

Model przepływu powietrza w ośrodku porowatym z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono eksperymentalną metodę wyznaczania współczynnika przepuszczalności K oraz jej numeryczną weryfikację. Pomiarów wykonano na specjalnie przygotowanym do tego celu stanowisku pomiarowym, ośrodek porowaty stanowiło złożo uformowane z kulek szklanych (ballotyna) o rozmiarze 5 mm. Do wyznaczenia wartości współczynnika K oraz współczynnika oporu kwadratowego zastosowano równanie Forchheimera. Przedstawione wyniki pomiarów mają posłużyć za podstawę do przeprowadzenia szeroko zakrojonej serii eksperymentów mających na celu określenie wpływu obecności źródła temperatury wewnątrz złoża porowatego na sposób wymiany masy w układzie materiał porowaty-powietrze.

Słowa kluczowe: materiał porowaty, równanie Forchheimera

Wstęp

Począwszy połowy XIX w, kiedy H. Darcy sformułował prawo filtracji na podstawie badań przepuszczalności warstw piasku dla wody, szereg opracowań naukowych starało się przybliżyć a w niektórych przypadkach sprecyzować opis zjawisk towarzyszących przepływowi płynu przez ośrodek porowaty.

Podstawowe równanie, zwane równaniem Darcy, opisujące zależność prędkości przepływu płynu przez ośrodek porowaty w funkcji straty ciśnienia przez lata ulegało modyfikacjom polegającym głównie na rozszerzaniu zakresu jego stosowalności.

Pomimo upływu lat od czasu sformułowania podstawowego prawa filtracji szereg współczynników w dostępnych obecnie modelach transportu masy i energii w materiale porowatym w dalszym ciągu jest wyznaczana eksperymentalnie, a różnice w ich wartościach sięgają od kilku do kilkudziesięciu procent. Stąd też istnieje konieczność dalszego rozwoju metod eksperymentalnych w tej dziedzinie, szczególnie dla niestandardowych konfiguracji geometrycznych.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych przepływu powietrza w ośrodku porowatym utworzonym ze złoża ballotyny o średnicy 5 mm. Przedstawione wyniki stanowią podstawę do zaprojektowania szeroko zakrojonego planu eksperymentów laboratoryjnych oraz numerycznych mających przybliżyć opis zjawisk związanych z transportem masy i energii w materiałach porowatych.

Równania opisujące przepływ płynu w ośrodkach porowatych

Z uwagi na różnorodność oznaczeń stosowanych w literaturze w niniejszym artykule zdecydowano się na wprowadzenie następujących oznaczeń:

- u – prędkość przepływu płynu w materiale porowatym, tzw. prędkość porowa [m/s],
- U – uśredniona objętościowo prędkość przepływu płynu [m/s],
- K – współczynnik przepuszczalności [m²],
- ε – porowatość [-],
- μ – współczynniki lepkości dynamicznej [Pa s],
- ν – współczynnikiem lepkości kinematycznej [m²/s],

Ogólną postać prawa Darcy w trójwymiarowym układzie odniesienia dla anizotropowego medium porowatego można zapisać w następujący sposób:

$$\vec{u} = \mu^{-1} \vec{K} \nabla P \quad [1]$$

gdzie:

\vec{K} – jest tensorem drugiego rzędu przepuszczalności,
 ΔP – gradient ciśnienia.

Dla przepływu płynu przez medium izotropowe powyższe równanie upraszcza się do postaci:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \vec{u} \quad [2]$$

w której K oznacza współczynnik przepuszczalności [m^2].

Powyższe równanie obowiązuje w zakresie prędkości „dostatecznie małych” to znaczy takich, dla których wartość liczby Reynoldsa w której wymiarem charakterystycznym jest wartość średnicy cząstki fazy stałej:

$$Re_d = \frac{u d_p}{\nu} \quad [3]$$

jest mniejsza bądź równa 1.

