

INTERPRETACJA PRZEPIŹYWU GAZU PRZEZ ANIZOTROPOWE MATERIAŁY POROWATE W UJĘCIU FENOMENOLOGICZNYM

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w zakresie oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez sztywne (szkieletowe) materiały porowate o anizotropowej strukturze. Badania odniesiono do materiałów o zróżnicowanej charakterystyce petrograficznej zarówno pochodzenia naturalnego (skała płonna, pumeks), jak i procesowego (koks i karbonizaty). Badania prowadzono dla różnych warunków hydrodynamicznych, z wykorzystaniem powietrza, a także azotu i ditlenku węgla. Za podstawę oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża i materiały porowate przyjęto strumień gazu, jaki wynika z nadciśnienia wymuszającego ten przepływ. Wyniki pomiarów wskazują na wyraźny wpływ rodzaju materiału na gazoprzepuszczalność, a dodatkowo - co wynika z ich anizotropowej struktury wewnętrznej - na wyraźny wpływ kierunkowości przepływu na wartość strumienia gazu.

Słowa kluczowe: materiał porowaty, anizotropia, karbonizat, biowęgiel, biogaz

Wprowadzenie

Przepływ płynu przez ośrodki porowate, zarówno w aspekcie ich wykorzystania w technologii przemysłowej, jak i występowania w środowisku naturalnym, jest zagadnieniem niezwykle złożonym i wciąż nie do końca rozpoznany. W ujęciu fenomenologicznym przepływ ten może być podporządkowany różnym kryteriom hydrodynamicznym, co zależy od struktury ośrodka, rodzaju płynu (jedno- i wielofazowy) oraz sposobu wymuszania przepływu (grawitacyjny, ciśnieniowy). Liczne w tym względzie publikacje, obszernie analizowane m.in. w pracach Strzeleckiego [1], Piecucha [2], Orzechowskiego [3], czy Błaszczyk [4], opisują to zagadnienie zarówno od strony badawczej, jak i analitycznej. Odnoszą się one *de facto* do zjawiska filtracji podczas laminarnego przepływu cieczy przez złoża ziarniste, przebiegającego zgodnie z zapisami prawa Darcy'ego [5]. Nie wyczerpuje to oczywiście wielu innych przypadków ruchu płynów przez ośrodki porowate. Dla warunków burzliwego przepływu płynów wyróżnić należy chociażby modele Forchheimera [6] i Erguna [7]. Bardziej zaawansowany opis przepływu dla przestrzennego układu kapilar w postaci wiązki krętych kanałków

znajduje się również w modelu Kozeny'ego-Carmana [8].

W literaturze przedmiotu nierzadko napotyka się także na inne modele hydrodynamiki ruchu płynów jedno- i wielofazowych przez ośrodki porowate, uwzględniające w swym opisie wpływ zarówno właściwości płynów, jak i rodzaju ośrodka porowatego na przepływ przez złoża ziarniste [2, 3, 4, 9]. Niemniej, znakomita większość tych modeli odnosi się do ośrodków ziarnistych, a niewiele jest prac dotyczących badań gazoprzepuszczalności przez materiały porowate o sztywnej budowie szkieletowej. Przykładowe zestawienie porównawcze materiału literaturowego odnoszącego się do badań hydrodynamiki przepływu gazu przez różnorodne złoża porowate zamieszczono w tab. 1.

Przedmiotem badań własnych jest w tym kontekście ocena warunków hydrodynamiki przepływu gazu przez sztywne materiały porowate o anizotropowej strukturze wewnętrznej. Przedstawiono wyniki badań w zakresie oceny gazoprzepuszczalności różnego rodzaju stałych materiałów porowatych oraz dokonano oceny warunków procesowych związanych z hydrodynamiką przepływu gazu przez materiały o zróżnicowanej strukturze wewnętrznej.

