

Mirosław Wojnicki, Stanisław Biały, Jerzy Kuśnierczyk, Sławomir Szuflita, Marcin Warnecki

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Pomiary mikroprzepuszczalności oparte na zjawisku zanikania impulsu ciśnienia (*pressure pulse decay*)

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych skoncentrowanych na pomiarach mikroprzepuszczalności opartych na zjawisku zanikania impulsu ciśnienia (ang. *pressure pulse decay*). Głównym zamierzeniem przeprowadzonych prac było zbudowanie odpowiedniego stanowiska i opracowanie dla niego procedury badania mikroprzepuszczalności (w zakresie $0,1 \div 0,01 \mu\text{D}$) w rdzeniach wiertniczych za pomocą azotu. Wykonano 50 pomiarów współczynnika przepuszczalności na 18 wyselekcjonowanych rdzeniach reprezentujących 3 różne typy litologiczne: dolomity (Ca₂), środkowokambryjskie piaskowce kwarcowe oraz piaskowce czerwonego spągowca. Pomiary prowadzono przy trzech różnych ciśnieniach badawczych (porowych), tj. 70, 100 i 150 bar, a uzyskane na ich podstawie wartości współczynnika przepuszczalności zawierają się w zakresie $0,10 \div 122,12 \mu\text{D}$. Na podstawie pomiarów wykonanych przy różnych ciśnieniach badawczych należy stwierdzić, że wartość współczynnika przepuszczalności zmniejsza się wraz z podwyższeniem ciśnienia. Obserwowany spadek przepuszczalności jest zmienny wśród przebadanych rdzeni i w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia wynosił $0,4 \div 38\%$, średnio około 5%. Na wartość współczynnika przepuszczalności ma również wpływ wartość zastosowanego nadatku ciśnienia w układzie uszczelnienia i – podobnie jak w przypadku ciśnienia badawczego – zwiększenie ciśnienia uszczelnienia skutkuje obniżeniem wartości współczynnika przepuszczalności. Obserwowany spadek przepuszczalności jest jednak bardziej wyraźny i w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia wynosił średnio 15%.

Słowa kluczowe: mikroprzepuszczalność, zanikanie impulsu ciśnienia, pomiary przepuszczalności dla gazu.

Micropermeability measurements based on pressure pulse decay method

The paper presents the results of research focused on micropermeability measurements using pressure pulse decay method. The main aim of the work was to build a suitable test stand and to develop a micropermeability testing procedure (in the range of $0.1 \div 0.01 \mu\text{D}$) in the drilling core samples, using nitrogen. 50 micropermeability measurements were performed on 18 selected cores, representing 3 different lithological types: dolomites (Main Dolomite), Middle Cambrian quartz sandstones and Lower Permian Rotligend sandstones. Measurements were conducted at three different test (pore) pressures: 70, 100 and 150 bar, and the resulting values of the permeability coefficient ranged from 0.10 to 122.12 μD . Basing on the measurements which were made at different pore (test) pressures, it should be noted that the value of the permeability coefficient decreases with increasing pressure. The observed decrease in permeability is variable among the tested cores and when calculated per 10 bar pressure increase, it was $0.4 \div 38\%$, averaged 5%. Permeability coefficient is also influenced by the value of confining pressure exerted by the sealing system, and same as in the case of pore pressure, increasing the confining pressure results in decreasing permeability. However, the observed decrease in permeability is more pronounced and when calculated per 10 bar pressure increase, averaged 15%.

Key words: micropermeability, pressure pulse decay, gas permeability measurements.

Wstęp

Prawidłowe określenie przepuszczalności, będącej jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących właściwości petrofizyczne, jest kluczowe dla oszacowania zdolności skał do magazynowania i transportu płynów złożowych. Z kolei na tych szacunkach oparte są dalsze decyzje związane z wy-

borem metody udostępnienia złoża, sposobu jego eksploatacji, jak i symulacje produktywności złoża oraz przebiegu jej zmian w czasie trwania eksploatacji. W dobie ogólnosiwiatowego zainteresowania niekonwencjonalnymi złożami węglowodorów w skałach o niskiej przepuszczalności nieodzownym

elementem poprawnej oceny warunków złożowych są badania mikroprzepuszczalności (przepuszczalności w zakresie od 10 nD do 0,1 mD). Tradycyjne podejście analityczne, wykorzystujące ustalony stan przepływu, jest zbyt czasochłonne dla niskich przepuszczalności, by mogło być z powodzeniem

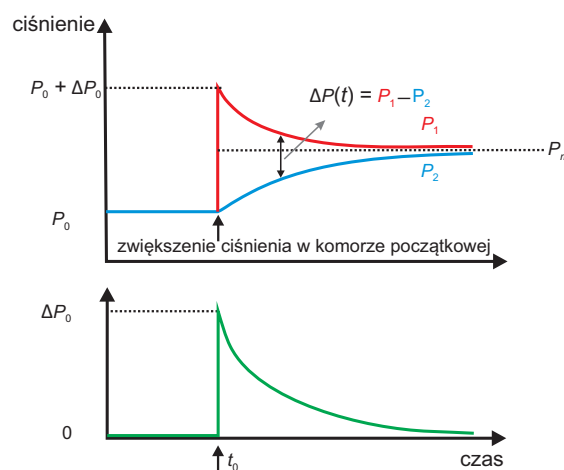
stosowane w praktyce laboratoryjnej. Z tego względu opracowano szereg metod wykorzystujących nieustalony stan przepływu, z których jedną z najważniejszych jest użyta w niniejszej pracy metoda oparta na zjawisku zanikania impulsu ciśnienia (ang. *pressure pulse decay*).

Podstawy teoretyczne pomiarów mikroprzepuszczalności na podstawie zanikania impulsu ciśnienia

Pierwotnie metodę tę zaprezentowano dla pomiarów przepuszczalności skał krystalicznych na potrzeby składowania odpadów jądrowych [3, 6, 8]. Następnie została zastosowana do pomiarów w skałach solnych o skrajnie niskiej przepuszczalności [9, 12], a później zaadaptowana i rozwinięta przez branżę naftową do pomiarów przepuszczalności płynów w skałach złożowych [2, 10, 11].

