

# Aparatura pomiarowa do badań filtracji gazów przez brykiety węglowe w warunkach trójosiowego obciążenia

JULIUSZ TOPOLNICKI, MATEUSZ KUDASIK

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

## Streszczenie

Artykuł ten opisuje budowę aparatury pomiarowej do badań filtracji gazów przez brykiety węglowe poddawane obciążeniom mechanicznym. Zbudowany układ umożliwia pomiar i akwizycję wszystkich niezbędnych danych pomiarowych, a także regulację parametrów wejściowych eksperymentu. Gaz z układu stabilizacji ciśnienia podawany jest na czoło brykietu, który obciążony jest przy pomocy prasy śrubowej. Siła obciążająca brykiety jest mierzona dynamometrem tensometrycznym. Gaz po opuszczeniu brykietu przepływa poprzez zawór tłumiący do miernika przepływu gazu. Artykuł szczegółowo opisuje budowę i zasadę działania podukładu prasy śrubowej, a także przedstawia przebieg procesu pomiaru na zbudowanej aparaturze oraz przykładowe wyniki pomiarów.

**Słowa kluczowe:** filtracja gazu, przepuszczalność węgla, obciążenie trójosiowe, prasa śrubowa

## 1. Wstęp

Wyrzuty węgla i metanu są zjawiskami wymagającymi obecności gazu w ośrodku porowatym jakim jest węgiel. Warunkiem bezpieczeństwa prac górniczych jest odpowiednie odgazowanie pokładów węglowych. Przepuszczalność węgla zmienia się wraz z obciążeniami mechanicznymi jakim jest on poddawany. Prowadzenie prac eksploatacyjnych wywołuje dynamiczne i statyczne zmiany obciążeń wywieranych na pokłady węglowe. Zapewnienie odpowiedniego odgazowania eksploatowanych pokładów wymaga przeprowadzenia badań wpływu obciążeń mechanicznych jakim poddawane są złoża węgla na ich przepuszczalność dla gazów.

Aparatura pomiarowa do badań filtracji gazów przez brykiety węglowe w warunkach trójosiowego obciążenia, powinna umożliwiać:

- regulację obciążeń mechanicznych jakim poddawana jest próbka węglowa,
- stabilizację ciśnienia gazu na wejściu układu pomiarowego,
- tłumienie przepływu gazu na wyjściu układu pomiarowego,
- ocenę, czy uległy wygaszeniu niestacjonarne procesy wywołane wymuszonymi zmianami warunków pomiaru.

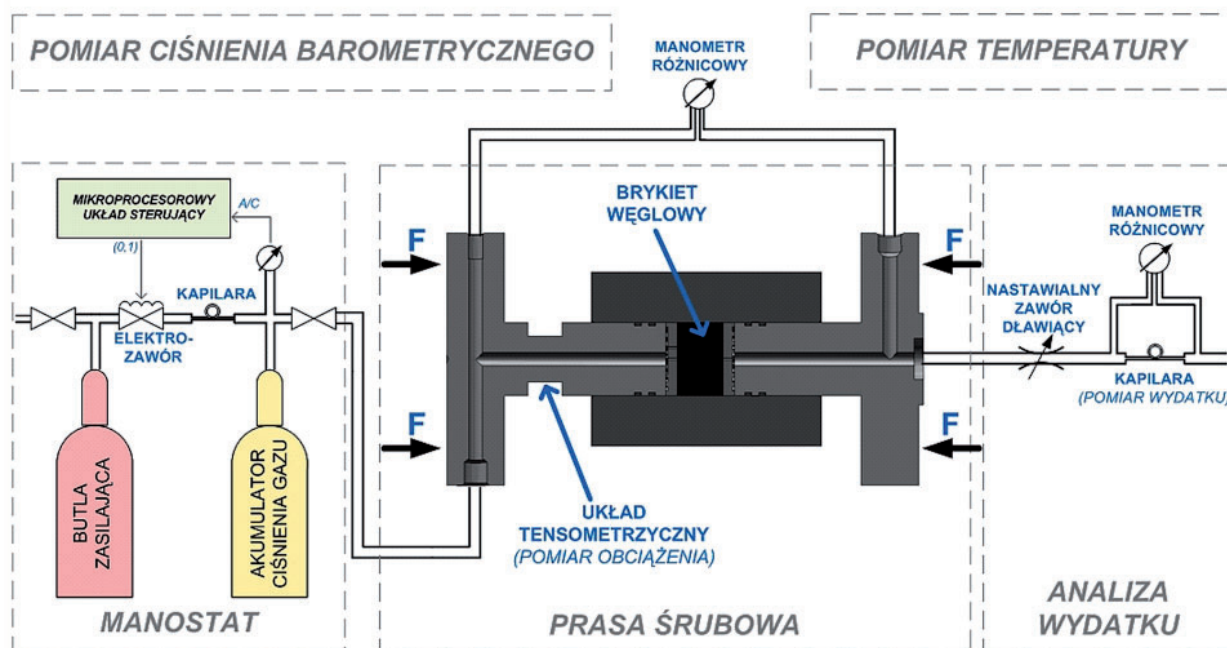
Ponadto stanowisko pomiarowe powinno umożliwiać rejestrowanie następujących wielkości fizycznych:

- obciążeń, jakim poddawana jest próbka węglowa,
- różnicy ciśnień na obu końcach brykietu,
- ciśnienia na wejściu układu,
- wydatku gazu filtrującego.

Schemat układu do badania filtracji gazów przez próbki węglowe poddawane obciążeniom mechanicznym, spełniającego wyżej wymienione wymagania został przedstawiony na Rys. 1.

Powyższy układ składa się z trzech podstawowych podukładów:

- system stabilizacji ciśnienia wejściowego (manostat),
- prasa śrubowa,
- układ pomiaru wydatku.



Rys. 1. Schemat układu do badania filtracji gazów przez próbki węglowe poddawane obciążeniom mechanicznym

Układ stabilizacji ciśnienia wejściowego oraz układ pomiaru wydatku zostały szerzej omówione w artykułach [1] i [2], dlatego w dalszej części artykułu szczegółowo opisany zostanie jedynie układ prasy śrubowej.

## 2. Prasa śrubowa

### 2.1. Budowa

Pierwotnym planem przeprowadzenia badań filtracji gazów przez brykiety węglowe w warunkach mechanicznego obciążenia było wykorzystanie urządzenia GTA-10 [3], jakim dysponuje Pracownia Odkształceń Skał IMG-PAN, do wytwarzania stanu trójosiowego naprężenia na badanej próbce. Okazało się jednak, że zastosowanie tego urządzenia wiąże się z poważnymi trudnościami technicznymi. Prasa GTA-10 jest przystosowana do pracy z próbkami skalnymi o dużej wytrzymałości. Wystąpiły znaczne kłopoty z utrzymaniem spójności brykietu węglowego stanowiącego próbkę stosowaną do naszych badań. Ponadto okazało się, że pomiary są długotrwałe, gdzie pojedynczy pomiar trwa od 30 do 90 minut. Prasa GTA-10 nie jest przystosowana do tego typu badań.

Wobec tego zdecydowano się na zbudowanie urządzenia do pomiarów przepuszczalności próbek węglowych obciążanych edometrycznie. Założeniem pomiarów edometrycznych jest warunek, aby średnica próbki była większa od jej długości. W sytuacji tej osiągnięty stan naprężeń jest zbliżony do stanu trójosiowego. Aparatura do pomiarów zmian przepuszczalności próbek węglowych wywołanych sorpcją gazów oraz obciążeniem trójosiowym zbudowana w IMG-PAN składa się z elementów opisanych poniżej.

- Stalowej rury (Rys. 2) wraz z dwoma stemplami ze stali służącymi do „brykietowania” próbki węglowej. Brykiet o średnicy  $\phi$  32 mm uformowany w rurze stanowi próbkę poddawaną badaniom.
- Dolnego tłoka prasy śrubowej wykonanego z duralu (Rys. 3). Pełni on także funkcję dynamometru. Na jego przewężonym odcinku umieszczony jest mostek tensometryczny. Dynamometr ten został wykalibrowany i podłączony do urządzenia pozwalającego na ciągłą rejestrację obciążeń wywieranych na tłok. Na pobocznicę tłoka znajdują się dwa rowki na o-ringi uszczelniające. W podstawie tłoka wykonane są trzy równo rozmieszczone otwory na stalowe śruby  $\phi$  12, które służą do wywierania nacisków na próbkę.
- Górnego tłoka prasy śrubowej wykonanego z duralu (Rys. 4). Na pobocznicę tłoka znajdują się dwa rowki na o-ringi uszczelniające. W podstawie tłoka wykonane są trzy równo rozmieszczone otwory na stalowe śruby  $\phi$  12, które służą do wywierania docisku na próbkę.