Tab. 1. Wybrane opracowania odnoszące się do badań hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża ziarniste i porowate [9]
Table 1. Selected studies referring to research on hydrodynamics of gas flow through granular and porous deposits [9]

Autor	Rodzaj gazu	Charakterystyka złoża				
		Rodzaj materiału	Wysokość złoża L, m	Średnica kolumny /złoża D, m	Średnica ekwiwalentna ziarna/porów d, m	Porowatość próbek/złoża ε
Ergun [7]	CO ₂ , N ₂ , CH ₄ , H ₂	koks	0,95	0,724	-	0,42
Brauer [10]	powietrze	usypane kule o jednokowej wielkości	0,50	-	0,0024	0,32
Warpechowski, Jopkiewicz [11]	powietrze	koks	0,95	0,380	0,0330	0,42
Hehlmann [12]	powietrze	koksik	0,20	-	0,0049	0,61
Mertas i in. [13]	N ₂	ziarna uplastycznionego węgla	0,08	0,020	-	-
Dyga, Płaczek [14]	powietrze	piana aluminium, 20PPI	1,00	0,020	0,00345	0,93
Blicharski, Smulski [15]	CO ₂ , Ar	skały	0,0254	0,0254	-	0,049
Łukaszuk i in. [16]	powietrze	pszenica	0,95	0,196	0,00410	0,47
Wong i in. [17]	powietrze	biowęgiel z gliną	0,07	0,07	3·10 ⁻⁶	0,1

Źródło: opracowanie własne / Source: own study

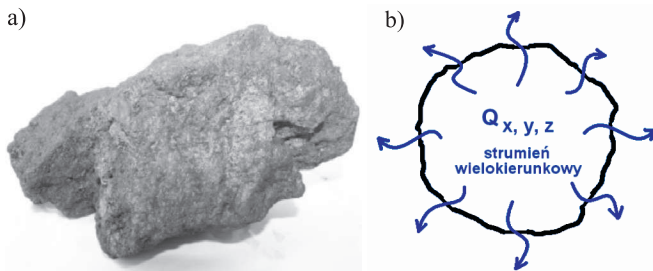
Badania doświadczalne Zakres i metodyka badań

W celu poznania warunków hydrodynamicznych przepływu gazu przez materiały porowate przeprowadzono szczegółowe badania eksperymentalne w zakresie oceny gazo-przepuszczalności materiałów o urozmaiconej strukturze, a jednocześnie zróżnicowanej charakterystyce procesowej. Materiał badawczy stanowiły różnego rodzaju stałe struktury szkieletowe, zarówno naturalne, jak i pochodzące z technologii termicznego zgazowania węgla. Większość z nich stanowiły karbonizaty *in situ*, czyli koksy, przetopiona skała płonna *ex situ*, a także spiek poliamidowy o symetrycznej strukturze przestrzennej.

Dla wszystkich rodzajów wykorzystywanych w badaniach materiałów dokonywano oceny wybranych parametrów, opisujących charakterystyczne dla materiałów porowatych cechy, wynikające z ich porowatości oraz fizycznej struktury, jako podstawowych wielkości procesowych wpływających na hydrodynamikę przepływu gazu przez porowate materiały. W ujęciu ilościowym dokonywano oceny takich parametrów jak gęstość pozorną oraz porowatość danego rodzaju (próbki) porowatego materiału. Pomocne w tym względzie były badania strukturalne badanych materiałów porowatych, jakich dokonywano na podstawie obrazu skaningowego SEM [9].

Badania eksperymentalne odnosiły się do układu pomiarowego, którego szczegółowy opis można znaleźć w następujących pracach własnych [18, 19, 20]. Układ pomiarowy wykorzystywano do oceny przepuszczalności materiałów porowatych w warunkach barbotażu. W tym przypadku kształt próbek wynikał z naturalnie pozyskanych fragmentów rodzimego materiału o nieokreślonym kształcie próbki (rys. 1a).

Badania realizowano w odniesieniu do wartości przepływu powietrza, w zakresie pomiarowym strumienia przepuszczalności wynikającym z ciśnienia odniesienia. Dokonywano niezależnej oceny funkcji przepuszczalności i spadku ciśnienia na porowatym złożu, przyjmując umownie tzw. wielokierunkowy (fraktalny) układ dla przepływu gazu przez próbkę o nieokreślonym kształcie (rys. 1b).



