

Nieliniowa filtracja gazu przez próbki dolomitu

MIROSLAW WIERZBICKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów przepuszczalności gazowej rdzeni dolomitów pochodzących z jednej z kopalń rud miedzi. Rdzenie pobrano w różnych odległościach od stropu wyrobiska. Charakteryzują się one niską przepuszczalnością oraz charakterystyczną dla ośrodków mikroporowatych nieliniowością filtracji przejawiającą się wzrostem przepuszczalności przy niskich ciśnieniach średnich. Wyniki pomiarów opisano równaniem Klinkenberga uwzględniającym efekt poślizgu.

Słowa kluczowe: dolomit, przepuszczalność skał, zagrożenie gazowe w kopalniach

1. Wstęp

Przepuszczalność ośrodka porowatego jest określana często jako zdolność materiału do transportu płynów. Wiedza o przepuszczalności jest istotna dla szeregu prac inżynierskich związanych z wydobyciem węglowodorów, składowaniem i magazynowaniem substancji w skałach zbiornikowych, sekwestracją i składowaniem CO₂, czy też zapewnieniem bezpieczeństwa eksploatacji kopalni, którym towarzyszy występowanie gazów niosących zagrożenie zjawiskami gazo geodynamicznymi, wybuchowe bądź zagrożenia o charakterze toksycznym.

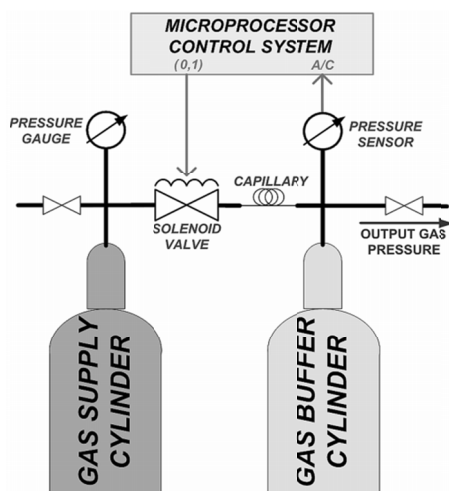
2. Aparatura pomiarowa

Aparatura pomiarowa niezbędna do wyznaczenia przepuszczalności składała się z następujących bloków funkcyjnych:

- źródła gazu,
- próbki badanego materiału,
- przepływomierza gazowego.

Źródło gazu, powinno utrzymywać stały poziom ciśnienia niezależnie od zmieniającego się wydatku. Zastosowanie typowego reduktora przyłączonego do butli z gazem nie gwarantuje wystarczającej precyzji stabilizacji ciśnienia gazu. Typowe komercyjne produkty, które mogłyby spełniać stawiane im wymagania to tzw. zawory proporcjonalne. W ramach niniejszej pracy wykorzystano manostat zaprojektowany i wykonany w Instytucie Mechaniki Górotworu. Przyrząd ten opisany został szerzej w pracy [Kudasik et al., 2010]. Manostat składa się z dwóch zbiorników połączonych ze sobą przy pomocy elementu tłumiącego przepływ (np. kapilara) oraz elektrozaworu (Rys. 1). Pierwszy zbiornik to źródło gazu, natomiast drugi pełni funkcję bufora. System mikroprocesorowy (bądź elektroniczny komparator analogowy) analizuje odczyty z manometru zbiornika buforowego. Gdy wartość ciśnienia spadnie poniżej wartości nastawionej system wysyła impuls elektryczny otwierający na krótką chwilę elektrozawór. Przez tłumik pneumatyczny przepływa porcja gazu, która dociera do zbiornika buforowego. Dzięki zbiornikowi buforowemu o znacznej objętości nie obserwujemy dużych skoków ciśnienia na wyjściu układu. Parametry systemu takie jak maksymalny wydatek oraz stabilność ciśnienia wyjściowego determinowane są przede wszystkim tłumieniem przepływu przez element tłumiący oraz objętość zbiornika buforowego. Zastosowanie odcinka kapilary stalowej

o długości około 30 cm i średnicy wewnętrznej około 0.25 mm oraz zbiornika buforowego o objętości 5 dm³ pozwoliło na uzyskanie ciśnienia wyjściowego p ze stabilizacją na poziomie ± 0.0005 bar, przy wydatkach niższych od 0.2 dm³/min.