Zestaw badawczy składa się zwykle z komory rdzeniowej (w której umieszcza się badaną próbkę) oraz dwóch komór pomiarowych: pierwszej (początkowej – V1) – znajdującej się na wejściu do komory rdzeniowej i drugiej (końcowej – V2) – znajdującej się na wyjściu z komory rdzeniowej. Początkowo przy otwartym układzie (wszystkie komory połączone) nasycą się badaną próbkę wykorzystywanym w badaniu płynem i stabilizuje ciśnienie. Badanie polega na wywołaniu niewielkiego impulsu ciśnienia (1–3% ciśnienia porowego) w komorze V1 i obserwacji zmian ciśnienia w obydwu komorach pomiarowych (rysunek 1). Utworzona w ten sposób różnica ciśnień między komorami pozwala na przepływ płynu z komory na wejściu przez komorę rdzeniową z próbką do komory na wyjściu. Zmiany ciśnień w obydwu komorach są zapisywane w funkcji czasu. Przepuszczalność próbki jest obliczana na podstawie interpretacji krzywej zaniku impulsu ciśnienia.

Istnieje kilka podejść do metody zaniku impulsu ciśnienia, wyróżniających się stosowanymi równaniami i sposobem interpretacji danych. Brace i in. wykorzystali w swojej pracy [3] równanie przepływu dla płynu nieściśliwego i metodę liniową przetwarzania danych. Takie podejście nie pozwala na prawidłowe uchwycenie fizyki przepływu płynów ściśliwych, przez co podejście to wskazuje prawidłowe trendy w zmianach przepuszczalności, lecz wartości przepuszczalności mogą być obciążone błędem. Prawidłowe określenie trendów przepuszczalności pozwala na wykrywanie jej zmian w funkcji ciśnień zewnętrznych, zawartości wody czy heterogeniczności ośrodka porowatego. Haskett [5] w swoich badaniach po raz pierwszy zaproponował wykorzystanie parametrów pseudociśnienia i pseudoczasu do analizy danych. Zaletą tego podejścia jest możliwość wzięcia pod uwagę zmian w lepkości i ściśliwości zachodzących w trakcie trwania eksperymentu. Podejście to ma jednak dwa mankamenty. Po pierwsze, wymaga przekształcenia różnicy ciśnień do pseudociśnienia, co może być pro-



Rys. 1. Wykresy obrazujące przebieg zmian ciśnień w czasie pomiarów metodą zaniku impulsu ciśnienia (na podstawie [13]), P_m – średnie ciśnienie w układzie, P_0 – ciśnienie początkowe

blematyczne ze względu na nieliniową zależność między ciśnieniem a pseudociśnieniem (w zakresie niskich ciśnień). Po drugie, metoda wymaga opracowania algorytmu komputerowego w celu automatycznego dopasowywania krzywych. W pracach Hsieha [6] i Neuzila [8] wykorzystano równanie przepływu dla płynu „lekkiego ściśliwego” i dopasowanie krzywej jako metodę przetwarzania danych. Jednakże przy użyciu tego równania nie ma możliwości przeanalizowania niektórych problemów przepływu gazu w pewnych zakresach ciśnień. Podejście, które zastosowano w niniejszej pracy, zaproponowane przez Dickera i Smits [4] i zmodyfikowane przez Jonesa [7], wykorzystuje wspomniane wyżej równanie i metodę liniową analizy danych oraz znacząco upraszcza rozwiązanie analityczne dla obliczenia przepuszczalności.

Ogólne rozwiązanie analityczne dla różnicy ciśnień w funkcji bezwymiarowego czasu zaprezentowane przez Dickera i Smits [4] przyjmuje postać:

$$\Delta p_D = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a(b^2 + \theta_m^2) - (-1)^m b \sqrt{(a^2 + \theta_m^2)(b^2 + \theta_m^2)}}{\theta_m^2 (\theta_m^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} \cdot \exp(-\theta_m^2 t_D) \quad (1)$$

gdzie:

P_D – bezwymiarowe ciśnienie,

θ_m^2 – pierwiastki równania:

$$\tan\theta = \frac{(a+b)\theta}{\theta^2 - ab} \quad (2)$$

a – stosunek ściśliwej przestrzeni porowej próbki do ściśliwej przestrzeni w komorze początkowej:

$$a = \frac{V_p(c_g + c_{pv})}{V_1(c_g + c_{v1})} \quad (3)$$

b – stosunek ściśliwej przestrzeni porowej próbki do ściśliwej przestrzeni w komorze końcowej:

$$b = \frac{V_p(c_g + c_{pv})}{V_2(c_g + c_{v2})} \quad (4)$$

t_D – bezwymiarowy czas (od rozpoczęcia zaniku impulsu ciśnienia):

$$t_D = \frac{[6,805E - 05]k_g t}{(c_g + c_{pv})\mu_g \varphi L^2} \quad (5)$$

c_g – ściśliwość gazu [psi^{-1}]:

$$c_g = \frac{1}{P_m} \left(1 - \frac{d \ln[z]}{d \ln[P]} \right) \equiv \frac{f_z}{P_m} \quad (6)$$

gdzie:

V_p – objętość porowa próbki (PV) [cm^3],

V_1 – objętość komory początkowej [cm^3],

V_2 – objętość komory końcowej [cm^3],

k_g – przepuszczalność dla gazu [cm^3],

μ – lepkość gazu [cP],

φ – porowatość rdzenia [-],

L – długość rdzenia [cm],

t – czas od rozpoczęcia zaniku impulsu ciśnienia [s].

Jeżeli system zbudowany jest na sztywno, a objętości martwe przetworników w stosunku do V_1 i V_2 są niewielkie, to c_{V_1} i c_{V_2} są tak niskie, że można je pominąć. Prowadzenie pomiarów przy wysokich ciśnieniach – około 70 bar (1000 psi) pozwala na zredukowanie efektu przeslizgiwania się gazu (efektu Klinkenberga) oraz redukuje ściśliwość gazu i wielkość jej zmian w zakresie niewielkich zmian ciśnienia. Ściśliwość przestrzeni porowej jest zmienna wśród próbek o różnej litologii, jednak jej wpływ zostaje zminimalizowany poprzez zastosowanie ciśnienia uszczelnienia (P_c). Przy ciśnieniu około 70 bar (1000 psi) c_{pv} jest równe jednemu procentowi c_g [2].

