

Grzegorz WAŁOWSKI, Gabriel FILIPCZAK

e-mail: g.walowski@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Ocena hydrodynamiki przepływu gazu przez ośrodek szczelinowo-porowaty

Wstęp

Przepływ gazu przez ośrodki o strukturze porowatej odbywa się w wielu obszarach procesowych. Najczęściej związany jest ze zjawiskiem filtracji oraz migracji gazów procesowych w strukturach porowatych adsorbentów. Występuje także w operacjach technologicznych związanych z termicznym procesowaniem węgla, w odniesieniu do przepływu gazów przez różnego rodzaju struktury karbonizatów, typu koks, węgle aktywowane itp. W każdym z tych przypadków rozpoznanie warunków przepływu przez tego typu struktury i materiały niesie za sobą istotne problemy związane z opisem hydrodynamiki, w tym z oceną mechanizmu przepływu gazu przez złoża i materiały porowate o kanałach o różnej konfiguracji. Znajomość tych mechanizmów pozwala na dokonanie oceny warunków procesowych jakie towarzyszą hydrodynamicznie przepływu gazu przez materiały porowate, a w konsekwencji na szczegółowy opis i modelowanie tych warunków.

W niniejszej pracy dokonano oceny wybranych kryteriów procesowych związanych z hydrodynamiką przepływu gazu przez materiały szczelinowo-porowate w postaci karbonizatów o różnych cechach porowatości. Przedstawiono wyniki pomiarów w odniesieniu do przepuszczalności takich materiałów oraz jednostkowych oporów przepływu. Wykorzystując metody numerycznego modelowania przepływu opisano zmianę ciśnienia w mikrokanalach charakterystycznych dla tych materiałów porowatych.

Badania doświadczalne

Stanowisko

Badania doświadczalne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, którego zasadniczym elementem było naczynie służące do oceny przepuszczalności badanego ośrodka szczelinowo-porowatego, co czyniono w warunkach barbotażu. W tym celu stanowisko wyposażono w rotometr do pomiaru strumienia gazu oraz manometr do pomiaru ciśnienia. Ciśnienie odniesienia związane z procesem aeracji wynosiło (0,1±0,4) MPa. W każdym przypadku przepływ gazu odbywał się w reżimie ciśnieniowo-swobodnym. Wynikało to ze zróżnicowanej budowy strukturalnej badanego materiału, obejmującej zarówno kanały otwarte (transportujące) jak i zamknięte (ślepe/izolujące).

Materiały

Badaniom podano trzy różne rodzaje materiału porowatego, który stanowiły (Tab. 1): przetopiona skała płonna (PSP) – jako częściowo zgazowany materiał węglowy – koks opałowy (Ko) oraz karbonizat (Ka), stanowiący węgiel zgazowany w warunkach *in situ*.

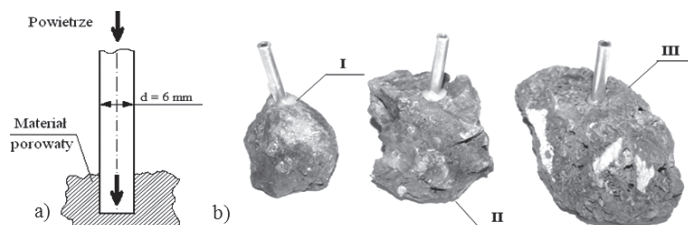
Metodyka

Na podstawie pomiaru strumienia gazu przepływającego przez materiał porowaty oraz spadku ciśnienia na złożu dokonywano oceny jego przepuszczalności. Pozwalało to na wyznaczenie zastępczego współczynnika oporów dla przepływu gazu przez złoża o postaci szczelinowo-porowatych karbonizatów.

Sposób zasilania próbek oraz ich przykładowy widok przedstawiono na rys. 1.

