przepływowego, jak również sytuacja w otworze.

Zakładamy, że w przypadku warstw izolacyjnych o **niewielkiej grubości** można przyjąć, że w chwili początkowej w całej warstwie panuje jednakowe ciśnienie p_0 oraz że w chwili $t = 0$, w wyniku otwarcia zaworu przepływowego, uruchomiona zostaje eksploatacja zalegającego poniżej złoża, co skutkuje spadkiem ciśnienia w spągu warstwy izolacyjnej w strefie przyodwiertowej.

Sytuujemy oś głębokości z identycznie jak na rysunku 1, tzn. $z = 0$ odpowiada stropowi, a $z = H$ – spągowi strefy przyodwiertowej. Zakładamy, że spadek ciśnienia w złożu zalegającym poniżej, czyli również w spągu strefy przyodwiertowej warstwy izolacyjnej, w początkowym okresie przyływu do otworu aproksymować można wzorem:

$$p(H, t) = p_0 e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0 \quad (\text{B1})$$

oraz że ciśnienie przy przyływie płynu pomiędzy stropem a spągiem warstwy izolacyjnej spełnia równanie typu dyfuzji, a także warunki wynikające z podanych założeń:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (\text{B2})$$

gdzie $a = \left(\frac{k}{\phi\mu c}\right)^{\frac{1}{2}}$

$$p(z, 0) = p_0 \tag{B3}$$

$$p(H, t) = p_0 e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0 \tag{B4}$$

$$p(0, t) = p_0 \tag{B5}$$

Przedstawiamy funkcję $p(z, t)$ w postaci:

$$p(z, t) = v(z, t) + p_0 + \frac{z}{H} p_0 (e^{-\alpha t} - 1), \quad \alpha > 0 \tag{B6}$$

Mamy wówczas:

$$\left. \begin{aligned} v(z, 0) &= 0 \\ v(0, t) &= 0 \\ v(H, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{B7}$$

Z (B6) wynika, że:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{z}{H} p_0 \alpha e^{-\alpha t} \tag{B8}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{B9}$$

Funkcja $v(z, t)$ spełnia równanie:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{z}{H} p_0 \alpha e^{-\alpha t} \tag{B10}$$

Funkcję $v(z, t)$ przedstawiamy w postaci szeregu Fouriera:

$$v(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} \tag{B11}$$

dla $0 \leq z < H$.

Podobnie dla $0 \leq z < H$:

$$f(x, t) = \frac{z}{H} p_0 \alpha e^{-\alpha t} = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \sin \frac{n\pi z}{H} \tag{B12}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} f_n(t) &= \frac{2}{H} \int_0^H \frac{\zeta}{H} p_0 \alpha e^{-\alpha t} \sin \frac{n\pi \zeta}{H} d\zeta = \frac{2\alpha}{H^2} p_0 e^{-\alpha t} \int_0^H \zeta \sin \frac{n\pi \zeta}{H} d\zeta = \\ &= \frac{2\alpha}{H^2} p_0 e^{-\alpha t} (-1)^{n+1} \frac{H^2}{n\pi} = \frac{2\alpha}{\pi} p_0 \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\alpha t} \end{aligned} \tag{B13}$$

Rozumując identycznie jak w wersji A, można wykazać (dowód pomijamy), że funkcja spełniająca równanie (B2) oraz warunki (B3), (B4) i (B5) jest postaci:

$$p(z, t) = \frac{2\alpha}{\pi} p_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 - \alpha} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left[e^{-\alpha t} - e^{-\left(\frac{an\pi}{H}\right)^2 t} \right] \sin \frac{n\pi z}{H} \right\} + p_0 + \frac{z}{H} p_0 (e^{-\alpha t} - 1) \tag{B14}$$

Równanie (B14) w przemysłowym układzie jednostek ma postać:

$$p(z, t) = 0,64\alpha p_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(\beta n)^2 - \alpha} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{n} \left[e^{-\alpha t} - e^{-(\beta n)^2 t} \right] \sin \frac{n\pi z}{H} \right\} + p_0 + \frac{z}{H} p_0 (e^{-\alpha t} - 1) \quad (\text{B15})$$

gdzie

$$\beta^2 \left[\frac{1}{\text{min}} \right] = 5,92 \cdot 10^{-4} \frac{k[\text{mD}]}{\phi\mu[\text{mPas}]c[1/\text{MPa}]H^2[\text{m}^2]} \quad (\text{B16})$$

a reszta oznaczeń i przyjęte jednostki są identyczne jak w wersji A. Równania (B15) i (A21) umożliwiają określenie przepuszczalności pionowej w strefie przyodwiertowej warstwy izolacyjnej złoża przez skonstruowanie na podstawie danych pomiarowych wykresu zależności ciśnienia w środku warstwy izolacyjnej od czasu, tj. $p(H/2, t)$ od t , oraz dopasowanie tego wykresu do jednej z krzywych teoretycznych skonstruowanych dla rozmaitych założonych przepuszczalności pionowych k_v i wnioskowanie na tej podstawie o wielkości k_v wynikającej z danych pomiarowych.