Komory pomiarowe (początkowa i końcowa) powinny mieć jednakową objętość, gdyż znacząco upraszcza to procedurę analityczną. Równe objętości tworzą pożądane warunki symetrii w układzie. Konsekwencją symetrii jest to, że wszystkie pierwiastki parzystego stopnia z równania (2) znoszą się w równaniu (1). Pierwszy pierwiastek równania (3) θ_1 jest niewiele większy niż pierwiastek kwadratowy $(a+b)$ dla małych wartości a i b . Jeżeli f_1 zostanie zdefiniowane jako:

$$f_1 \equiv \frac{\theta_1^2}{a+b} \quad (7)$$

to przyjmie wartość równą jeden, gdy: $(a+b) = 0$, a jego wartość będzie stopniowo się obniżać, podczas gdy wartość $(a+b)$ będzie się zwiększać. Wyższe pierwiastki równania (2) są równe:

$$\theta_m = (m-1)\pi \quad \text{dla} \quad (a+b) = 0 \quad (8)$$

i zwiększają się stopniowo wraz ze wzrostem wartości $(a+b)$. Dzięki temu równanie (1) redukuje się do postaci:

$$\ln[\Delta P_D] = \ln[f_0] - \left[\frac{(6,805E - 05)k_g \theta_1^2}{(c_g + c_{pv})\mu_g \varphi L^2} \right] t \quad (9)$$

gdzie:

ΔP_D dla gazu – lewa strona równania (1):

$$\Delta P_D \equiv \frac{P_1(t)^2 - P_2(t)^2}{P_1(0)^2 - P_2(0)^2} = \frac{\Delta p(t) \left[P_2(t) + \frac{1}{2} \Delta P(t) \right]}{\Delta p(0) \left[P_2(0) + \frac{1}{2} \Delta P(0) \right]} \quad (10)$$

oraz:

$$f_0 = \frac{2[a(b^2 + \theta_1^2) + b\sqrt{(a^2 + \theta_1^2)(b^2 + \theta_1^2)}]}{\theta_1^2(\theta_1^2 + a + a^2 + b + b^2) + ab(a + b + ab)} \quad (11)$$

Jeżeli otrzymane eksperymentalnie wartości $\ln[\Delta P_D]$ zostaną wykreślone w funkcji czasu, utworzą prostą o punkcie przecięcia $\ln[f_0]$ i ujemnym nachyleniu, którego bezwzględna wartość będzie równa wyrażeniu z kwadratowego nawiasu w równaniu (9). Przyjmując, że c_{V_1} i c_{V_2} są zaniedbywalne względem c_g oraz biorąc pod uwagę definicje a i b (równania 3 i 4), bezwzględna wartość współczynnika nachylenia przyjmuje postać:

$$\left| \text{współczynnik nachylenia} \right| = \frac{(6,805E - 05)f_1 A k_g}{\mu_g c_g L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (12)$$

podstawienie do niego równania (6) daje:

$$\left| \text{współczynnik nachylenia} \right| = \frac{(6,805E - 05)f_1 A k_g P_m}{\mu_g L f_z} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad (13)$$

Punkt przecięcia oraz współczynnik nachylenia otrzymujemy w wyniku regresji liniowej części spadku ciśnienia:

$$\ln \left[\frac{\Delta P(t_n) P_m(t_n)}{\Delta P(0) P_m(0)} \right] = b_0 + m_1 t_n \quad (14)$$

Poprzez porównanie powyższego równania z równaniem (9) okazuje się, że f_0 można otrzymać, znając punkt przecięcia:

$$f_0 = \exp(b_0) \quad (15)$$

Ostatecznie przepuszczalność dla gazu (przepuszczalność gazową) wyznacza się ze wzoru:

$$k_g = \frac{-14696 m_1 \mu_g L f_z}{f_1 A \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right)} \quad (16)$$

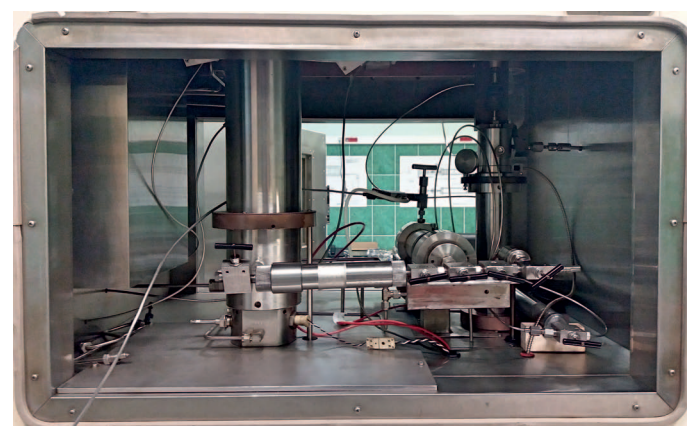
Opis stanowiska badawczego

Stanowisko do pomiarów mikroprzepuszczalności metodą zaniku impulsu ciśnienia (fotografia 1) zbudowano na podstawie elementów bezręciowego systemu PVT (2370-3000-G – Chandler Engineering) według schematu przedstawionego na rysunku 2.

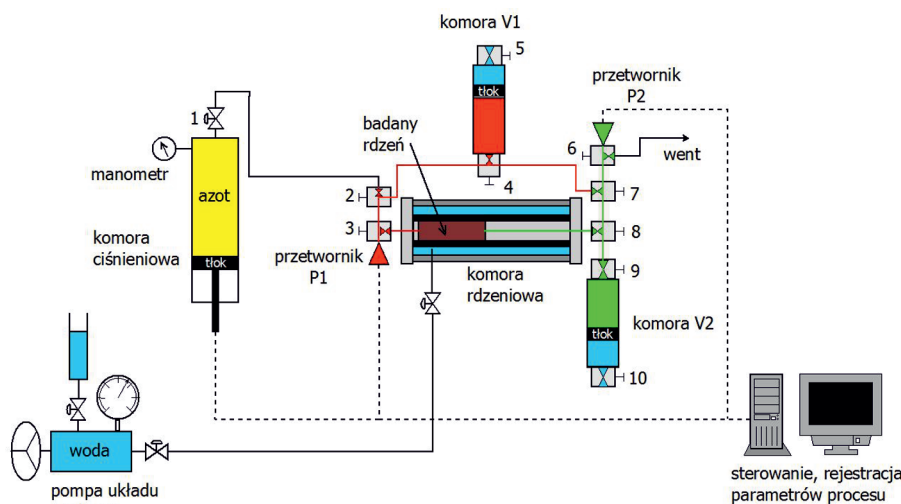
tość zaworów 2, 3 i 4. Układ komory początkowej zaznaczony jest na schemacie (rysunek 2) kolorem czerwonym. Analogicznie na objętość komory końcowej składa się objętość pojemnika ciśnieniowego, przewodów ciśnieniowych, komory przetwornika oraz objętość zaworów 6, 7, 8 i 9. Układ komory