Dla przepływów o $Re_d > 1$ odnotowuje się odstępstwa od prawa Darcy spowodowane wzrastającym udziałem dodatkowego czynnika którym jest opór kwadratowy przepływu. To zjawisko jest opisane w równaniu Dupuit-Forchheimera którego ogólna postać przedstawia równanie [4]

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \vec{u} + c_F K^{-1/2} \rho_f |\vec{u}| \vec{u} \quad [4]$$

Jak można zauważyć równanie [4] jest rozszerzeniem podstawowego równania Darcy [1] o człon opisujący wpływ oporu kwadratowego na spadek ciśnienia w złożu porowatym. Postać równanie [4] została zaproponowana przez Warda w 1964 roku i przez wielu autorów jest uznawana jako obowiązująca (Bejan, Nield, 2006).

Występujący w równaniu [4] wyraz c_F oznacza tzw. bezwymiarowy współczynnik Forchheimera. W początkowym okresie uważano, że wartość tego współczynnika jest stała, wynosząca 0.55, jednakże późniejsze badania (Beavers i in., 1973) wykazały, że współczynnik c_F zmienia się zgodnie z zależnością [5].

$$c_F = 0.55 \left(1 - 5.5 \frac{d}{D_h} \right) \quad [5]$$

w której

d – średnica cząstek fazy stałej,

D_h – średnica hydrauliczna złoża porowatego.

Pomimo tego część autorów używa stałej wartości współczynnika c_F wynoszącej 0.55. Jest to uzasadnione jeżeli stosunek $d/D_h \ll 1$ co ma miejsce w przypadku złoża porowatego utworzonego z bardzo małych cząstek stałych.

W przedstawionych powyżej równaniach występuje szczególnie istotna wielkość – współczynnik przepuszczalności K . Prawidłowe wyznaczenie wartości tego współczynnika jest podstawowym zagadnieniem w opisie przepływu płynu przez materiał porowaty.

Istnieje szereg metod wyznaczania wartości współczynnika K . Jedną z ciekawszych jest wyznaczenie K w ujęciu deterministycznym.

Jeżeli założyć że K jest cechą danego materiału porowatego i zależy tylko od jego wielkości geometrycznych, to wychodząc z teorii promienia hydraulicznego Karmana-Kozeny, wprowadzając efektywną średnicę cząstki fazy stałej D_p dochodzi się do zależności (Dullien, 1992)

$$K = \frac{D_p^3 \varepsilon^3}{180(1 - \varepsilon)^2} \quad [6]$$

gdzie:

$$D_{p2} = \frac{\int_0^{\infty} D_p^3 f(D_p) dD_p}{\int_0^{\infty} D_p^2 f(D_p) dD_p} \quad [7]$$

wyrazy D_p^2 oraz D_p^3 oznaczają odpowiednio momenty rzędu drugiego i trzeciego zmiennej losowej opisującej rozkład statystyczny średnic cząstek fazy stałej a $f(D_p)$ jest funkcją gęstości rozkładu średnic cząstek fazy stałej.

Przedstawiona zależność [6] jest o tyle interesująca, że wyznaczona na jej podstawie wartość K dość dobrze zgadza się z wynikami danych eksperymentalnych, jednakże Wyznaczenie z niej wartości współczynnika K wymaga dobrej znajomości rozkładu statystycznego średnic cząstek fazy stałej.

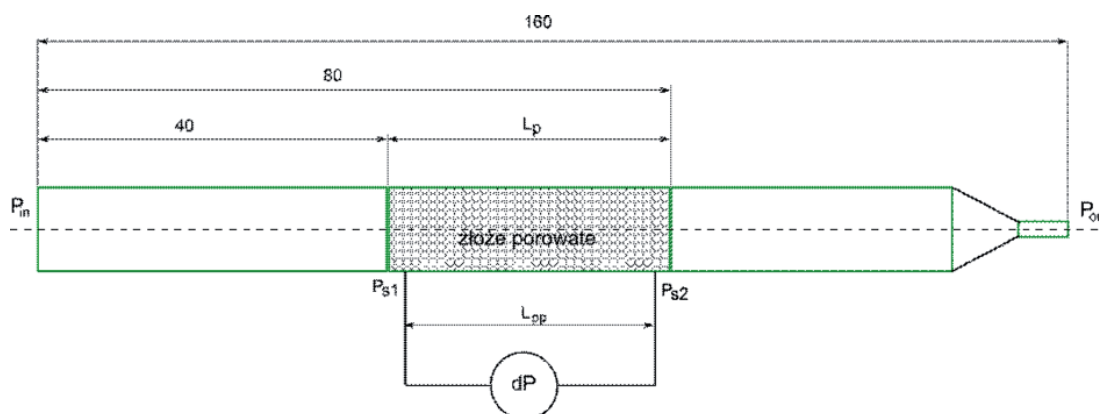
W związku z tym wydaje się że łatwiejszym sposobem wyznaczenia wartości współczynnika przepuszczalności jest wykonanie odpowiedniego eksperymentu podstawowego.