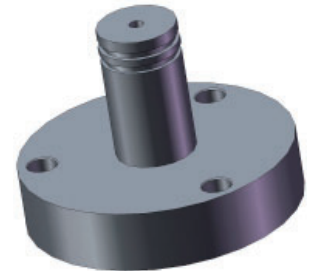
- Końcówek tłoków rozprowadzających gaz po powierzchniach czołowych próbki, wykonane z twardej stali węglowej (Rys. 5).
- Dolnej podstawy dociskowej (Rys. 6) wykonanej z twardej stali węglowej. Zawiera ona trzy równo rozmieszczone, nagwintowane otwory przeznaczone do mocowania śrub dociskowych. Łączy się ona z podstawą dolnego tłoka za pośrednictwem stalowej kulki łożyskowej  $\phi 15$ , zastosowanej w celu wyeliminowania wpływu nierównomiernego obciążenia próbki (Rys. 7).



Rys. 2. Rura ze stali w której umieszczana jest uformowana próbka węgla



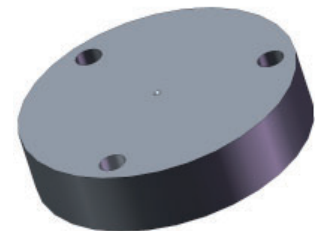
Rys. 3. Dolny tłok prasy śrubowej



Rys. 4. Górny tłok prasy śrubowej

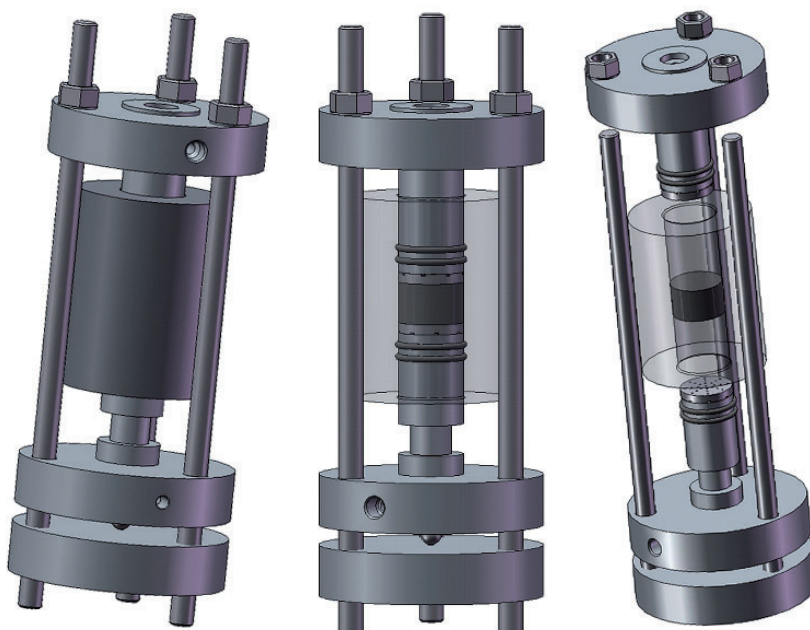


Rys. 5. Końcówki tłoków rozprowadzające gaz po powierzchniach czołowych próbki



Rys. 6. Dolna podstawa dociskowa

Złożenie wszystkich wyżej omówionych elementów stanowi kompletny układ prasy śrubowej (Rys. 7).

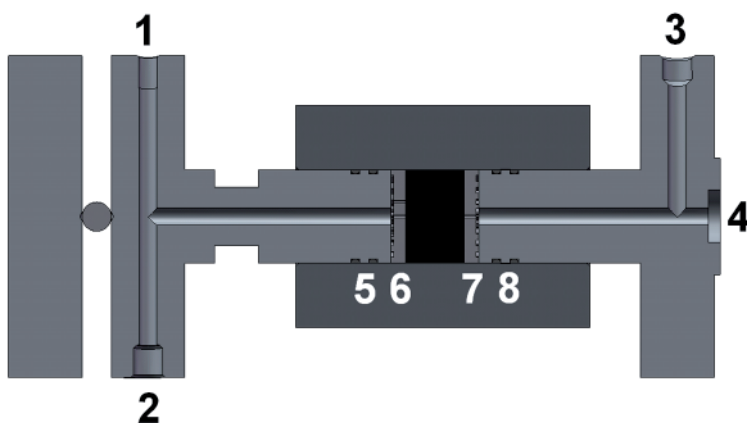


Rys. 7. Rysunki złożeniowe elementów prasy śrubowej

## 2.1. Zasada działania

Wykorzystanie śrub ściągających jako elementu generującego naprężenia podyktowane jest koniecznością utrzymywania stałych obciążeń mechanicznych działających na próbkę węglową w długich okresach czasowych.