końcowej na schemacie (rysunek 2) zaznaczono kolorem zielonym. W przypadku wykonywania pomiarów w skałach o niskiej przepuszczalności metodą zaniku impulsu ciśnienia bardzo istotne jest zachowanie doskonałej szczelności układu, gdyż nawet niewielkie nieszczelności mogą prowadzić do istotnych błędów pomiarowych. Cały układ został skonstruowany tak, by zapobiec ewentualnym nieszczelnościom. Objętość komory początkowej i końcowej określono na podstawie dokładnej kalibracji opartej na prawie Boyle'a z wykorzystaniem stalowego korka umieszczonego w rękawie komory rdzeniowej, rozdzielającego układ na dwie części. Szczelność układu weryfikowano poprzez wytworzenie wysokiego

ciśnienia (200 bar) z jednej strony układu, drugą zaś pozostawiając w ciśnieniu atmosferycznym (i na odwrót). Ewentualne nieszczelności, przy zachowaniu warunków izotermicznych, skutkowałyby zmianą ciśnienia w czasie. Uzyskanie jednakowej objętości obydwu komór (co z przyczyn zaprezentowanych przez Dickera [4] jest wielce pożądane) było możliwe dzięki zastosowaniu pojemników ciśnieniowych o regulowanej (za pomocą tłoka) objętości. Objętości komór ustalono na poziomie $7,7 \text{ cm}^3 (\pm 2\%)$. Sterowanie procesami i rejestracja parametrów odbywały się za pomocą stacji roboczej z odpowiednim oprogramowaniem.



Fot. 1. Stanowisko do pomiarów przepuszczalności metodą zaniku impulsu ciśnienia



Rys. 2. Schemat zestawu przystosowanego do pomiarów przepuszczalności metodą zaniku impulsu ciśnienia

Do sprężania gazu i zatłaczania go pod odpowiednim ciśnieniem do układu wykorzystano wysokociśnieniową komorę aparatu PVT. Istotną częścią stanowiska jest komora rdzeniowa, która została zaprojektowana do badań na rdzeniach o średnicy 1 cal (2,54 cm), w szerokim zakresie ciśnień (0÷600 bar). Ważny element komory rdzeniowej stanowi rękaw gumowy, w którym umieszcza się rdzenie. Zabezpieczenie szczelności pomiędzy rękawem gumowym a bocznymi ściankami rdzeni realizowane było przez układ wodny. Jego głównym elementem była wysokociśnieniowa pompa wodna, za pomocą której utrzymywano odpowiednio wysokie ciśnienie uszczelnienia. Pomiar ciśnienia realizowano z wykorzystaniem dwóch przetworników o dokładności 0,01 bar. Zamontowano je w odpowiednich miejscach po obu stronach układu, by móc śledzić zmiany ciśnienia pomiędzy komorą początkową i końcową.

Komory badawcze, znajdujące się przed wejściem do rdzenia (V1) i na wyjściu z rdzenia (V2), utworzono z odpowiednio zaprojektowanych zestawów pojemników, zaworów i przewodów ciśnieniowych. Na objętość komory początkowej składa się nie tylko objętość wykorzystanego pojemnika ciśnieniowego, ale również całkowita objętość wszystkich elementów układu od wejścia zaworu 2 (wraz z objętością zaworu) do wejścia zaworu 7 (bez objętości zaworu). To znaczy, że do objętości komory początkowej wlicza się również objętość przewodów ciśnieniowych, objętość komory przetwornika oraz obję-

Materiał i zakres badawczy

W badaniach wykorzystano próbki skalne (rdzenie) o średnicy 2,54 cm (1 cal) i długości w zakresie 3,22÷6,74 cm, odwiercone z rdzeni wiertniczych. Badania prowadzono w temperaturze pokojowej, a dla zminimalizowania błędów związanych z efektem Klinkenberga pomiary wykonywano przy stosunkowo wysokim ciśnieniu badawczym w zakresie 70÷150 bar. Ciśnienie uszczelnienia w zdecydowanej większości pomiarów było o około 60 bar większe od ciśnienia badawczego (dla zapewnienia szczelności między rękawem a rdzeniem), jednakże przeprowadzono również pojedyncze pomiary dla innych wartości ciśnienia uszczelnienia w celu określenia jego wpływu na przepuszczalność.

Do badań przepuszczalności wyselekcjonowano rdzenie, których przepuszczalność była na tyle niska, że niemożliwa do zmierzenia metodą stanu ustalonego z wykorzystaniem przepuszczalnościomierza typu DGP-100 (o zakresie badawczym 10÷0,1 mD). Przebadano 18 rdzeni skalnych (tablica 1) reprezentujących 3 typy litologiczne: dolomity dolomitu głównego (lp. 1÷10), środkowokambryjskie piaskowce kwarcowe (lp. 11÷15) oraz piaskowce czerwonego spągowca (lp. 16÷18).

Wykonano 50 pomiarów, które miały na celu sprawdzenie poprawności działania zbudowanego zestawu i wybranej metody analitycznej, zbadanie przepuszczalności rdzeni oraz wpływu ciśnienia badania i ciśnienia uszczelnienia na wartość współczynnika przepuszczalności. Czas trwania pomiaru wynosił od kilkunastu sekund do kilku godzin (w zależności od przepuszczalności).

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem azotu, którego lepkość w danych warunkach termobarycznych pomiaru

wyznaczono za pomocą symulatora PVT_{sim} . Wartości współczynników f_z , f_0 i f_1 , niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń, określono na podstawie tabel przedstawionych w opracowaniu Jonesa [7].