Eksperyment podstawowy

Celem eksperymentu było określenie wartości spadku ciśnień oraz prędkości przepływu powietrza w złoże porowate. Na podstawie znajomości tych wielkości można określić wartość współczynnika K , korzystając ze wzoru Forchheimera [4].

Budowa stanowiska

Omawiany eksperyment został przeprowadzony na stanowisku, którego schemat, wraz z głównymi wymiarami zamieszczono na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska do określania wartości współczynnika K

W skład stanowiska wchodził przewód o przekroju kołowym o średnicy 110 mm i długości całkowitej $L = 1300$ mm, w odległości 40 mm od przekroju wlotowego umieszczono odcinek pomiarowy wypełniony medium porowatym – ballotyną o średnicy 5 mm. Złoże porowate miało długość całkowitą $L_p = 40$ mm. w odległości 50 mm od przekroju początkowego złoży w głąb, umieszczono króciec pomiarowy P_{s1} a w odległości 50 mm od przekroju końcowego złoży króciec pomiarowy P_{s2} . Do napędu stanowiska użyto wentylatora wysokociśnieniowego ($P_{max} = 1.2$ kPa), którego prędkość obrotowa wirnika była zadawana przy pomocy inwertera częstotliwości.

Seria pomiarów obejmowała wyznaczenie spadku ciśnienia na długości L_{pp} z równoczesnym pomiarem prędkości strugi powietrza w przekroju wylotowym. Z uwagi na konieczność zwiększenia dokładności pomiaru prędkości szczególnie dla małych różnic ciśnień przekrój wylotowy był zmniejszony w stosunku do wlotowego o $A_2/A_1 = 0.022$.

Wyniki eksperymentu przedstawiono w formie wykresu zamieszczonego na Rys. 2, na którym wykreślono również przebieg funkcji dopasowującej.

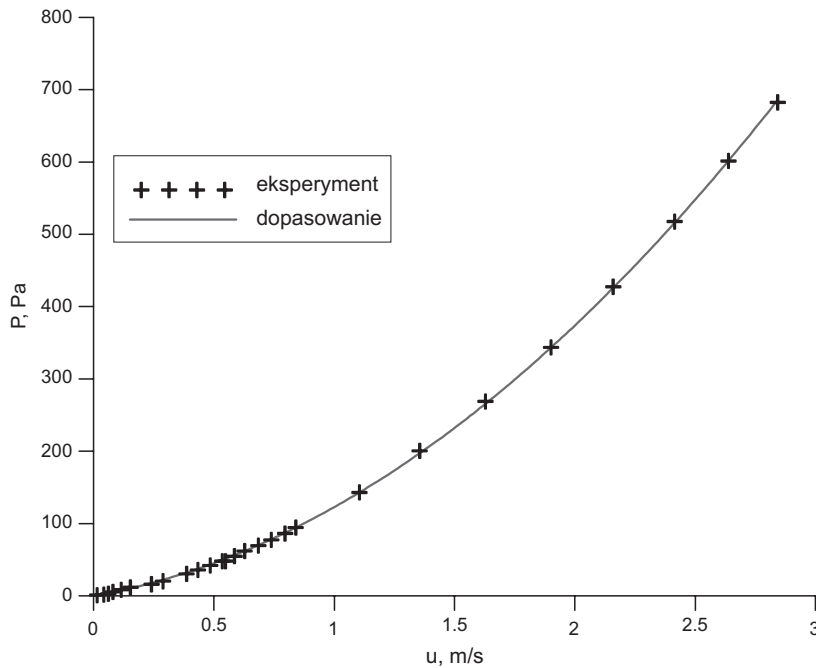
Na podstawie wyników dopasowania funkcją $y = ax + bx^2$ wyznaczono współczynniki równania $a = 58.33$ $b = 64.33$. Znajomość wartości współczynników a i b umożliwia wyznaczenie z zależności [4] wartości $K = 1.52 \cdot 10^{-7} \text{m}^2$, oraz $c_f K^{-1/2} = 105 \text{ 1/m}$.