Wyniki badań i ich analiza

W ujęciu ilościowym w badaniach doświadczalnych oceniano takie parametry jak: gęstość pozorną ρ_o , porowatość ϵ , przepuszczalność oraz zastępczy współczynnik oporów przepływu ξ . Za miarę przepuszczalności przyjęto strumień objętościowy gazu wynikający z różnicy ciśnienia ΔP wymuszającej ten strumień.



Rys. 1. Układ zasilania (a) oraz próbki materiału porowatego (b)

Gęstość pozorną karbonizatu może być wyznaczona na podstawie pomiaru objętości całkowitej próbki V_p oraz jej masy $m_p = m_{st}$

$$\rho_o = \frac{m_{st}}{V_p} \quad (1)$$

Porowatość bezwzględna ϵ_b materiału badawczego oznacza iloraz objętości swobodnej V_s i całkowitej objętości V_p próbki [Aksielrud i Altshule, 1987]. Po odpowiednich przekształceniach iloraz ten może być przedstawiony jako

$$\epsilon_b = \frac{V_s}{V_p} = 1 - \frac{V_{st}}{V_p} = 1 - \left(\frac{m_{st}}{\rho_{st}} \right) \left(\frac{\rho_o}{m_{st}} \right) = 1 - \frac{\rho_o}{\rho_{st}} \quad (2)$$

gdzie:

m_{st} – masa ciała stałego (próbki),

ρ_{st} – gęstość ciała stałego (węgiel).

Porowatość efektywna ϵ_{ef} w swym definicyjnym zakresie [Łuszcz, 2011]

$$\epsilon_{ef} = (0,5 \div 0,8) \epsilon_b \quad (3)$$

jest miarą objętości porów wzajemnie połączonych ze sobą, w odniesieniu do objętości całkowitej.

Wskaźnik porowatości n , który dodatkowo jest uzupełnieniem poprzedniej cechy charakteryzuje stopień zagęszczenia porowatego ośrodka. Z definicji [Cala, 2012] jest równy

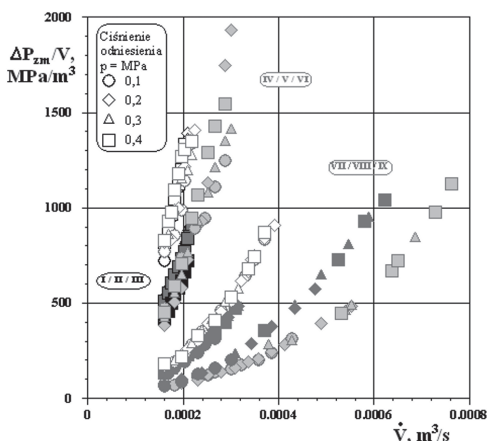
$$n = \frac{\epsilon_b}{1 - \epsilon_b} \quad (4)$$

Parametry charakterystyczne dla badanych materiałów zestawiono w tab. 1. Widać, że średnia porowatość badanych karbonizatów wynosi 40 do 52%, co dla procesowych materiałów tego typu nie stanowi znaczących wartości.

Tab. 1. Charakterystyka materiałów porowatych (wartości średnie): PSP – przetopiona skała płonna, Ko – koks, Ka – karbonizat

Materiał porowaty (nr próbki)	Porowatość		Wskaźnik porowatości	Gęstość	
	bezwzględna	efektywna		pozorna	szkieletu
	ϵ_b	ϵ_{ef}	n	ρ_o	ρ_{st}
	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³
PSP (I, II, III)	50,6	25,3÷40,5	1,0	1545	3125
Ko (IV, V, VI)	52,2	26,1÷41,8	1,1	1074	2250
Ka (VII, VIII, IX)	40,3	20,2÷32,2	0,7	1342	2250