Przykłady obliczeniowe

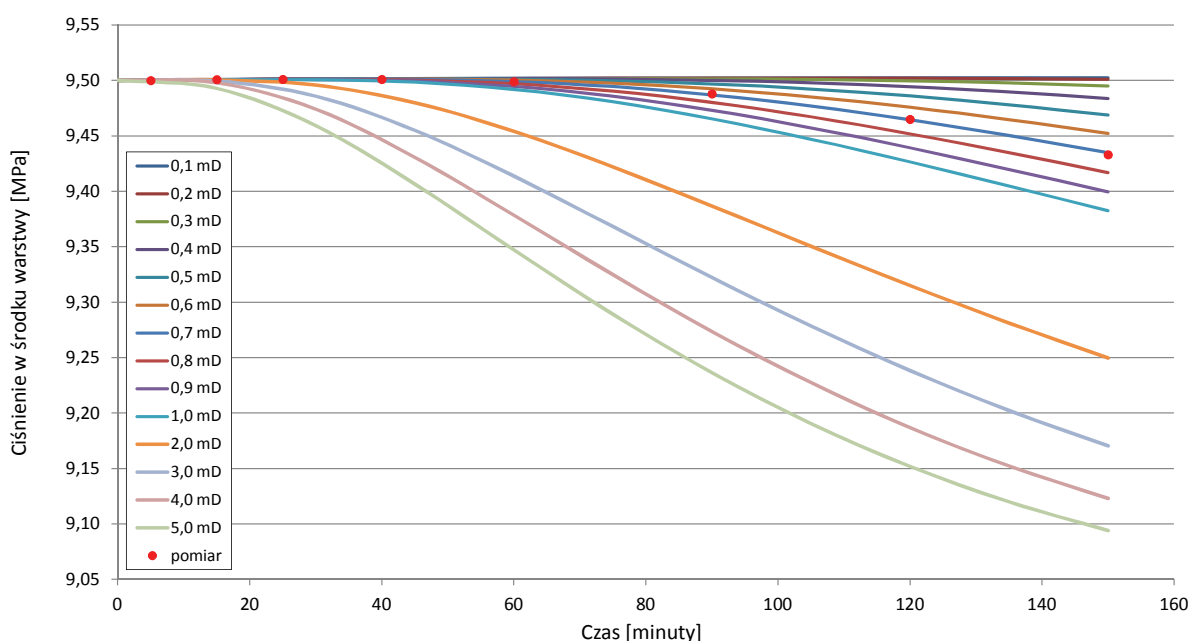
Wersja A

- Ciśnienie w stropie warstwy izolacyjnej w strefie przyodwiertowej p_0 : 9,0 MPa.
- Ciśnienie początkowe w spągu warstwy izolacyjnej w strefie przyodwiertowej $p_1 (> p_0)$: 10,0 MPa.
- Porowatość warstwy izolacyjnej: 0,05.
- Ściśliwość skał warstwy izolacyjnej: $3,0 \cdot 10^{-4}$ 1/MPa.
- Lepkość medium nasycającego warstwę izolacyjną: 1,0 mPa · s.
- Grubość warstwy izolacyjnej: 90 m.

Krzywą pomiarową dopasowano do krzywej teoretycznej dla $k = 0,7$ mD.

Wielkość α obliczano za pomocą specjalnego podprogramu wykorzystującego metodę najmniejszych kwadratów.