Dysponując wyznaczoną wartość współczynnika przepuszczalności można wykonać dokładniejszą analizę opisywanego przypadku posługując się w tym celu analizą przebiegów bezwymiarowego ciśnienia p [8] w funkcji liczby Reynoldsa Re_K [9] w której wymiarem charakterystycznym jest \sqrt{K} :

$$p = \frac{\Delta P}{L_p} \frac{\sqrt{K}}{\rho u^2} \quad [8]$$

$$Re_K = \frac{u \sqrt{K}}{\nu} \quad [9]$$

Analizę przedstawiono w formie graficznej na Rys. 3 (Bejan, Nield, 2006), na którym zamieszczono wyniki bieżącego eksperymentu.

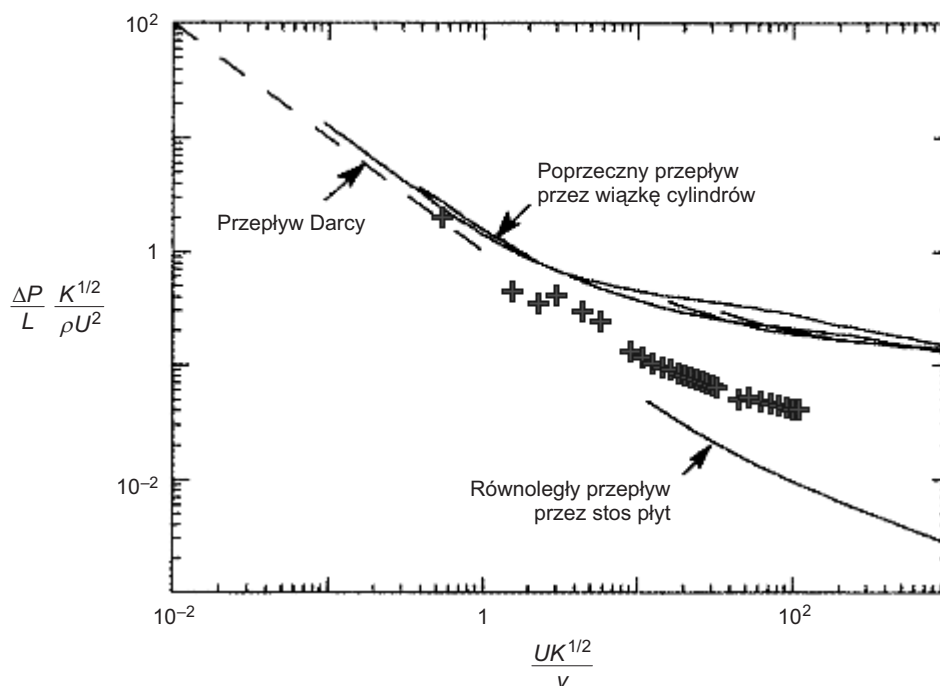


Rys. 2. Graficzna reprezentacja wyników eksperymentu

Wykres zamieszczony na Rys. 3 zawiera zebrane dane eksperymentalne wykonane przez Bejana i Morega dotyczące przepływu powietrza przez wymienniki z uwagi na wymiary traktowane jako ośrodek porowaty. Górny zbiór krzywych dotyczy poprzecznego opływu pęku cylindrów naprzemianległych (staggered cylinder) dolny stosu równoległych płyt umieszczonych w kanale przepływowym. Dane dotyczące bieżącego eksperymentu naniesiono na wykres przy pomocy krzyżyków.