Rys. 1. Schemat manostatu

Przepływomierz gazowy to jeden z najważniejszych elementów systemu pomiarowego wykorzystanego do określania parametrów przepuszczalności ośrodka porowatego. Największym problemem okazała się bardzo duża zmienność przepuszczalności badanych próbek skalnych, sięgająca kilku rzędów wielkości. Oznacza to, iż przy stałym gradiencie ciśnienia wydatek gazu może zmieniać się w zakresie kilku rzędów wielkości.

W systemie pomiarowym wykorzystano przepływomierz oparty na zjawisku barbotażu (perlenia się gazu przez warstwę cieczy). Zgodnie z teorią hydrodynamiki barbotażu, w przepływie pojedynczych pęcherzyków średnica pęcherzyka daje się opisać formułą:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6D\sigma}{(\gamma_c - \gamma_g)g}} \quad (1)$$

gdzie:

- d – średnica pęcherzyków, m,
- D – średnica dyszy wylotowej, m,
- σ – napięcie powierzchniowe, N/m,
- γ_c – gęstość cieczy, kg/m³,
- γ_g – gęstość gazu, kg/m³,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s².

Cieczą była woda destylowana, natomiast mierzonym gazem był azot. Dysza wylotowa miała średnicę około 0.5 mm. Średnica pojedynczego pęcherzyka wyliczona z równania teoretycznego wynosiła około 2.80 mm, natomiast ustalona na drodze kalibracji 2.81 mm. Gaz pod stałym ciśnieniem, niezależnym od wydatku podawany był na próbkę badanej skały o znanej geometrii. Po przejściu przez próbkę mierzony był wydatek gazu za pomocą przepływomierza barbotażowego. Wszystkie elementy znajdują w warunkach izotermicznych. Temperatura pomiaru wynosiła 23°C.

3. Filtracja przez ośrodki porowate

Najczęściej rozważania dotyczące przepływu płynów przez ośrodki porowate oparte są na liniowym prawie filtracji Darcy'ego [Darcy, 1856]. Jest to fenomenologiczny wzór stanowiący podstawową zależność wykorzystywaną w hydrogeologii wykorzystywaną m. in. do opisu przepływu wody, ropy oraz gazów przez skały.

W przypadku gazów, w oparciu o prawo Darcy'ego, przepuszczalność można wyznaczyć korzystając ze wzoru (2) [Standard Test, 2001]:

$$k = \frac{2Q \cdot \mu \cdot L \cdot p_2}{S(p_1^2 - p_2^2)} \quad (2)$$

gdzie:

- k – przepuszczalność, m^2 ($= 10^{12}$ Darcy),
- Q – wydatek, m^3/s ,
- p_1 – ciśnienie wejściowe, Pa,
- p_2 – ciśnienie wyjściowe przepływu, Pa,
- L – długość próbki, m,
- S – pole przekroju poprzecznego próbki, m^2 ,
- μ – lepkość dynamiczna gazu, $Pa \cdot s$.

4. Pomiary przepuszczalności

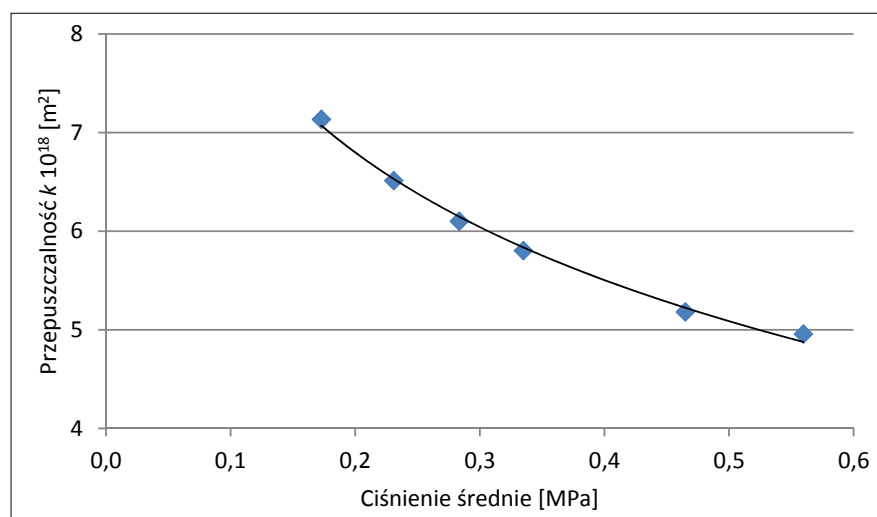
Pomiary przepuszczalności dolomitu przeprowadzone zostały na 28 próbkach rdzeni pobranych z jednej z kopalń Kombinatoru Górniczo-Hutniczego Miedzi. Wszystkie pomiary przepuszczalności skał prowadzono przy użyciu azotu. Ciśnienie końcowe filtracji równe było ciśnieniu atmosferycznemu ($p_2 = p_{bar}$).