Przekrojowy rysunek poglądowy (Rys. 8) ilustruje drogę przepływu gazu oraz przedstawia ogólną zasadę działania prasy śrubowej. Wlot gazu pod zadanym ciśnieniem do układu odbywa się poprzez otwór 1. Między otworami 2 i 3 mierzona jest różnica ciśnień na próbce węglowej. O-ringi 5 i 8 uszczelniają tłoki do pobocznicy, tak aby cały gaz filtrowany był przez brykiety. Zadaniem końcówek tłoków 6 i 7 jest rozprowadzenie gazu po powierzchniach czołowych próbki. Do otworu wylotowego 4 podłączony jest regulowany zawór tłumiący, umożliwiający regulację gradientu ciśnienia gazu na próbce węglowej.



Rys. 8. Przekrojowy rysunek poglądowy prasy śrubowej

Parametry jakie mierzone są na prasie śrubowej w trakcie pomiarów filtracji gazów przez brykiety węglowe w warunkach obciążeń edometrycznych, to:

- różnica ciśnień  $\Delta P$  przed i za próbką węgla – do rejestracji wykorzystywany jest manometr różnicowy PR-54 firmy Aplisens,
- obciążenie wywierane przez tłoki prasy na próbkę węglową – do pomiarów obciążenia tego użyto mostka tensometrycznego złożonego z czterech tensometrów (odczyty dokonywane są za pomocą miernika odkształceń typu SGM-1C produkowanego przez Pracownię Odkształceń Skał IMG-PAN [4]).

## 3. Przebieg procesu pomiaru

Pomiary filtracji gazów przez brykiety węglowe miały na celu zbadanie wpływu obciążenia oraz wpływu porowatości brykiety na parametry równania opisującego przebieg procesu transportu gazu przez ośrodek porowaty. W badaniach, na zbudowanej aparaturze, przyjmuje się stosowalność fenomenologicznego modelu równania zaproponowanego w pracy [5] nawiązującego do efektu Klinkenberga [6]:

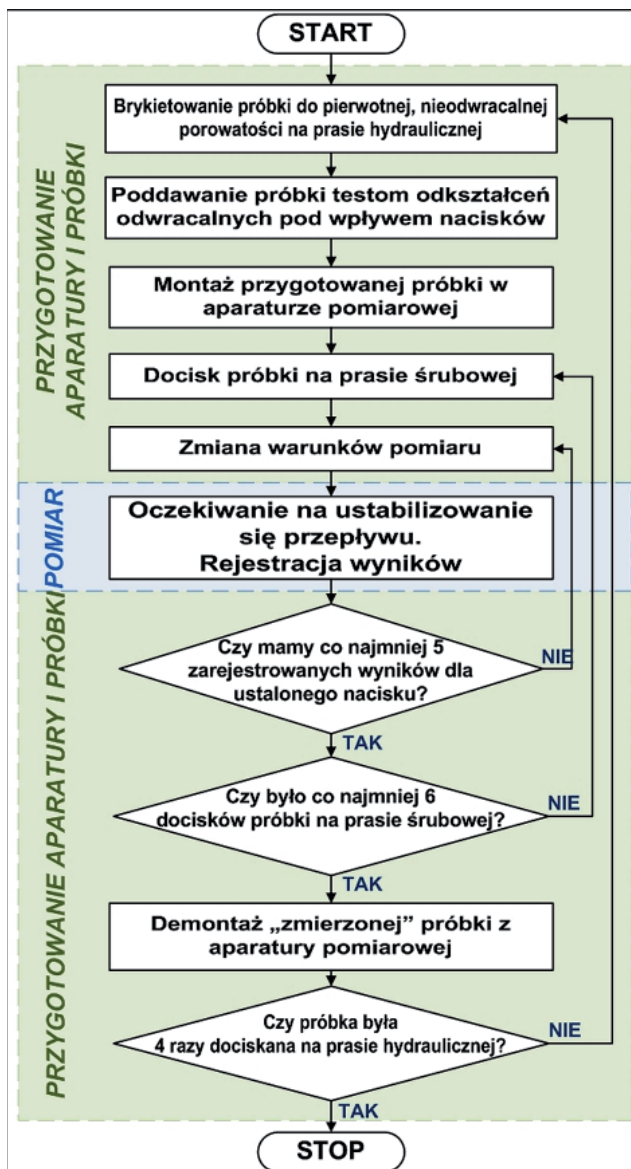
$$Q = -\frac{dP}{dx}(A + BP) \quad (1)$$

gdzie:

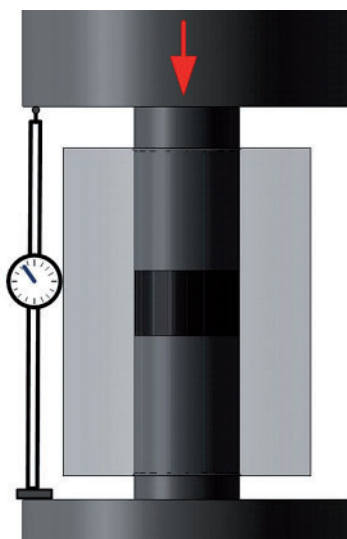
- $Q$  – wydatek molowy gazu,
- $P$  – ciśnienie gazu na badanej próbce.

W równaniu tym występują dwa parametry:  $B$  (określany jako „gazowy”) oraz  $A$  (określany jako „cieczowy”) zależne od geometrii i właściwości próbki oraz rodzaju użytego gazu. Jednym z głównych celów pomiarów na zbudowanej aparaturze są badania zależności współczynników  $B$  i  $A$  z równania (1) od porowatości oraz nacisku.





Rys. 9 Przebieg procesu pomiaru



Rys. 10. Pomiar odkształceń próbki wywołanych jej dociskiem

Wobec powyższych wymagań pomiarowych niezbędna jest ciągła zmiana warunków pomiaru, poprzez regulację takich parametrów jak:

- naprężenia wywierane na badaną próbkę,
- porowatość badanej próbki,
- ciśnienie gazu na czole próbki.

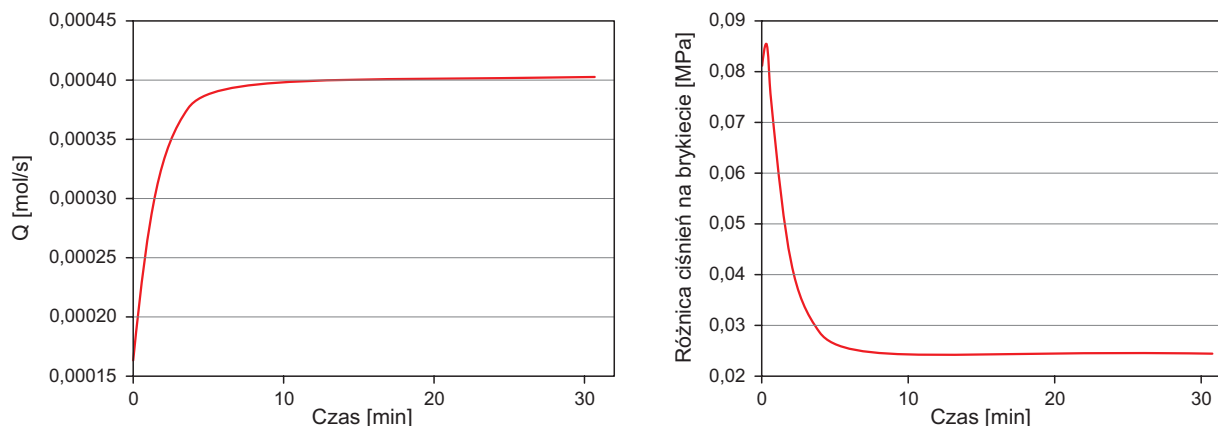
Pomiary przepuszczalności gazów przez próbki węglowe poddawane obciążeniom składają się z wielu procedur, które można pogrupować w dwóch etapach (Rys. 9):

- przygotowanie aparatury i próbki do pomiaru,
- przebieg pomiaru i rejestracja wyników.