Istotną informacją zwartą na Rys.3 jest to, że pierwszy punkt pomiarowy dla odpowiadającej mu liczbie Reynoldsa $Re_K = 0.546$ leży w zakresie stosowalności prawa Darcy, tak więc zasadniczo na znajomości spadku ciśnienia oraz prędkości porowej można oprzeć wyznaczenie wartości współczynnika K . Wyznaczona w ten sposób wartość $K = 2.86 \cdot 10^{-7} \text{m}^2$, różni się od wartości wyznaczonej z całego przebiegu. Różnice w wartościach współczynników K zostaną omówione w dalszej części artykułu. Do dalszych rozważań przyjęto $K = 1.52 \cdot 10^{-7} \text{m}^2$.

Kolejnym krokiem była analiza numeryczna omawianego przypadku dla wyznaczonej wartości współczynnika przepuszczalności K oraz porowatości złoża $\varepsilon = 0.3$



Rys. 3. Reprezentacja przepływu w porowatym medium

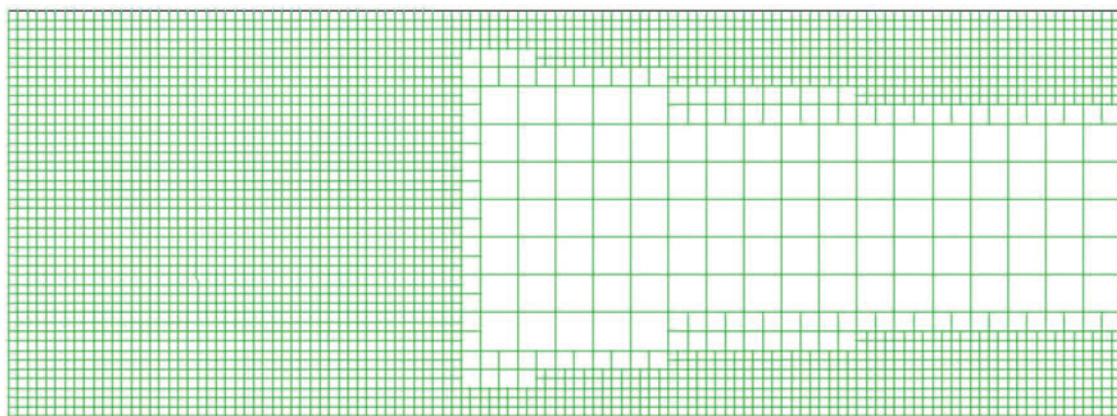
Analiza numeryczna. Zastosowanie komercyjnego kodu – Fluent

Obliczenia sprawdzające wykonano w pakiecie programów Ansys Fluent.

W pierwszej kolejności, w preprocesorze stworzono model siatki obliczeniowej dla omawianej geometrii. Ponieważ rozwiązanie numeryczne dowolnego zagadnienia przepływowego nie może być zależne od rodzaju dyskretyzacji domeny obliczeniowej dlatego w pierwszej kolejności należy zbadać wrażliwość rozwiązania na przyjętą siatkę obliczeniową.