Rys. 1. Próbkę nieokreślonego kształtu: a) materiał badawczy, b) schemat przepływu (przepływ wielokierunkowy - fraktalny) [20]

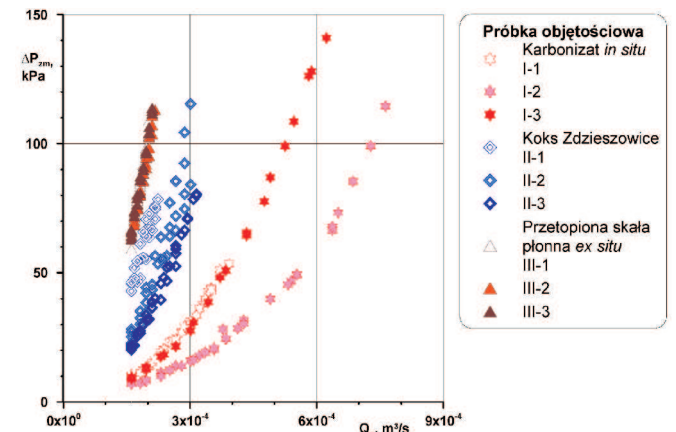
Fig. 1. Sample of unspecified shape: a) research material, b) flow chart (multi-directional - fractal flow) [20]

Wyniki badań i ich analiza

Podstawą oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża i materiały porowate jest charakterystyka ich przepuszczalności, jaka wynika z ciśnienia wymuszającego ten przepływ. W każdym przypadku, wyznaczenie tej charakterystyki polega na określeniu wpływu dyspozycyjnego nadciśnienia na osiągnięty strumień gazu, albo odwrotnie - wpływu strumienia gazu na wartość tego nadciśnienia, równoważnego spadkowi ciśnienia, jaki towarzyszy temu strumieniowi. W tym drugim przypadku jest to równoznaczne z wyznaczeniem całkowitych oporów przepływu gazu przez takie złożo.

Przedstawione na rys. 2 przykładowe wyniki badań wskazują, że w odniesieniu do materiałów porowatych w postaci karbonizatów charakter zmian funkcji przepuszczalności gazu jest bardzo zróżnicowany. Dla samego już karbonizatu *in situ* (I-1, I-2, I-3) otrzymuje się bardzo odmienne charakterystyki przepuszczalności, a ich wzajemne odstępstwo zależy wyraźnie od struktury porowatego materiału. Ponadto charakterystyki te mają przebieg paraboliczny, co wskazuje na ich podobieństwo do hydrodynamiki przepływu przez kanały zamknięte. Z drugiej strony nieliniowa tendencja tych charakterystyk świadczy o dominacji przepływu burzliwego, z czym związane jest też odstępstwo od prawa Darcy'ego [21].

Pokazane na rys. 2. porównanie do innych materiałów wskazuje, że karbonizaty *in situ* (I-1, I-2, I-3) stanowią struktury porowate znacznie bardziej przepuszczalne, aniżeli ma to miejsce w przypadku koksu (II-1, II-2, II-3), czy przetopionej skały płonnej (III-1, III-2, III-3). W odniesieniu do koksu, który w tej grupie odznacza się największą porowatością pokazuje to, że duża część jego porów jest dla przepływu gazu zamknięta, a jednocześnie, że bardziej zwarta struktura karbonizatów nosi cechy ośrodka szczelinowatego, co przy tym samym ciśnieniu odniesienia sprzyja dużo większej przepuszczalności gazu dla tego ośrodka. Z kolei najmniejsza w porównaniu do powyższych materiałów przepuszczalność skały płonnej ma niewątpliwie swe uzasadnienie w relatywnie dużo mniejszej porowatości tego materiału, z mniejszym jednocześnie udziałem porów otwartych dla przepływu [9].



gdzie: ΔP_m - różnica ciśnienia (spadek) zmiernego, Pa; Q_g - strumień objętościowy gazu, m³/h

Rys. 2. Przepuszczalność materiałów porowatych różnego rodzaju (próbka objętościowa): I - karbonizat *in situ*, II - koks (Zdzieszowice), III - przetopiona skała płonna *ex situ* [20]

Fig. 2. Permeability of various kinds of porous materials (volume sample): I - coal char *in situ*, II - coke (Zdzieszowice), III - melted waste rock *ex situ* [20]