W tabelicy 1 zestawiono informacje dotyczące pomiaru przeprowadzonego na przykładowej próbce dolomitu (próbka nr 1). W tabelicy zestawiono wartości ciśnień końcowych p_2 , wydatków filtracji Q , wartości ciśnień średnich, oraz obliczoną wartość przepuszczalności k dla każdej z par ciśnień. Probka posiadała długość 0.0146 m a jej powierzchnia przekroju wynosiła 0.001479 m^2 . Przyjęto lepkość azotu w temperaturze pomiaru: $\mu = 0.0000175 Pa \cdot s$.

Tab. 1. Wyniki pomiarów przepuszczalności uzyskane dla próbki nr 1

p_2 [MPa]	Q [cm^3/min]	P_{sr} [MPa]	k [m^2]
0,246	0,624	0.173	7.13E-18
0,362	1,368	0.231	6.51E-18
0,467	2,204	0.283	6.10E-18
0,570	3,172	0.335	5.80E-18
0,830	6,106	0.465	5.18E-18
1,019	8,860	0.560	4.96E-18

Analizując wyniki pomiarów przeprowadzonych na przedstawionej próbce zauważyć można spadek wartości przepuszczalności wraz ze wzrostem ciśnienia średniego filtracji. Zależność tą pokazano na Rys. 2.



Rys. 3. Przykładowa zależność pomiędzy przepuszczalnością dolomitu (próbka nr 1), a ciśnieniem średnim filtracji

Wartość średnia przepuszczalności w badanym zakresie ciśnień wynosiła $k_{sr} = 5.95 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. Wzrost przepuszczalności wraz ze spadkiem ciśnienia średniego występuje dla każdej z próbek.

Przedstawione przykładowe wyniki pomiarów pokazuje, że w przypadku filtracji azotu przez dolomit mamy do czynienia z nieliniowym prawem filtracji. Przepuszczalność w rozumieniu równania Darcy'ego nie jest, więc parametrem wystarczającym do opisu przebiegu zjawiska przy zastosowaniu różnych ciśnień średnich filtracji.

Przyjmuje się, że liniowe prawo Darcy'ego może być stosowane do przepływów laminarnych. Ze względu na skomplikowaną strukturę kanałów ośrodków porowatych oraz zmienną w czasie i przestrzeni kinetykę zjawiska podział przepływów na laminarne i turbulenty jest zadaniem bardzo trudnym. Scheidegger [1957] twierdzi, że prawo Darcy'ego może być stosowane w pewnych określonych przedziałach prędkości („seepage velocity domain”) scharakteryzowanych liczbą Reynoldsa:

$$\text{Re} = \frac{v\varepsilon\delta}{\mu} \quad (2)$$

gdzie:

- v – skalarna wartość prędkości, m/s,
- ε – porowatość, -
- δ – wielkość związana z ośrodkiem porowatym, Pa/m,
- μ – lepkość dynamiczna, Pa·s.

Bear [1972] podaje dla określenia liczby Reynoldsa dla ośrodków porowatych wzór:

$$\text{Re} = \frac{vd}{\mu} \quad (3)$$

gdzie:

- v – skalarna wartość prędkości, m/s,
- d – wielkość związana ze szkieletem, Pa/m.