Tablica 1. Charakterystyka użytych rdzeni i wykonanych pomiarów

Lp.	Symbol rdzenia	Długość [mm]	Liczba wykonanych pomiarów		
			70 [bar]	100 [bar]	150 [bar]
1.	E88	37,5	–	–	1
2.	E10	54,0	–	2	1
3.	E12	47,9	–	–	1
4.	E16	40,1	1	1	–
5.	F6	32,2	1	1	–
6.	F2	42,8	1	1	1
7.	E17	51,1	1	1	3
8.	F3	37,6	1	1	1
9.	F1	53,1	–	1	2
10.	E87	65,9	–	–	1
11.	V7-2	65,9	–	1	1
12.	V8-1	65,9	–	1	1
13.	V8-2	67,4	–	1	1
14.	V9-1	63,4	–	1	1
15.	V6-4	51,2	–	1	1
16.	CS1	51,3	–	3	–
17.	CS2	51,6	–	3	3
18.	CS3	52,4	3	3	1

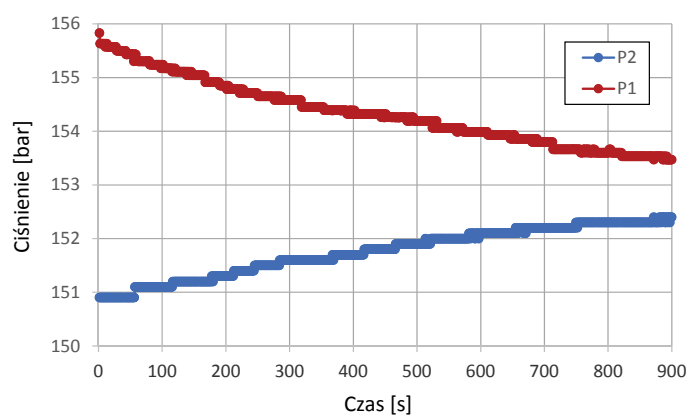
Procedura badawcza

1. Próbkę skalną w postaci rdzenia o średnicy 1 cala (2,54 cm) umieszczono w rękawie gumowym, który następnie wprowadzono do komory rdzeniowej. Komora pozwala na badanie rdzeni do długości około 25 cm.
2. Do układu, przy połączonych wszystkich komorach (otwarte zawory: 3, 7 i 8), zatłoczono azot do uzyskania odpowiedniego ciśnienia badawczego (porowego). W trakcie wypełniania się przestrzeni porowej rdzenia gazem kontrolowano ciśnienie w układzie, dążąc do jego stabilizacji. Czas stabilizacji ciśnienia zależy od przepuszczalności rdzenia i dla próbek o większej przepuszczalności wynosi kilka minut, a w przypadku skał o bardzo niskiej przepuszczalności znacznie się wydłuża.
3. Po ustabilizowaniu ciśnienia odcięto od siebie komorę po-

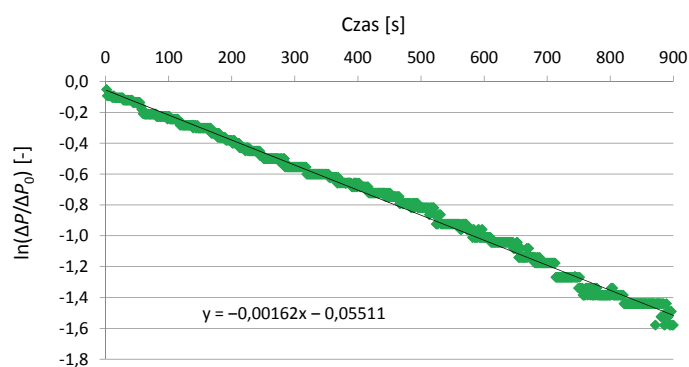
- czątkową i końcową, zamykając zawór 7. Przy zakręconym zaworze 3 podniesiono ciśnienie w komorze początkowej o około 3% wartości ciśnienia w komorze końcowej.
4. Otwierając zawór 3, wywołano impuls ciśnienia przechodzący z komory początkowej, przez rdzeń znajdujący się w komorze rdzeniowej, do komory końcowej. Zmiany ciśnienia związane z przepływem gazu z jednej komory do drugiej przez ośrodek porowaty rejestrowano z wykorzystaniem przetworników umieszczonych po obu stronach układu (rysunek 2).
5. Na podstawie otrzymanych danych spadku ciśnienia w czasie przeprowadzono obliczenia, w odpowiednio przygotowanym arkuszu programu Excel, z wykorzystaniem metody analitycznej opisanej powyżej.

Wyniki i ich omówienie

Prawidłowość wykonania stanowiska i wyboru zastosowanej metody analitycznej potwierdzają wyniki przeprowadzonych pomiarów, które umożliwiły określenie współczynnika przepuszczalności dla gazu w zakresie $0,10 \div 122,12 \mu\text{D}$. Przebadane rdenie, niezależnie od litologii, cechowały się dużą zmiennością wartości współczynnika przepuszczalności. Zestawienie parametrów wszystkich wykonanych pomiarów wraz z uzyskanymi wartościami współczynnika przepuszczalności zaprezentowano w tabelicy 2. Przykładowy wykres obrazujący zmianę ciśnienia w komorach w czasie pomiaru przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykład przebiegu zmian ciśnienia w czasie dla rdzenia V8-2 ($P_m = 153,5$ bar, $P_c = 210$ bar)



Rys. 5. Przykład regresji liniowej zmian ciśnienia – $\ln(\Delta P/\Delta P_0)$ w czasie dla rdzenia V8-2 ($P_m = 153,2$ bar, $P_c = 210$ bar)

Obliczenia przepuszczalności w głównej mierze opierały się na wartościach nachylenia i punktu przecięcia krzywej uzyskanych na podstawie regresji liniowej $\ln(\Delta P/\Delta P_0)$, której przykład zaprezentowano na rysunku 5. Wartości pomiarów wykonanych przy tym samym ciśnieniu różnią się od siebie w zakresie $0 \div 6\%$ (średnio $1,8\%$), co świadczy o bardzo dobrej powtarzalności (precyzji pomiarów). Niekorzystny (aczkolwiek niewielki) wpływ zarówno na precyzję, jak i dokładność pomiarów ma obserwowany tzw. efekt pływania prze-

tworników, czyli niewielkie, oscylacyjne zmiany w odczycie. Zapewne problem ten można byłoby wyeliminować poprzez zastosowanie bardziej czułego przetwornika różnicowego.