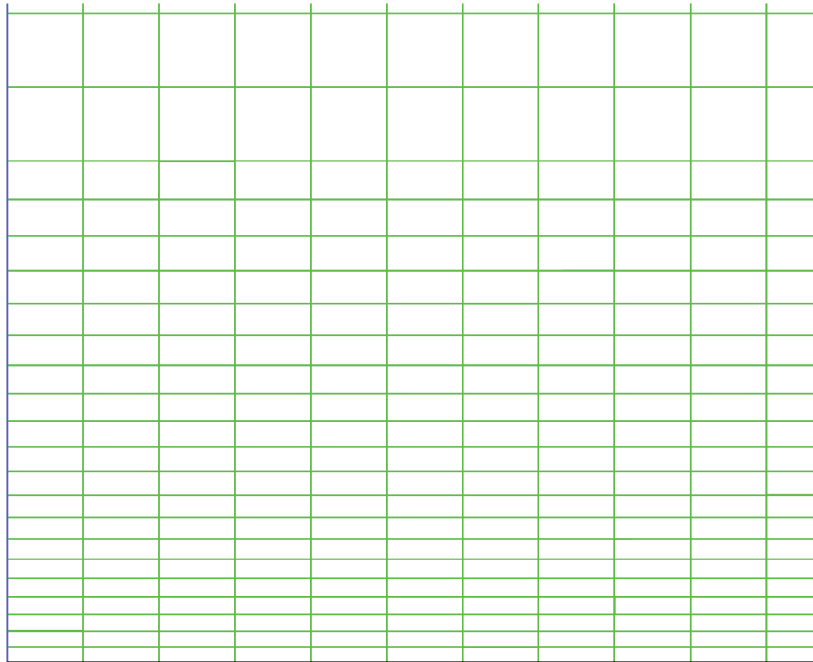
Dla omawianego przypadku dwa parametry przepływowe są szczególnie istotne. Prędkość oraz spadek ciśnienia na długości złoża porowatego. Kryterium poprawności siatki zostało więc określone na podstawie tych dwóch wielkości.

Wykorzystując wbudowane funkcje adaptacyjne programu Fluent, rozwiązując kolejne przykłady z zaadaptowaną siatką (Rys. 4) zdecydowano się na zastosowanie w końcowej wersji modelu numerycznego siatkę strukturalną typu quad, z uwzględnieniem obszaru przyściennego, dla którego wyznaczony parametr $y^+ = 1.9$, oraz wielkością elementu zawierającego się w przedziale $0.025 - 0.5 d_p$, gdzie d_p oznacza średnicę ziarna fazy stałej. fragment siatki został zamieszczony na rys. 5.



Rys. 4. Fragment zaadaptowanej siatki obliczeniowej

Po przygotowaniu modelu geometrycznego przystąpiono do formułowania warunków brzegowych.



Rys. 5. Fragment siatki obliczeniowej przygotowanej do obliczeń

Program obliczeniowy Fluent traktuje przepływ przez medium porowate jako dodatkowy człon (upust) w równaniu zachowania pędu.

W związku z tym istnieją pewne założenia oraz ograniczenia stosowalności modelu (Fluent User Manual, 2006):

- Z uwagi na to, że efekt blokowania objętości porowatej obecny w przepływie rzeczywistym nie jest ujęty w modelu w związku z tym solver domyślnie operuje prędkością U , opartą na objętościowym strumieniu przepływu.
- Zjawiska związane z turbulencją w przepływie przez medium porowate są aproksymowane
- Wartość współczynnika pojemności cieplnej c_p musi być wartością stałą.

Całość obliczeń została wykonana przy założeniu przypadku przepływu turbulentnego. To założenie było konieczne ze względu na charakter przepływu płynu w omawianej geometrii.

Został użyty model $k-\omega$ -SST z uwagi na dokładniejsze niż w modelu $k-\varepsilon$ rozwiązywanie pól prędkości charakteryzujących się występowaniem dużych gradientów ciśnienia i prędkości (Skotniczny, 2007).

Dodatkowy człon źródłowy w równaniach ruchu przyjmuje ogólną postać [10].

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u_j^2 \right) \quad [10]$$

W przypadku rozpatrywania przepływu w medium homogenicznego, a więc takiego o którym jest mowa w omawianym przykładzie, powyższa postać równania może być napisana w formie:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{K} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho u_i^2 \right) \quad (11)$$