Przepuszczalność badanych materiałów porowatych w ujęciu ilościowym charakteryzuje zdolność do przepuszczania płynu pod działaniem gradientu ciśnienia ΔP . Z uwagi na różnorodność kształtu badanych próbek (Rys. 1b), a także warunki prowadzenia procesu (barbotaż), w badaniach własnych parametr ten odniesiono do objętości V każdej z próbek. Wyniki pomiarów charakteryzujące przepuszczalność badanych materiałów porowatych przedstawiono na rys. 2. Wskazują



Rys. 2. Przepuszczalność materiałów porowatych: I, II, III – przetopiona skała płonna; IV, V, VI – koks; VII, VIII, IX – karbonizat

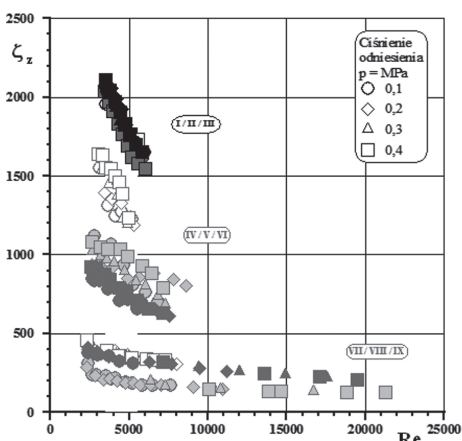
one, że strumień przepływającego gazu jest tym większy im wyższe jest ciśnienie odniesienia. Z drugiej strony, przepuszczalność karbonizatów (VII/VIII/IX) przy danej wartości ciśnienia odniesienia jest większa od przepuszczalności koksu, czy przetopionej skały płonnej. Można to tłumaczyć faktem, że struktura wewnętrzna karbonizatu różni się znacznie od pozostałych (Tab. 1), a świadczy o tym także wyższy wskaźnik porowatości dla koksu i przetopionej skały płonnej.

Zastępczy współczynnik oporów przepływu ξ_z , w analogii do oporów miejscowych, odniesiono do spadku ciśnienia ΔP_{zm} , jaki odnotowano dla każdego materiału przy średniej przepuszczalności wynikającej ze zmierzonego strumienia gazu oraz prędkości przepływu gazu (w) w kanale zasilającym ($d = 6$ mm)

$$\xi_z = \frac{2\Delta P_{zm}}{w^2 \rho_{sr}} \quad (5)$$

gdzie: ρ_{sr} – gęstość gazu dla ciśnienia odniesienia.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3. Wskazują one, że tendencja zmian wartości tego współczynnika jest zgodna z przewidywaniami, tzn. jego wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa Re . Z kolei wysokie obliczeniowe wartości współczynnika ξ_z (jako ekwiwalentnego) wynikają z faktu, że liczby Re odniesiono do przekroju wlotowego kanału zasilającego materiał porowaty (Rys. 1). Taki sposób podejścia wynika z faktu, że parametry charakterystyczne dla oceny tego zjawiska, tj. wymiary liniowe struktury kapilarnej materiałów porowatych oraz wynikające z tej struktury prędkości przepływu nie pozwalają na jednoznaczną ocenę.



Rys. 3. Zastępczy współczynnik oporów przepływu: I, II, III – przetopiona skała płonna; IV, V, VI – koks; VII, VIII, IX – karbonizat

Tak oszacowany współczynnik oporu może stanowić podstawę obliczeń oporów przepływu gazu przez materiały porowate, a jednocześnie może być kryterium oceny mechanizmu ruchu gazu w materiałach szczelinowo-porowatych.

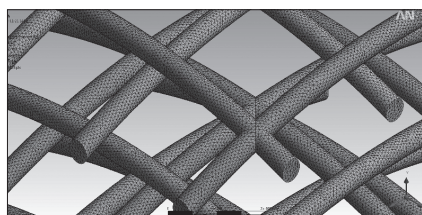
Warto zauważyć, że karbonizat węgla wykazuje najmniejsze opory przepływu. Wynika to niewątpliwie stąd, że materiał ten – pomimo niewielkiej jego porowatości – ma bardzo rozbudowany system porów i szczelin transportujących gaz. Natomiast koks, podobnie jak i skała płonna, charakteryzują się bardziej rozwiniętym systemem szczelino-

wo-porowatym, wykazują relatywnie dużo większe opory przepływu, co spowodowane jest tym, że duża część mikrokanalów i szczelin w nich zawarta jest zamknięta dla przepływu, bądź wprost zasklepiena.