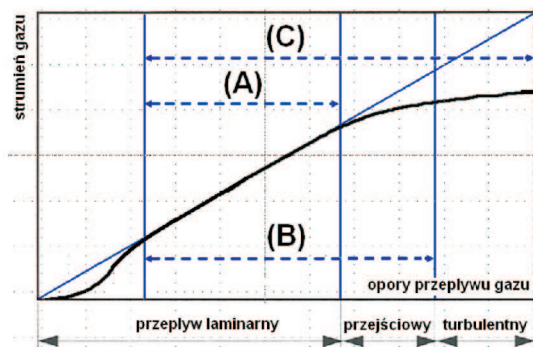
Interpretacja zakresów stosowalności modeli przepływowych

Zestawienie modeli Darcy'ego [5, 21], Forchheimera [6, 22] i Brinkmana [23] pozwala na porównanie zakresu ich stosowania, jak to przedstawiono na rys. 3. Z kształtu charakterystyki funkcji przepuszczalności względem spadku ciśnienia na złożu wynika, że poza zakresem Darcy'ego (obszar A), w którym obowiązują liniowa zależność tej funkcji, w pozostałych zakresach obrazujących przepływ przejściowy i burzliwy (obszar B i C) ma ona charakter nieliniowy. Gdy w obszarze laminarnym na ruch płynu mają wpływ zjawiska dyfuzji, to w takim obszarze opis zagadnienia przepuszczalności jest także nieliniowy.

Tab. 2. Zakresy stosowalności modeli przepływowych warstw ziarnistych [6, 23]
 Table 2. Scope of the flow models applicability of granular layers [6, 23]

Charakterystyka hydrodynamiki			
przepływ laminarny		przepływ przejściowy	Przepływ burzliwy
Re < 13	13 < Re < 1015	1015 < Re < 80120	Re > 80120
zakres pre-Darcy	prawo Darcy'ego		
	prawo Forchheimera		
	prawo Brinkmana		

gdzie: Re - liczba Reynoldsa

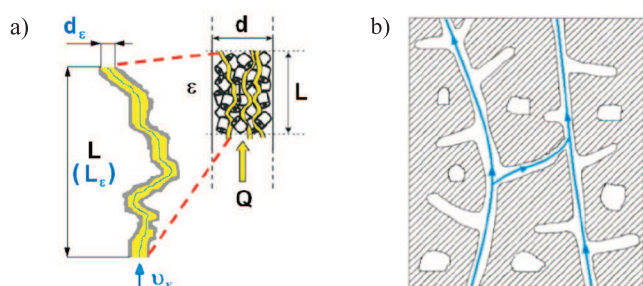


Rys. 3. Charakterystyki warunków przepływowych przez złoża porowate: (A) - obszar Darcy'ego, (B) - obszar Forchheimera, (C) - obszar Brinkmana [5, 6, 22, 23]

Fig. 3. Characteristics of flow through porous bed: area Darcy (A), area Forchheimer (B), area Brinkman (C) [5, 6, 22, 23]

Ogólnie więc, im większa turbulencja przepływu, tym siły bezwładności mają większy wpływ na generowanie oporów przepływu. Wynikające z tych przesłanek zakresy stosowalności poszczególnych modeli warstwy ziarnistej względem liczby Reynoldsa scharakteryzowano w tab. 2.

Jeżeli warunki przepływu odnieść do szczególnego przypadku ciała porowatego, w którym przepływ następuje przez układ wzajemnie połączonych kanalików o skomplikowanym kształcie, to bardziej przydatne w praktyce okazały się modele tzw. kapilarno-porowate. Zgodnie z ogólnie przyjętą interpretacją, w tego typu modelach warstwa ziarnista ma postać wiązki poskręcanych kanalików (porów) kapilarnych o zmiennych przekrojach (rys. 4), których poprzeczny przekrój (np. w kolumnie) może być jednak w przybliżeniu stały.



gdzie: d - średnica kolumny (złoża), m,
 L - wysokość kolumny (złoża), m,
 Q - strumień objętości gazu, m³/h,
 ε - porowatość złoża,
 d_e - średnica pozorna kanalików, m,
 L_ε - wysokość pozorna kanalików, m,
 v_e - prędkość pozorna w kanaliku, m/s