Dyskusja wyników

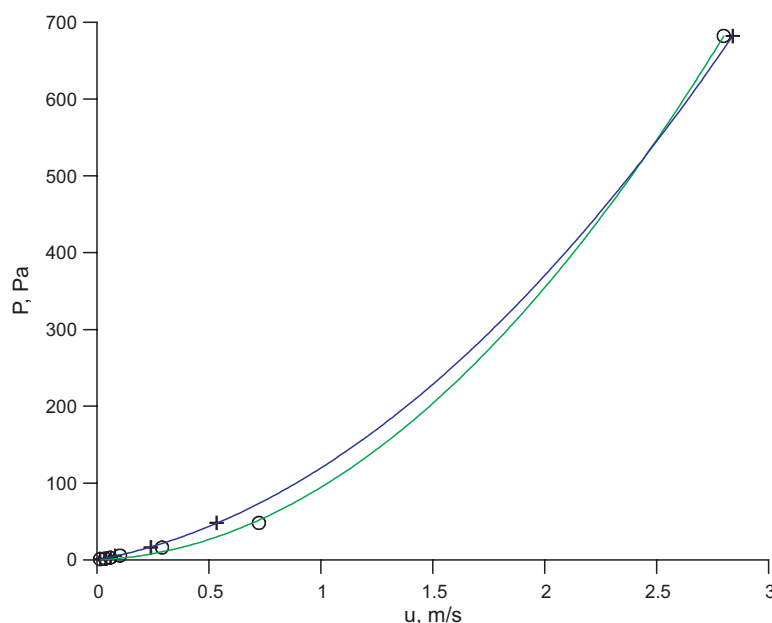
Analiza numeryczna została przeprowadzona dla 6 przypadków przepływowych, dla wyliczonej wartości współczynnika przepuszczalności K , oraz porowatości ε .

Warunek brzegowy wlotowy został ustawiony typu „wlot ciśnienia”, a wylotowy, przez analogię „wylot ciśnienia”. Wartości ciśnień zmierzonych przedstawia Tab. 1.

Tab. 1. Wartości ciśnień na wlocie

Nr eksperymentu	P_{in} , Pa
1	1,04
2	2,77
3	5,39
4	15,94
5	48,04
6	682,4

Dla każdego przypadku obliczeniowego została wyznaczona prędkość wewnątrz złoża porowatego u . Zestawienie wyników w formie wykresu składającego się z przebiegów spadku ciśnienia statycznego w funkcji prędkości porowej u zamieszczono na Rys. 6.



Rys. 6. Zestawienie wyników eksperymentalnych z wynikami numerycznymi

Jak można zauważyć analizując przebieg krzywych na Rys. 6, występują istotne różnice w wartościach prędkości dla eksperymentu i rozwiązania numerycznego. Jest to szczególnie dobrze widoczne w zakresie mniejszych prędkości porowej.

Przyczyn takiego stanu rzeczy może być kilka. Za najbardziej prawdopodobną należy uznać niedokładnie dane pomiarowe. Dokładność zmierzonych wielkości w przypadku przepływu przez medium porowate zależy w dużej mierze od jakości wykonanego stanowiska a w szczególności od jego szczelności.

W przypadku przeprowadzania eksperymentów w których płynem jest ciecz wszelkie nieszczelności są widoczne a ich wpływ na uzyskane wyniki może być mniejszy z uwagi na większą gęstość i lepkość oraz mniejszą ściśliwość cieczy. W przypadku przepływu powietrza dla którego wykonanie poprawnego eksperymentu zawsze jest trudniejszy od np. wody, występowanie nieszczelności zazwyczaj powoduje indukcje przepływów pulsacyjnych oraz innych niestacjonarności w przepływie, które uniemożliwiają skuteczny i pozbawiony błędów pomiar.

W tym miejscu przykładem może być zauważona wcześniej różnica pomiędzy wyznaczonymi wartościami współczynnika K z zależności Forchheimera [4] oraz z punktowego pomiaru dla małej wartości Δp z równania Darcy [2]. Równanie Forchheimera nie neguje słuszności prawa Darcy jedynie je rozszerzając, a więc wartości K wyznaczone dla zakresu stosowności prawa Darcy powinny być takie same jak dla rozszerzonego zakresu opisywanego przez równanie Forchheimera. W przypadku gdy tak nie jest należy przede wszystkim szukać przyczyny w wartościach wyznaczonych eksperymentalnie.

Kolejnym czynnikiem, który może powodować różnice w obrazie przepływu przez złożę porowate pomiędzy danymi eksperymentalnymi i numerycznymi może być sposób wyznaczania współczynników K oraz $c_F K^{-1/2}$.