Wielkości δ i d z równań (2) i (3) nie są ściśle zdefiniowane przez autorów. Mogą być określane jako np. średnica ziaren lub porów w ośrodku porowatym. Collins (1961) zaproponował określanie wartości d jako:

$$d = \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)^{0.5} \quad (4)$$

Aby wyznaczyć liczbę Reinoldsa dla określenia górnego zakresu stosowalności prawa Darcy'ego musimy znać przepuszczalność ośrodka wyznaczoną w oparciu o to prawo. Rozważania te tracą na znaczeniu po analizie prac Dyrgi [1986] i Skawińskiego [1992]. Prezentują one wyniki badań pola prędkości podczas przepływów w ośrodkach porowatych i ich modelach. Prace te wskazują, że założenie niezmiennych linii prądu w przepływach przez ośrodki porowate prowadzi do niezgodności z rzeczywistością. Inny autor [Kulczycki, 1955] twierdzi nawet, że nie każda struga laminarna poddaje się liniowemu prawu filtracji.

Należy również odpowiedzieć na pytanie czy gaz filtrujący w przestrzeni porowej brykietu, możemy zawsze traktować jako ośrodek ciągły. Istnieje ograniczenie dotyczące najmniejszej porcji płynu, dla której obowiązują jeszcze ogólne prawa makro mechaniki. Rozmiary porcji muszą być dostatecznie duże w stosunku do długości drogi swobodnej cząstek płynu, wynikającej z ich chaotycznego ruchu. Musi również występować wystarczająco duża liczba cząstek, uprawniająca do uśredniania statystycznego, leżącego u podstaw założenia ciągłości płynu. Najmniejsza objętość płynu, podlegająca prawom mechaniki płynów jako ośrodków ciągłych, nazywa się elementem płynu. W przypadkach, gdy rozmiary kanałów w których następuje filtracja gazu są porównywalne do długości dróg swobodnych molekuł gazu, metody mechaniki ośrodków ciągłych mogą więc zawodzić. Granicę stosowalności mechaniki ośrodków ciągłych wyznaczyć można obliczając liczbę Knudsen (K_n) [Bear, 1972]:

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad (5)$$

gdzie:

- λ – średnia droga swobodna molekuł gazu, tj. droga pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami molekuł, m,
- L – rozmiar liniowy zbiornika gazu lub obiektu opływającego gazem, m.

Przyjmuje się, że gaz można traktować jako ośrodek ciągły wówczas, gdy: $K_n < 0.01$. Jeżeli $K_n > 0.01$, wówczas należy uwzględnić oddziaływania cząsteczek gazu ze ściankami.

W przypadku badanych skał mamy prawdopodobnie do czynienia z przedstawionym efektem. Długość drogi swobodnej molekuł azotu przy ciśnieniu 0.2 MPa wynosi około $2 \cdot 10^{-7}$ m. Metody i narzędzia dotyczące mechaniki ośrodków ciągłych mogą zawodzić podczas opisu filtracji gazu zachodzącej przy niskich ciśnieniach średnich w ośrodkach mikroporowatych. W tych warunkach występować może nieliniowość przepływu związana ze zjawiskami i stanami na granicy faz i w warstwach dyfuzyjnych. Opory przepływu związane są z lepkością, gęstością i innymi własnościami gazu. Własności te w warstwach przyściennych nie są stałe. Opory przepływu zależą więc mogą od tego jaki jest udział warstwy dyfuzyjnej w przepływie.

Zależność współczynnika filtracji, wyznaczonego z liniowego prawa Darcy'ego, od ciśnienia średniego filtracji oraz ograniczenia w stosowności tego prawa zmusiło wykonawców do zastosowania równania Klinkenberga [1941]. Równanie Klinkenberga jest stosowane do opisów przepływów w ośrodkach mikroporowatych i opisuje efekt „poślizgu” na warstwie przyściennej [Wu i in., 1998]:

$$k = k_{\infty} \left(1 + \frac{b}{p_{sr}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

k_{∞} – przepuszczalność przy ciśnieniu filtracji zmierzającym do nieskończoności, m^2 ,

b – współczynnik Klinkenberga, Pa,

p_{sr} – średnie ciśnienie filtracji, Pa.

Współczynnik b zależny jest od średniej drogi swobodnej gazu λ oraz średniego promienia rozmiaru porów i może zostać wyznaczony z równania:

$$b = \frac{4c\lambda P_{sr}}{r} \quad (6)$$

gdzie:

r – promień kapilary w modelu Klinkenberga, m,

c – stała ($c = \text{ok. } 1$).