O dokładności pomiaru mówimy, gdy porównujemy wartość uzyskaną w pomiarach z wartością rzeczywistą. W przypadku badań przepuszczalności trudno ocenić ich dokładność, co wynika z kilku powodów.

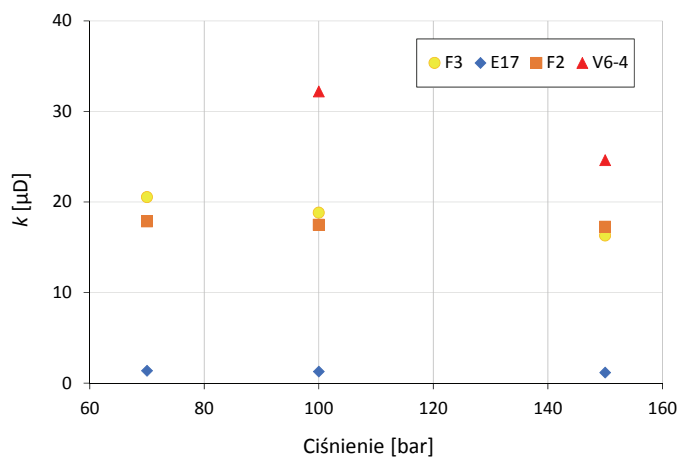
Żadna z instytucji normalizacyjnych nie oferuje syntetycznej próbki o znanej, dokładnej przepuszczalności, która mogłaby służyć za certyfikowany standard do kalibracji pomiarów. Wynika to z faktu, że nie ma obecnie możliwości wyprodukowania syntetycznej próbki z określoną z góry, dokładnie znaną przepuszczalnością. Różnice w wynikach pomiarów przepuszczalności realizowanych w różnych laboratoriach mogą sięgać nawet dwóch – trzech rzędów wielkości, co wynika z rozbieżności w warunkach pomiarów, procedurach, postępowaniu z próbkami i w interpretacji wyników [1, 12]. Szczególnie istotne dla pomiarów mikroprzepuszczalności jest wyeliminowanie nawet najmniejszych nieregularności, takich jak: mikronieszczelności w układzie, wahania temperatury otoczenia czy niedostateczny czas stabilizacji ciśnienia, gdyż mogą one mieć znaczący wpływ na mierzoną wartość (tym większy, im mniejsza przepuszczalność).

Na podstawie pomiarów wykonanych przy jednakowym nadadku ciśnienia uszczelnienia, ale różnych wartościach ciśnienia badawczego (porowego) należy stwierdzić, że wartość współczynnika przepuszczalności zmniejsza się wraz ze zwiększaniem ciśnienia, przy jakim prowadzone jest badanie. Zmiany te mają charakter nieregularny i w zależności od rdzenia przyjmują wartości od pomijalnych, np. w przypadku rdzenia V7-2 (podniesienie ciśnienia o 50 bar spowodowało spadek przepuszczalności o 2%), do znaczących, np. w przypadku rdzenia CS3 (podniesienie ciśnienia o 30 bar spowodowało spadek przepuszczalności o 113%). Średnio wśród wszystkich pomiarów spadek wartości współczynnika przepuszczalności w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia wyniósł 5%. Zmiany współczynnika przepuszczalności względem zastosowanego ciśnienia porowego (badawczego) dla wybranych rdzeni przedstawiono na rysunku 6.

Istotną rolę w pomiarach przepuszczalności odgrywa ciśnienie uszczelnienia. Zazwyczaj wrażliwość współczynnika przepuszczalności na zmiany ciśnienia uszczelnienia (które jest odpowiednikiem ciśnienia nadkładu w warunkach rzeczywistych) jest zdecydowanie większa niż na zmiany ciśnienia badawczego (porowego), choć znane są w literaturze odmiennie przypadki [15]. Podwyższenie ciśnienia uszczelnienia prowadzi do obniżenia wartości współczynnika przepuszczalności. Obserwowany spadek przepuszczalności (przy podniesieniu

Tablica 2. Zestawienie parametrów wykonanych pomiarów wraz z wyliczoną przepuszczalnością