Czas [min]	$p(H, t)$ [MPa]	$p(H/2, t)$ [MPa]
5	9,91	9,50
15	9,74	9,50
25	9,60	9,50
40	9,45	9,50
60	9,31	9,50
90	9,17	9,49
120	9,08	9,47
150	9,05	9,43



Rys. 2. Teoretyczne krzywe zależności $p(H/2, t)$ od t dla rozmaitych założonych wielkości przepuszczalności pionowej k_v ,

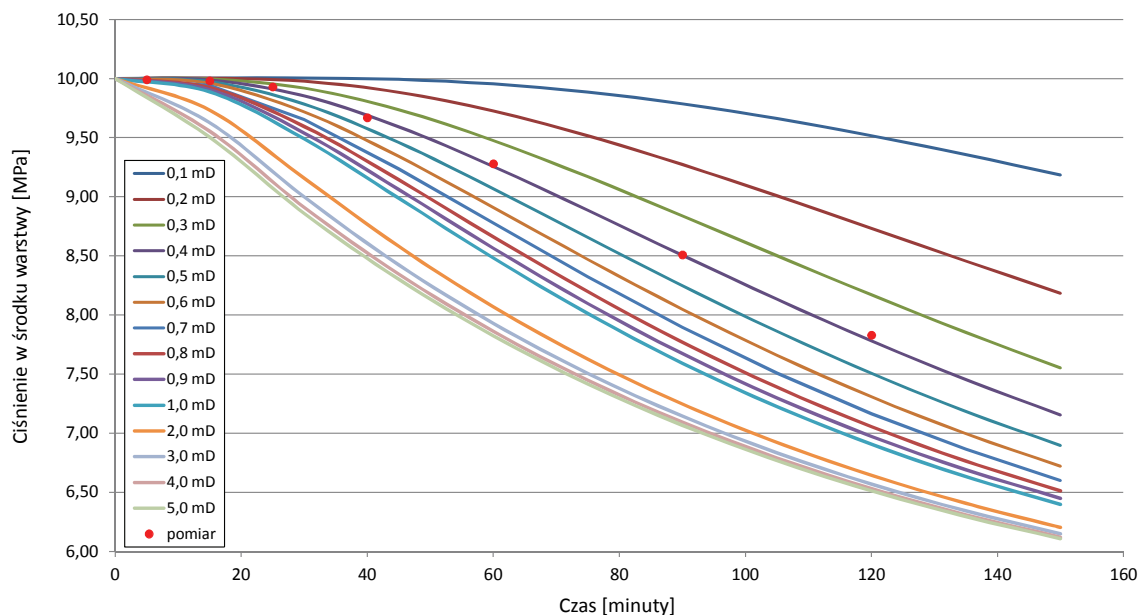
Wersja B

- Ciśnienie w warstwie izolacyjnej p_0 : 9,0 MPa.
- Porowatość warstwy izolacyjnej: 0,1.
- Ścisłość skał warstwy izolacyjnej: $3,0 \cdot 10^{-4}$ 1/MPa.
- Lepkość medium nasycającego warstwę izolacyjną: 1,0 mPa · s.
- Grubość warstwy izolacyjnej: 20 m.

Krzywą pomiarową dopasowano do krzywej teoretycznej dla $k = 0,4$ mD.

Wielkość α obliczano za pomocą specjalnego podprogramu wykorzystującego metodę najmniejszych kwadratów.

Czas [min]	$p(H, t)$ [MPa]	$p(H/2, t)$ [MPa]
5	9,51	9,99
15	8,58	9,98
25	7,65	9,93
40	6,63	9,67
60	5,43	9,28
90	3,81	8,51
120	2,77	7,83



Rys. 3. Teoretyczne krzywe zależności $p(H/2, t)$ od t dla rozmaitych założonych wielkości przepuszczalności pionowej k_v .

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 2, s. 67–74

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej finansowanej przez MNiSW; zlec. 20/SI/13, nr arch.: DK-4100-20/13.

Literatura

- [1] Ayan C., Coley N. et al.: *Measuring permeability anisotropy: the latest approach*. Oilfield Review 1994, October.
- [2] Dake L. P.: *Fundamentals of reservoir engineering*. New York, Elsevier, 1978.
- [3] Ehlig-Economides C., Ayoub J. A.: *Vertical interference testing across a low permeability zone*. SPE 1986, November.
- [4] Gasda S. E., Celia M. A., Wang J., Duguid A.: *Effective wellbore permeability estimates from vertical interference testing of existing wells*. In Proceedings of the 11th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-11), Kyoto, Japan, 19–22 November, 2012.
- [5] Szpunar T., Budak P.: *How to assess the depth of permeability impairment of the wellbore zone using drillstem-testing flow-period data*. Journal of Canadian Petroleum Technology 2012, vol. 51, no. 3, pp. 215–222.
- [6] Trajdos T.: *Matematyka dla inżynierów*. PWN, Warszawa 1987.
- [7] Zimmerman R. W.: *Fluid flow in porous media*. Imperial College of London 2002, <https://workspace.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/Public/external/Staff/RobertZimmerman/Fluid%20Flow%20in%20Porous%20Media.pdf>



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