Średnią drogę swobodną możemy obliczyć z równania [Loeb, 1934]:

$$\lambda = \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{\pi R_0 T}{2M}} \quad (6)$$

gdzie:

μ – lepkość dynamiczna gazu, Pa·s,

R – uniwersalna stała gazowa ($R = 8,3144598(48)$ J/(mol·K),

M – masa molowa gazu, kg/mol.

Jeśli ośrodek porowaty charakteryzuje się dużymi rozmiarami porów r , wówczas wartość współczynnika k zmierza do zera, a przepuszczalność ośrodka jest niezależna od wartości ciśnienia średniego. Teoretycznie, jeśli średnie ciśnienie filtracji rośnie do nieskończoności, wówczas średnia droga swobodna cząstki zmierza do zera, a współczynnik poślizgu Klinkenberga b przyjmuje wartość zero.

Z równania:

$$r = \frac{4cp_{sr}}{b} \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{\pi R_0 T}{2M}}$$

możemy, więc obliczyć średni wymiar r odniesiony do przestrzeni porowej skały.

W ramach przeprowadzonych badań wykonywano pomiary przy różnych ciśnieniach średnich filtracji i jeśli to było możliwe wyznaczano wartość parametru k . Nie było to jednak możliwe w każdym przypadku. Wykonując badania na próbkach o bardzo niskiej przepuszczalności, dla uzyskania wydatku na poziomie mierzalnym za pomocą przepływomierza barbotażowego konieczne było stosowanie wysokiego ciśnienia filtracji (rzędu 3 MPa).

5. Wyniki pomiarów przepuszczalności

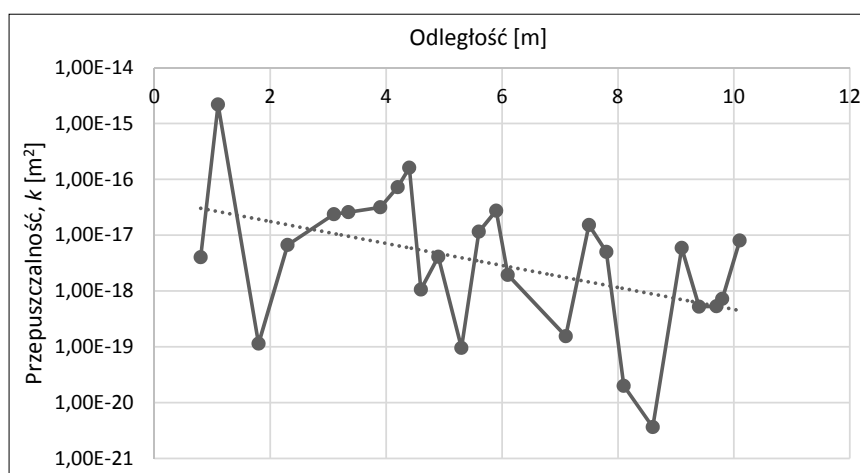
Wszystkie próbki miały średnicę 43 mm. Próbki zostały docięte piłą diamentową na wysokość około 20 mm. Następnie każda z próbek została wklejona do odcinka stalowej rury o średnicy wewnętrznej 50 mm i ściance 5 mm za pomocą kleju Sikadur-52. Skład chemiczny oparty jest o dwuskładnikową żywicę epoksydową o wysokiej wytrzymałości i sprężystości. Przed przystąpieniem do pomiarów przepuszczalności sprawdzano szczelność wklejenia próbki względem stalowej rury pianowym testerem szczelności. Test polegał na zadaniu gazu pod ciśnieniem na jeden z końców próbki i obserwacji miejsc tworzenia się pęcherzyków gazu na drugim (odsłoniętym końcu próbki). Próbki, które nie przeszły testu szczelności na poboczniczy były ponownie wklejane do rury pomiarowej i ponownie poddane testowi szczelności.

Wyniki przepuszczalności próbek skalnych pochodzących z OZG „Rudna” zestawiono w tabelicy 2. W kolejnych kolumnach zestawiono numer próbki, odległość od stropu wyrobiska, przepuszczalność k_{∞} [m²] oraz współczynnik Klinkenberga b [MPa].