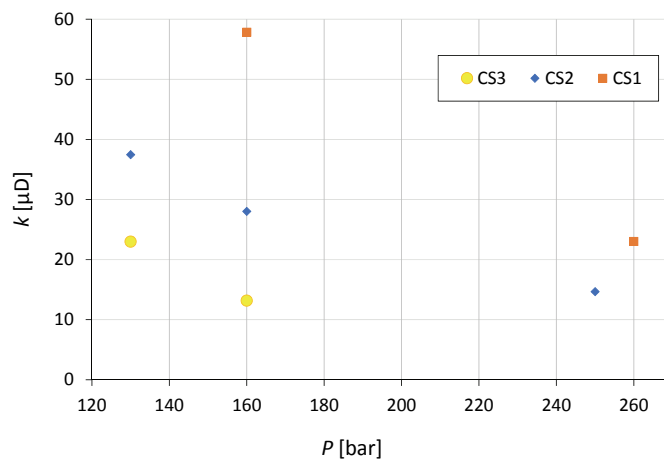
Lp.	Symbol rdzenia	P_m	P_c	b	m	f_0	f_i	f_z	T	μ	k
		[bar]	[bar]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[cP]	[μ D]
1.	E68	154,0	210	-0,03783	-0,01584	0,96288	0,96314	0,92031	25,8	0,0222	6,22
2.	F2	154,0	210	-0,08217	-0,01532	0,92112	0,92272	0,92074	25,9	0,0222	9,12
3.		103,0	160	-0,09495	-0,01004	0,90942	0,91140	0,96871	25,5	0,0205	9,48
4.		103,0	160	-0,09067	-0,00989	0,91332	0,91517	0,96896	25,5	0,0205	9,33
5.	E12	154,0	210	-0,00771	0,04705	0,99232	0,99163	0,92022	25,9	0,0222	26,92
6.	E16	103,0	160	-0,00030	-0,00521	0,99970	0,99163	0,99877	25,3	0,0204	30,80
7.		72,0	130	-0,17414	-0,00372	0,84018	0,84439	0,98958	25,3	0,0196	36,14
8.	F6	103,0	160	0,06149	-0,20692	1,06342	1,06044	0,96926	25,4	0,0204	92,91
9.		72,0	130	-0,17538	-0,15572	0,83914	0,84338	0,98964	25,3	0,0196	122,12
10.	F2	153,8	210	0,17141	-0,04699	1,18698	1,18002	0,92066	25,4	0,0222	17,25
11.		102,8	160	-0,14136	-0,02420	0,86818	0,87149	0,96910	25,4	0,0204	17,49
12.		72,0	130	-0,14975	-0,01753	0,86092	0,86447	0,98972	25,3	0,0196	17,87
13.	E17	153,8	210	-0,21244	-0,00187	0,80861	0,81384	0,92087	25,4	0,0222	1,19
14.		153,8	210	-0,03054	-0,00223	0,96992	0,96995	0,92059	25,7	0,0222	1,19
15.		154,0	210	-0,12828	-0,00192	0,87961	0,88255	0,92034	26,0	0,0222	1,13
16.		101,8	160	-0,08599	-0,00154	0,91760	0,91932	0,96986	25,1	0,0204	1,27
17.		72,4	130	-0,21778	-0,00106	0,80431	0,80967	0,98955	25,5	0,0196	1,36
18.		153,8	210	-0,04785	-0,04060	0,95328	0,95384	0,92142	25,4	0,0222	16,29
19.	F3	102,8	160	-0,18293	-0,02836	0,83283	0,83728	0,96905	25,7	0,0205	18,83
20.		72,3	130	-0,20105	-0,02188	0,81787	0,82280	0,98963	26,0	0,0196	20,53
21.	F1	153,1	210	-0,02014	-0,02293	0,98006	0,97977	0,92137	26,1	0,0222	12,60
22.		153,1	210	0,01681	-0,02405	1,01695	1,01547	0,92133	26,1	0,0222	12,75
23.		103,3	160	-0,15363	-0,01606	0,85759	0,86124	0,96865	25,8	0,0205	14,48
24.	E87	153,7	210	-0,07159	-0,00018	0,86548	0,86888	0,92075	25,5	0,0222	0,10
25.	V7-2	153,2	210	0,00674	-0,15248	1,00676	1,00560	0,92123	26,7	0,0222	101,65
26.		102,7	160	0,00645	-0,10758	1,00647	1,00532	0,96903	26,7	0,0205	103,82
27.	V8-1	153,2	210	-0,04039	-0,00594	0,96041	0,96075	0,92121	26,6	0,0222	4,14
28.		102,9	160	-0,08696	-0,00422	0,91671	0,91846	0,96899	26,6	0,0205	4,82
29.	V8-2	153,5	210	-0,05511	-0,00162	0,94638	0,94717	0,92094	26,3	0,0222	1,12
30.		102,7	160	-0,04839	-0,00136	0,95276	0,95335	0,96914	26,6	0,0205	1,37
31.	V9-1	153,2	210	-0,01125	-0,08105	0,98881	0,98824	0,92122	26,9	0,0222	52,90
32.		102,9	160	-0,16499	-0,06042	0,84790	0,85187	0,96914	26,6	0,0205	66,19
33.	V6-4	153,5	210	-0,05233	-0,03536	0,94902	0,94972	0,92146	26,3	0,0222	24,62
34.		102,9	160	-0,10784	-0,03036	0,89777	0,90013	0,96901	26,3	0,0205	32,22
35.	CS1	102,8	160	-0,04882	-0,07335	0,95235	0,95295	0,96911	25,2	0,0204	57,84
36.		102,8	260	-0,11259	-0,02820	0,89352	0,89601	0,96908	25,2	0,0204	23,64
37.		102,9	260	-0,12137	0,02651	0,88571	0,88845	0,96902	25,3	0,0204	22,40
38.	CS2	153,8	210	-0,13148	-0,03909	0,87680	0,87983	0,92066	25,5	0,0222	23,38
39.		153,6	210	-0,14815	-0,04059	0,86230	0,86580	0,92082	25,5	0,0222	24,70
40.		153,8	250	-0,14148	-0,02685	0,86808	0,87139	0,92059	25,5	0,0222	16,21
41.		102,8	130	-0,18807	-0,04089	0,82856	0,83314	0,96905	25,4	0,0204	37,45
42.		102,9	160	-0,11721	-0,03277	0,88940	0,89202	0,96902	25,5	0,0204	28,02
43.		102,8	250	-0,08042	-0,01775	0,92273	0,92428	0,96907	25,5	0,0204	14,66
44.		153,5	210	-0,19059	-0,02050	0,82647	0,83113	0,92089	25,1	0,0222	12,95
45.	CS3	102,8	160	-0,13759	-0,01504	0,87146	0,87466	0,96910	24,2	0,0204	13,16
46.		102,8	160	-0,11363	-0,01542	0,89259	0,89511	0,96907	24,7	0,0204	13,18
47.		102,8	130	-0,08440	-0,02765	0,91906	0,92073	0,96907	25,0	0,0204	22,98
48.		72,5	130	-0,12498	-0,02314	0,88251	0,88536	0,98952	25,3	0,0196	28,13
49.		72,4	130	-0,06028	-0,02449	0,94150	0,94245	0,98958	25,3	0,0196	28,01
50.		72,5	130	-0,17905	-0,02176	0,83606	0,84041	0,98949	25,3	0,0196	27,84



Rys. 6. Zmiany współczynnika przepuszczalności względem ciśnienia badawczego dla wybranych rdzeni

ciśnienia uszczelnienia o kilkadziesiąt barów) różni się znacznie w zależności od rodzaju badanej skały i wynosi od kilku procent w przypadku silnie scementowanych skał o wysokiej przepuszczalności do nawet kilku rzędów wielkości w przypadku skał o niskiej przepuszczalności zawierających mikrosz-

czeliny [2]. Wśród wykonanych pomiarów spadek współczynnika przepuszczalności w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia uszczelnienia zawierał się w zakresie 10÷25%, a średnio wynosił 15%. Wpływ ciśnienia uszczelnienia na przepuszczalność zobrazowano na rysunku 7.