Rys 4. Schemat przepływu płynu przez złożo porowate: a) ziarniste (kręty kanalik) [24], b) o sztywnej budowie szkieletowej z otwartymi kanałami przepływowymi oraz porami ślepyimi i zamkniętymi [25]

Fig. 4. Scheme fluid flow through the porous bed: a) grainy (curving channel) [24], b) rigid backbone structure with open flow channels and pores blind and closed [25]

Podane przykłady wskazują, że modele charakteryzujące hydrodynamikę ruchu płynów w porowatych ośrodkach są pod względem merytorycznym bardzo zróżnicowane, a dla rzeczywistych warunków przepływowych bardzo trudno jest jednoznacznie wskazać przydatność poszczególnych modeli do danych warunków procesowych i technologicznych.

Prowadzi to do wniosku, że w każdym przypadku należy doświadczalnie weryfikować zakres stosowalności tych modeli do obliczeń procesowych.

Odrębnym zagadnieniem jest brak w literaturze przedmiotu alternatywnego podejścia do oceny spadku ciśnienia, jakie wynika z opisu miejscowych oporów przepływu, jako powszechnie przyjętego sposobu opisu spadku ciśnienia na skutek zmiany energii kinetycznej podczas przepływu płynu przez kanały zamknięte.

Podsumowanie

Przeprowadzone rozpoznanie zagadnienia hydrodynamiki przepływu gazu przez ośrodki porowate o szkieletowej strukturze wykazało, że w literaturze przedmiotu jest bardzo mało informacji. W tym względzie wykonano odpowiednie badania doświadczalne materiałów porowatych, a także dokonano oceny zjawisk hydrodynamicznych wynikających z oporów przepływu gazu.

W literaturze przedmiotu, we wszystkich praktycznie przypadkach, brak jest jednolitego poglądu na temat możliwości wykorzystania w opisie hydrodynamiki kryteriów charakterystycznych dla oporów przepływu lub oceny przepuszczalności (strumienia przepływu). Ponadto występują duże rozbieżności w podejściu do doświadczalnej oceny parametrów przepuszczalności. Znacznie utrudnia to możliwości porównania wyników badań, co w konsekwencji rzutuje na trudności w możliwościach adaptacji już istniejących modeli obliczeniowych. Dodatkowym problemem jest przy tym właściwa ocena charakteru przepływu oraz rzeczywistych parametrów przepływowych wynikających ze struktury porowatego złoża.

Przedstawione w pracy wyniki badań hydrodynamiki przepływu gazu przez złoża porowate o szkieletowej strukturze mogą w wielu przypadkach zostać wykorzystane w obliczeniach procesowych dla technologii biogazowych, zwłaszcza w procesie biokonwersji w złożach adhezyjnych przy doborze szczepów mikroorganizmów dla osiągnięcia maksymalnej wydajności biogazu.

Bibliografia

- [1] Strzelecki T., Kostecki S., Żak S.: Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2008.
- [2] Piecuch T.: Równanie Darcy jako podstawa analizy teoretycznej szczególnych przypadków procesu filtracji. Rocznik Ochrona Środowiska, 2009, Vol. 11.