Tab. 2. Wyniki pomiarów przepuszczalności próbek dolomitu

Nr próbki	Odległość [m]	k_{∞} [m ²]	b [MPa]	Nr próbki	Odległość [m]	k_{∞} [m ²]	b [MPa]
1	0,8	4.02E-18	0.14	14	5,9	2.74E-17	0.18
2	1,1	2.18E-15	0.00	15	6,1	1.94E-18	0.42
3	1,8	1.14E-19	1.68	16	7,1	1.55E-19	0.20
4	2,3	6.66E-18	1.78	17	7,5	1.52E-17	0.26
5	3,1	2.37E-17	0.34	18	7,8	5.02E-18	0.60
6	3,35	2.57E-17	0.20	19	8,1	2.00E-20	0.12
7	3,9	3.15E-17	0.56	20	8,6	3.65E-21	0.22
8	4,2	7.22E-17	0.18	21	9,1	5.90E-18	0.58
9	4,4	1.61E-16	0.10	22	9,4	5.22E-19	0.9
10	4,6	1.06E-18	0.30	23	9,7	5.32E-19	0.6
11	4,9	4.10E-18	0.18	24	9,8	7.21E-19	0.52
12	5,3	9.57E-20	0.60	25	10,1	7.99E-18	0.18
13	5,6	1.15E-17	0.48	26	10,5	5.21E-21	1.26
Średnio		$k_{sr} = 9.95 \cdot 10^{-17} \text{m}^2$		$b_{sr} = 0.48 \text{MPa}$			

Zmienność przepuszczalności dolomitów jest bardzo duża i zawiera się w zakresie trzech rzędów wielkości od $5.21 \cdot 10^{-21} \text{m}^2$ do $1.6 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$. Przepuszczalność spada wraz z odległością od stropu wyrobiska – Rys. 4.



Rys. 4. Zmienność przepuszczalności dolomitu w funkcji odległości od stropu wyrobiska

Filtracyjny przepływ gazu przez badane próbki miał zasadniczo charakter przepływu porowego przez ośrodki mikroporowate. Przepływ odbywa się przez otwarte (komunikujące się wzajemnie) przestrzenie porowe w całej objętości próbki. Przykład przepływu porowego gazu przez próbkę pokazano na rysunku 5. Pęcherzyki gazu są tam widoczne na całej powierzchni przekroju poprzecznego próbki.



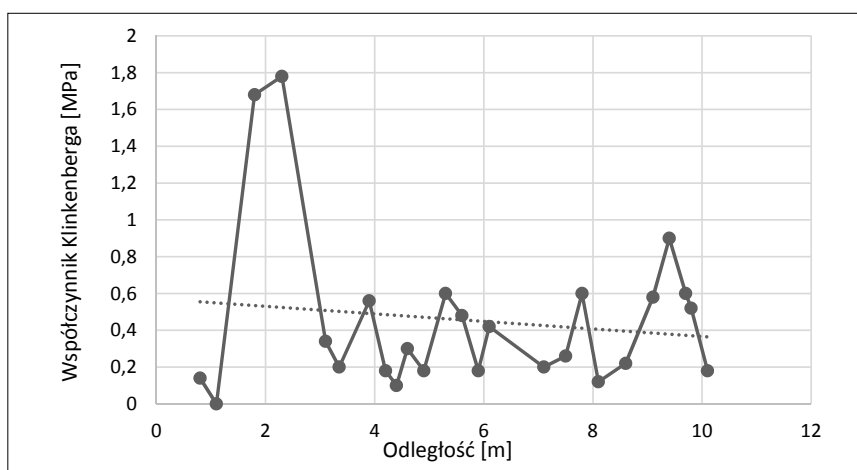
Rys. 5. Przykład przepływu porowego przez próbkę

W badanym dolomicie wystąpiła jedna próbka, na której widoczna była makroskopowa szczelina – próbka 2. W próbce tej wartość współczynnika Klinkenberga wynosi zero, co oznacza, że spełnione jest liniowe prawo filtracji Darcy'ego. Przepływ gazu miał tam charakter szczelinowy – Rys. 6.