Rys. 7. Wpływ ciśnienia uszczelnienia na współczynnik przepuszczalności (przy ciśnieniu badawczym 100 bar)

Wnioski

- Zbudowane stanowisko wraz z przygotowaną procedurą badawczą pozwala na pomiary mikroprzepuszczalności (w zakresie $0,1 \pm 0,01 \mu\text{D}$) w rdzeniach wiertniczych z wykorzystaniem gazu inertnego (np. azotu) oparte na zjawisku zanikania impulsu ciśnienia (ang. *pressure pulse decay*). Stanowisko charakteryzuje się możliwością prowadzenia pomiarów w szerokim zakresie ciśnień (1÷600 bar).
- Prawidłowość wykonania stanowiska i wybór zastosowanej procedury pomiarowej są potwierdzone bardzo dobrą powtarzalnością wyników (średnio różniły się od siebie o 1,5%). Zastosowanie przetwornika różnicowego do pomiaru różnicy ciśnień między komorami najprawdopodobniej dodatkowo zwiększyłoby dokładność i precyzję pomiarów.
- Analizując pomiary wykonane przy różnych ciśnieniach badawczych (porowych), należy stwierdzić, że istnieje generalna tendencja spadku wartości współczynnika przepuszczalności wraz ze wzrostem ciśnienia badawczego. Wrażliwość współczynnika przepuszczalności na zmiany ciśnienia badawczego (porowego) jest zmienna wśród przebadanych rdzeni. Spadek wartości współczynnika przepuszczalności w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia wynosił 0,4÷38%, średnio około 5%.
- Wartość nadkładu ciśnienia uszczelnienia w większości pomiarów wynosiła 60 bar, przy czym w kilku pomiarach zastosowano inne wartości w celu określenia jego wpływu na przepuszczalność. Wpływ ciśnienia uszczelnienia (które jest odpowiednikiem ciśnienia nadkładu w rzeczywistym złożu) na współczynnik przepuszczalności jest bardziej wyraźny niż wpływ ciśnienia badawczego (porowego). Spadek przepuszczalności związany ze wzrostem ciśnienia uszczelnienia zawierał się w zakresie 10÷25%, średnio 15% (w przeliczeniu na 10 bar wzrostu ciśnienia uszczelnienia).
- W związku z istotnymi różnicami w przepuszczalności, zależnymi od warunków ciśnieniowych pomiaru, dla uzyskania wyników najbliższych rzeczywistym należy prowadzić pomiary mikroprzepuszczalności przy ciśnieniach (badawczych i uszczelnienia) odpowiadających ciśnieniom (porowym i nadkładu) panującym w złożu.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2018, nr 5, s. 356–364, DOI: 10.18668/NG.2018.05.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 4.12.2017 r. Zatwierdzono do druku 20.03.2018 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie procedury określania parametrów przepływu w skałach o niskiej przepuszczalności* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0046/KB, nr archiwalny: DK-4100-32/15.

Literatura

- [1] Ahmed U., Meehan D.N.: *Unconventional Oil and Gas Resources: Exploitation and Development*. CRC Press 2016.
- [2] American Petroleum Institute (API): *Recommended practices for core analysis*. Recommended practice 40, 1998.
- [3] Brace W.F., Walsh J.B., Frangos W.T.: *Permeability of granite under high pressure*. Journal of Geophysical Research 1968, vol. 73, nr 6, s. 2225–2236.
- [4] Dicker A.I., Smits R.M.: *A Practical Approach for Determining Permeability From Laboratory Pressure-Pulse Decay Measurements*. SPE International Meeting on Petroleum Engineering, Tianjin, China 1–4.11.1988, s. 285–292.
- [5] Haskett S.E., Narahara G.M., Holditch S.A.: *A Method for Simultaneous Determination of Permeability and Porosity in Low-Permeability Cores*. SPE Formation Evaluation 1988, vol. 3, nr 3, s. 651–658.
- [6] Hsieh P.A., Tracy J.V., Neuzil C.E., Bredehoeft J.D., Silliman S.E.: *A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of “tight” rocks – I. Theory*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1981, vol. 18, nr 3, s. 245–252.
- [7] Jones S.C.: *A Technique for Faster Pulse-Decay Permeability Measurements in Tight Rocks*. SPE Formation Evaluation 1997, vol. 12, nr 1, s. 19–26.
- [8] Neuzil C.E., Cooley C., Silliman S.E., Bredehoeft J.D., Hsieh P.A.: *A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of “tight” rocks – II. Application*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1981, vol. 18, nr 3, s. 253–258.
- [9] Peach C.J., Spiers C.: *Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock*. Tectonophysics 1996, vol. 256, nr 1–4, s. 101–128.
- [10] Such P.: *Przepływy gazu przez nanopory – próba oceny*. Nafta-Gaz 2014, nr 10, s. 671–675.
- [11] Such P., Dudek L., Mroczkowska-Szerszeń M., Cicha-Szot R.: *The influence of reservoir conditions on filtration parameters of shale rocks*. Nafta-Gaz 2015, nr 11, s. 827–832, DOI: 10.18668/NG2015.11.03.
- [12] Sutherland H.J., Cave S.P.: *Argon gas permeability of New Mexico rock salt under hydrostatic compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1980, vol. 17, nr 5, s. 281–288.
- [13] Yang D., Wang W., Chen W., Wang S., Wang X.: *Experimental investigation on the coupled effect of effective stress and gas slippage on the permeability of shale*. Scientific Reports 2017, vol. 7, s. 1–9.
- [14] Zendejboudi S., Bahadori A.: *Shale oil and gas handbook: theory, technologies, and challenges*. First edition. Gulf Professional Publishing 2016.
- [15] Zoback M.D., Byerlee J.D.: *Permeability and Effective Stress*. AAPG Bulletin 1975, vol. 59, nr 1, s. 154–158.



Mgr inż. Mirosław WOJNICKI
Asystent w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: miroslaw.wojnicky@inig.pl



Stanisław BIAŁY
Starszy specjalista techniczny w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: stanislaw.bialy@inig.pl



Mgr inż. Jerzy KUŚNIERCZYK
Specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: jerzy.kusnierczyk@inig.pl



Mgr inż. Sławomir SZUFLITA
Asystent w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: slawomir.szufлита@inig.pl



Dr inż. Marcin WARNECKI
Kierownik Zakładu Badania Złóż Ropy i Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.warnecki@inig.pl