Obliczenia numeryczne przepływu gazu

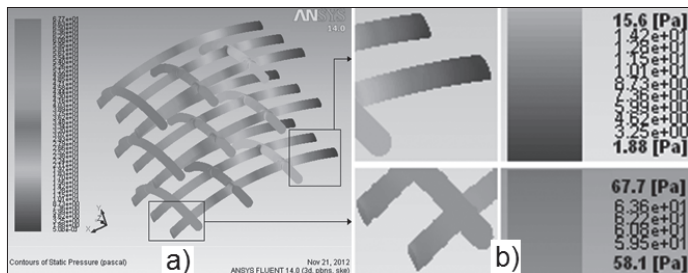
Celem uzyskania lepszego obrazu oraz opisu mikrostrukturalnego hydrodynamiki przepływu przez struktury porowate podjęto próbę wykorzystania do tego celu obliczeń numerycznych. Do analizy wykorzystano metodę objętości skończonych przy użyciu pakietu *Fluent ANSYS Inc.* Wymagane było określenie takich parametrów geometrycznych jak: kształt, długość i przekrój porów oraz kanałów przepływowych.

Siatka przepływu dla badanych próbek miała założony symetryczny rozkład, jaki wynikał z danej porowatości, przy średnicy porów wynikającej z kolei ze średniej wartości współczynnika porowatości efektywnej (Tab. 1). Na rys. 4 przedstawiono siatkę strukturalną, która dyskretyzuje przyjętą geometrię modelu.



Rys. 4. Struktura geometryczna i obraz siatki mikrokanalów

Wyniki obliczeń opisujące ciśnienia w układzie mikrokanalów, charakterystycznym dla rozpatrywanych materiałów porowatych, przedstawiono na rys. 5. Te same kryteria obliczeń zastosowano do opisu pola prędkości.



Rys. 5. Sieć równoległa mikrokanalów: (a) rozkład ciśnienia, (b) fragment sieci

Wnioski

Przedstawiono ocenę hydrodynamiki przepływu gazu w warunkach barbotażu przez szczelinowo-porowate materiały w postaci różnych rodzajów karbonizatów.

Stwierdzono, że możliwa jest dość dokładna ocena przepuszczalności badanych ośrodków w zależności od różnicy ciśnień gazu.

Wykazano możliwość opisu cech badanych materiałów za pośrednictwem zastępczego współczynnika oporów przepływu.

W połączeniu ze znajomością przepuszczalności materiału porowatego pozwala to na ocenę hydrodynamiki przepływu gazu przez ośrodki o zróżnicowanej porowatości oraz umożliwia zastosowanie predykcji przez odpowiednie modelowanie numeryczne.

LITERATURA

Aksielrud G. A. i Altszuler M. A., 1987. *Ruch masy w ciałach porowatych*. WNT, Warszawa
 Cała M., 2012. *Mechanika gruntów*. (05.2012): http://home.agh.edu.pl/~cala/prezentacje/1wyklad_ZG.pdf
 Łuszcz M., 2011. *Rozpoznawanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego*. Wyd. Inst. Techn. Ekspł. – PIB, Radom (02.08.2011): http://naftowka.pl/zsp4/media/pomoc/miner/zloza_ropy_i_gazu.pdf

Praca została wykonana w ramach projektu pt.: Stypendia doktoranckie – inwestycja w kadre naukową województwa opolskiego, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, realizowanego w latach 2012-2013.