W pierwszym etapie odbywa się wstępne „brykietowanie” próbki węglowej do pierwotnej, „nieodwracalnej” porowatości na prasie hydraulicznej. Aby wywołać trwałe zmiany porowatości brykiety konieczne jest wywarcie prasą hydrauliczną stosunkowo dużego naprężenia na próbkę (rzędu co najmniej 50MPa) przekraczając zakres odkształceń sprężystych. Następnie tak przygotowana próbka o danej porowatości pierwotnej poddawana jest testom odkształceń „odwracalnych” w celu zbadania zależności zmian porowatości względem naprężeń. Test ten wykonuje się na prasie hydraulicznej, przy czym zakres wywoływanych naprężeń na próbkę nie może przekraczać granicy sprężystości (od 30MPa do 35MPa). Na podstawie pomiaru przemieszczenia (mierzonego wysokościomierzem z działką 0.01mm) tłoka prasy hydraulicznej w trakcie docisku próbki, mierzone są jej odkształcenia (Rys. 10). Znając zależność odkształceń próbki względem nacisku można wyznaczyć zmiany porowatości badanej próbki jako funkcji naprężenia. Znajomość tej zależności jest niezbędna do dokładnego określenia, w trakcie pomiarów przepuszczalności, zmian porowatości próbki wywołanych naprężeniami zadanymi prasą śrubową.

Tak przygotowana próbka węglowa montowana jest w aparaturze pomiarowej, gdzie na prasie śrubowej wywierany jest na nią nacisk. Etap przygotowania aparatury i próbki kończy odpowiednie ustawienie warunków pomiaru: ciśnienie gazu dopływającego z manostatu na czoło próbki oraz tłumienie wydatku gazu na nastawialnym zaworze dławiącym na wylocie próbki.

Po przygotowaniu aparatury i próbki rozpoczyna się proces pomiaru przy ustalonych warunkach, w trakcie którego odbywa się rejestracja do komputera wszystkich niezbędnych parametrów. Etap pojedynczego pomiaru, w zależności od używanego gazu, porowatości próbki, nacisku na prasie śrubowej oraz ustawionych warunków pomiaru, trwać może od około 20 minut do nawet 2 godzin (Rys. 11). Po ustabilizowaniu się przepływu i zarejestrowaniu zmierzonych parametrów, niezbędne jest kilkukrotne powtórzenie



Rys. 11. Przykładowy przebieg stabilizacji przepływu w pomiarze filtracji

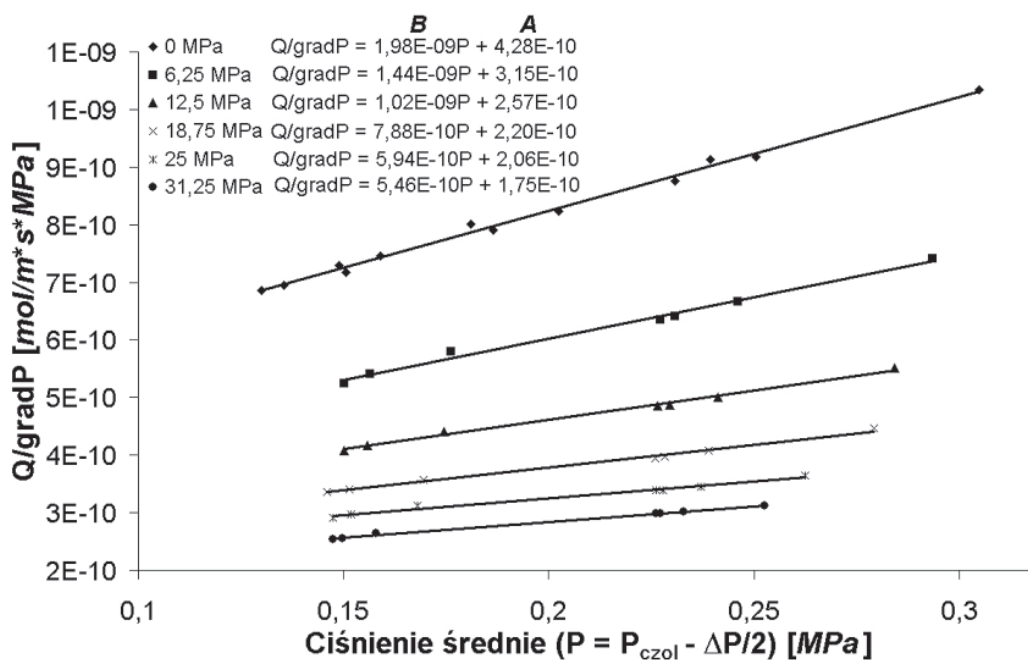
operacji pomiaru przy różnych warunkach, zmieniając ciśnienie na czole próbki i wydatek gazu na jej wyjściu. Następnie próbka dociskana jest prasą śrubową i przy zadanym docisku ponownie dokonuje się pomiarów filtracji, zmieniając kilkukrotnie warunki pomiaru. Należy wykonać kilka docisków próbki, przy czym po każdym z nich należy dokonać pomiarów przepuszczalności przy różnych warunkach pomiarowych. Można w ten sposób uzyskać „rodzinę” parametrów  $B$  i  $A$  równania (1) transportu gazu przez brykiet węglowy dla wszystkich wygenerowanych w próbce naprężeń i danej porowatości pierwotnej brykietu. Na Rys. 12 przedstawiony został przykładowy wynik badań filtracji azotu przez brykiet węglowy na zbudowanej aparaturze. Współczynniki  $B$  i  $A$  uzyskuje się z dopasowania regresji liniowej funkcji  $\frac{Q}{gradP}(P)$ , przy czym