- [3] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.
- [4] Błaszczyk M.: Badanie procesów migracji substancji ropopochodnych i ich emulsji w strukturach porowatych. Rozprawa doktorska, Katedra Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2014.
- [5] Bębenek B., Bębenek H.: Straty energii w przepływach płynów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1987.
- [6] Amao A.M.: Mathematical model for Darcy Forchheimer flow with applications to well performance analysis. Master's thesis, Department of Petroleum Engineering, Texas Tech. University, 2007.
- [7] Ergun S.: Fluid flow through packed columns. Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania, Chemical Engineering Progress, 1952, Vol. 48, 2, 89-94.
- [8] Kembłowski Z., Michałowski S., Strumiłło C., Zarzycki R.: Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej, WN-T, Warszawa, 1985.
- [9] Wałowski G.: Hydrodynamika przepływu gazu przez złoża porowate. Praca doktorska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, 2015.
- [10] Brauer H.: Grundlagen der Einphasen - und Mehrphasen Strömungen. Verlag Sauerländer, Frankfurt am Main, 1971.
- [11] Warpechowski K., Jopkiewicz A.: Wyznaczanie współczynnika oporu przepływu w złożu koksu. Archiwum Odlewnictwa. PAN, Katowice, 2002, 2, 124-131.
- [12] Hehlmann J., Pietrasik E., Kujawska E., Bania D.: Aparat hybrydowy ze złożem ziarnistym w instalacji spalania odpadów. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik Ochrony Środowiska, Koszalin, 1999, Vol. 11, 281-297.
- [13] Mertas B., Sobolewski A., Różycki G.: Badania gazoprzepuszczalności warstwy plastycznej węgla jako czynnika wpływającego na wielkość generowanego ciśnienia rozprężania. Karbo, 2013, 2, 163-171.
- [14] Dyga R., Płaczek M.: Przepuszczalność i współczynnik inercji pian aluminiowych o komórkach otwartych. Inż. Ap. Chem., 2013, 52, 4, 300-301.
- [15] Blicharski J., Smulski R.: Stanowisko laboratoryjne wypierania się płynów w ośrodkach porowatych w aspekcie sekwestracji CO₂. AGH Drilling Oil Gas, 2012, Vol. 29, 1, 89-96.
- [16] Łukaszuk J., Molenda M., Szwed G.: Zależność oporu przepływu powietrza od gęstości złoża nasion. Acta Agrophysica, 2004, 4(1), 77-83.
- [17] Wong J.T.F., Chen Z., Ng C.W.W., Wong M.H.: Gas permeability of biochar-amended clay: potential alternative landfill final cover material. Environ. Sci. Pollut. Res. DOI 10.1007/s11356-015-4871-2.
- [18] Wałowski G., Filipczak G.: Ocena przepuszczalności materiału porowatego w warunkach barbotażu. Inż. Ap. Chem., 2012, 51, 6, 396-397.
- [19] Wałowski G., Filipczak G.: Ocena hydrodynamiki przepływu gazu przez ośrodek szczelinowo-porowaty. Inż. Ap. Chem. 2013, 52, 6, 581-582.
- [20] Wałowski G., Filipczak G.: Assessment of process conditions associated with hydrodynamics of gas flow through materials with anisotropic internal structure. Journal of Sustainable Mining 2016, 15, 156-169. Doi.org/10.1016/j.jsm.2017.03.003.
- [21] Wałowski G., Filipczak G.: Gazoprzepuszczalność materiałów porowatych o anizotropowej strukturze. Inż. Ap. Chem., 2016, 55, 6, 245-250.
- [22] Hansen T.E.: Flow in micro porous silicon carbide, master thesis, Technical University of Denmark, 2007.
- [23] Wałowski G., Filipczak G., Krause E.: Mat. konf. „Młodzi dla Techniki”, 2013. [w:] Wybrane problemy naukowo-badawcze chemii i technologii chemicznej. Politechnika Warszawska, Płock, 2013, 253. ISBN 978-83-62081-15-8.
- [24] Lambe T., Whitman R.V.: Mechanika gruntów. T. 1-2. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1978.
- [25] Szmigielski T.: Mat. konf. IX Konferencji Odlewniczej Technical 2006. Wyd. AGH, Kraków 2006, 43.

Praca wykonana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju realizowanego w programie BIOSTRATEG, umowa nr BIOSTRATEG1/269056/5/NCBR/2015 z dnia 11.08.2015 r.

INTERPRETATION OF GAS FLOW THROUGH ANISOTROPIC POROUS MATERIALS IN PHENOMENOLOGICAL TERMS

Summary

In the paper results of experiments on hydrodynamic assessment of gas flow through backbone (skeletal) porous materials with an anisotropic structure are presented. The research was carried out on materials of different petrographic characteristics, both natural origin (rocky, pumice) and process materials (coal char and coke). The study was conducted for a variety of hydrodynamic conditions, using air, as well as for nitrogen and carbon dioxide. As the basis of the hydrodynamics assessment of gas flow through porous material we adopted a gas stream as the results of pressure forcing such flow. The results of measurements indicate a clear effect of the type of material on the gas permeability, and additionally - as a result of its anisotropic internal structure - a significant effect of the flow direction on the value of gas stream.

Key words: porous material, anisotropy, coal char, biochar, biogas