Rys. 6. Przykład przepływu szczelinowego przez próbkę nr 2

O mikroporowatości ośrodka świadczy nieliniowość przepływu opisana równaniem Klinkenberga i niezerowe wartości współczynnika b z tego równania. Zmienność współczynnika b z równania (5) pokazano na rysunku 7. Najwyższe wartości tego współczynnika występują na odcinku od 1 m do 3 m od stropu wyrobiska. Tam też, zgodnie z równaniem (6) występować powinien obszar o zmniejszonych rozmiarach porów.

Rys. 7. Zależność współczynnika Klinkenberga b od odległości od stropu wyrobiska

6. Wnioski

Pomiary przepuszczalności próbek skalnych wykazały znaczne zróżnicowanie ich własności filtracyjnych, opisane przepuszczalnością k . Na jednej z próbek stwierdzono istnienie szczeliny. Próbką ta charakteryzowała się znacznie większą przepuszczalnością w porównaniu z próbkami niespękanymi. Obserwacja ta oraz doświadczenia z użyciem substancji pianotwórczej pozwalają na stwierdzenia, że transport gazów przez badane rdzenie dolomitów odbywał się dwoma zasadniczymi sposobami. Transport szczelinowy, w którym praktycznie cały przepływ odbywał się szczelinami widocznymi w skali makro (próbka nr 2). Pozostałe próbki charakteryzowały się przepływem porowym charakterystycznym dla ośrodków mikroporowatych. Maksymalne i minimalne wartości k dla badanego dolomitu w przepływie porowym wynosiły odpowiednio $5.21 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ i $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.

Cechą charakterystyczną przepływów przez ośrodki mikroporowate jest nieliniowość procesu filtracji wywołana tzw. efektem poślizgu. Przejawia się ona wzrostem przepuszczalności wraz ze spadkiem ciśnienia średniego filtracji. Do opisu filtracji zastosowano równanie Klinkenberga, wyliczając wartości współczynników Klinkenberga b przy różnych ciśnieniach średnich filtracji. Zerowa wartość tego współczynnika świadczyć może o przepływie szczelinowym a wysokie jego wartości, jak w zakresie od 1 m do 3 m od stropu wyrobiska, o zmniejszonych wymiarach kanałów transportowych.

Podziękowanie:

Za pomoc przy wykonaniu pomiarów filtracyjnych dziękuję dr inż. Norbertowi Skoczylasowi oraz Panu Jarosławowi Aksamitowi.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Bear J., 1972: *Dynamics of Fluids Media*. American Elsevier Environmental Science Series, Ottawa, Canada.
- Darcy H., 1856: *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.
- Dyrka L., 1986: *Badania pola prędkości w modelach przestrzeni porowej i rzeczywistej przestrzeni porowej*. Archiwum Górnictwa, Vol. 31, Iss. 1.
- Kudasik M., Skoczylas N., Sobczyk J., Topolnicki J., 2010: *Manostat – an accurate gas pressure stabilizer*. Measurement Science and Technology, Vol. 21, Iss. 8.
- Kulczycki W., 1955: *Mechanika płynów w złożach ropy naftowej i gazu ziemnego*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, p. 270.
- Loeb I.B., 1934: *The kinetic theory of gases*. Mc. Graw Hill c.o. New York.
- Scheidegger A.E. 1957: *The Physics of Flow Through Porous Media*. Section 5.4. and 7.3, University of Toronto Press.
- Skawiński R., 1992: *Non-linearity of flow in a porous medium and its origin*, Archiwum Górnictwa, Vol. 37, Iss. 4.
- Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air. Designation: D 4525 – 90 (Reapproved 2001).
- Wu Y.S., Pruess K., Persoff P., 1998: *Gas Flow in Porous Media with Klinkenberg Effects*. Transport in Porous Media 32, 117-137.

Non-linear filtration of gas through a sample of dolomite

Abstract

The paper presents the results of measurements of gas permeability through the dolomite from one of the copper mines. The cores were taken at different distances from the excavation roof. They are characterized by low permeability and non-linear flow manifested by an increase in the permeability of the medium at low pressures. This effect occurs in microporous rocks. Klinkenberg equation with the slippage effect was used to describe the measurements results.

Keywords: dolomite, permeability of the rock, gas denger in mines