za ciśnienie średnie  $P$  przyjmuje się różnicę  $P = P_{czol} - \Delta P/2$ , gdzie  $P_{czol}$  to ciśnienie na czole próbki, a  $\Delta P$  to różnica ciśnień na obu jej końcach.

Konieczne jest poddanie badaniom filtracji gazem tej samej próbki węglowej o kilku różnych porowatościach pierwotnych. Zatem zakończenie badań na próbce o danej porowatości, wymaga jej demontażu z aparatury pomiarowej, dociśnięciu na prasie hydraulicznej, a następnie poddaniu jej ponownym badaniom przepuszczalności według podobnego schematu jaki został powyżej opisany. Dokładny algorytm przebiegu procesu pomiaru filtracji gazu przez brykiety węglowe w warunkach trójosiowego obciążenia przedstawia Rys. 9.

Komplet badań filtracji jednego rodzaju gazu przez próbkę danego rodzaju węgla, według przedstawionego algorytmu, trwa w sumie kilkadziesiąt godzin. Zaprezentowana aparatura pomiarowa zapewnia w dużym stopniu zautomatyzowanie tych długoczasowych pomiarów, poprzez pomiar, regulację oraz rejestrację wszystkich niezbędnych parametrów.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



Rys. 12. Przykładowe wyniki badań filtracji azotu przez brykiety węglowe w warunkach trójosiowego obciążenia

## Literatura

- [1] J. Topolnicki, M. Kudasik, N. Skoczylas, J. Sobczyk, *Manostat – an accurate pressure stabilizer*, Flow Measurement and Instrumentation (w recenzji).
- [2] J. Topolnicki, M. Kudasik, N. Skoczylas, J. Sobczyk, *Low cost capillary flow meter*, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 152, No. 2, pp. 146-150, June 2009.
- [3] J. Gustkiewicz, A. Nowakowski, *Deformacje i pękanie skał w warunkach laboratoryjnych*, Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Nr. spec., 2004.
- [4] A. Kanciruk, *Miernik SGM-1C – modyfikacje i przykłady zastosowań*, Elektronizacja: podzespoły i zastosowania elektroniki, Nr. 12, 1998.
- [5] J. Topolnicki, M. Wierzbicki, *Phenomenological Description of Gas Seepage in Coal Briquettes*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Earth Sciences, vol. 48, No. 1, 2000.
- [6] L.J. Klinkenberg, *The permeability of porous media to liquids and gases*, A.P.I. Drilling and Production Practice 1941.

## Measuring system for gas seepage through coal briquettes under triaxial loading conditions

### Abstract

This article describes a project of a measuring system for gas seepage through coal briquettes under mechanical loads. The system enables measurements and acquisition of all necessary data and control of input parameters. The gas from the pressure stabilizer system reaches the briquette's input surface. The loading of the briquette is generated by screw press and measured by means of a dynamometric extensometer. The gas which flows out of the briquette passes through the damping valve and reaches the capillary flow meter. This article presents in detail the design and the functioning of the screw press subsystem. It also shows the measuring procedure and some results of the measurements.

**Keywords:** gas seepage, coal permeability, triaxial load, screw press

Recenzent: Dr hab. Marek Gawor, Instytut Mechaniki Górotworu PAN