Człon źródłowy opisujący transport pędu w ośrodku porowatym w przytoczonej postaci [11] jest zbliżony formą do równania [4]. Różnice polegają na sposobie przedstawienia członu odpowiadającego za zjawisko oporu kwadratowego. W przypadku równania [4] człon ten jest w postaci $\frac{c_F}{\sqrt{K}} \rho_f u^2$, podczas gdy Fluent używa postaci: $\frac{1}{2} C_2 \rho_f u^2$. Należy więc sądzić, że zgodność wartości współczynników przy wyrazie u^2 zapewni wyrażenie $\frac{2c_F}{\sqrt{K}}$. W rzeczywistości współczynnik C_2 wyznaczony zgodnie z zaleceniami Fluenta (Fluent User Manual, 2006) wynosi $C_2 = 266,4$ 1/m, a współczynnik wyznaczony z równania [4] $\frac{c_F}{\sqrt{K}} = 98,2$ 1/m. Korygując wartość współczynnika z równania [4] otrzymano $\frac{2c_F}{\sqrt{K}} = 196,4$ 1/m. Wartość ta pomimo tego, że w dalszym ciągu jest mniejsza od wartości C_2 to zaobserwowana różnica jest wytłumaczalna niedokładnymi danymi pomiarowymi a przez to nieprecyzyjnym wyznaczeniem wartości K .

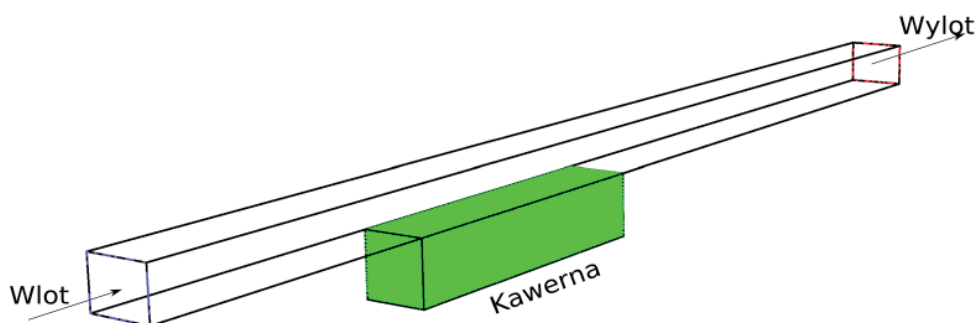
Dodatkowym czynnikiem, który może budzić wątpliwość jest sama konstrukcja stanowiska pomiarowego. Jak można zaobserwować na Rys. 1 koniec kanału pomiarowego uformowany jest w kształcie konfuzora o współczynniku przewężenia równym 4. Stosowanie tak silnej kontrakcji może powodować dodatkowe opory w przepływie powietrza przez kanał a co jest z tym związane może mieć wpływ na wartość mierzonych ciśnień i prędkości.

Eksperyment główny

Powyższe badania eksperymentalne oraz numeryczne mające na celu wyznaczenie koniecznych do obliczeń wartości współczynników K oraz C_2 (zgodnie z nomenklaturą Fluenta) dla złoża ballotyny o średnicy 5 mm stanowią podstawę do dalszych znacznie bardziej skomplikowanych pomiarów. Celem tych pomiarów ma być opis mechanizmów transportu masy i energii w konfiguracji odmiennej niż omawiana.

Ideą eksperymentu jest symulacja omywania złoża porowatego przez przepływające powietrze. Podobna sytuacja ma miejsce w kompleksie zroby-wyrobisko ścianowe w kopalniach węgla kamiennego. Zbliżone warunki przepływowe mają również miejsce w przypadku przepływów powietrza wokół zwałowisk odpadów pogórnich, w szczególności podpoziomowych.

Stanowisko przedstawione na Rys. 7 składa się z 3 metrowej długości tunelu o przekroju prostokątnym $0,2 \times 0,15$ m. W odległości 1 m od przekroju wlotowego tunel rozszerza się gwałtownie tworząc prostokątną „kawernę” o wymiarach $0,2 \times 0,2 \times 1$ m, wypełnioną materiałem porowatym. Wewnątrz złoża porowatego



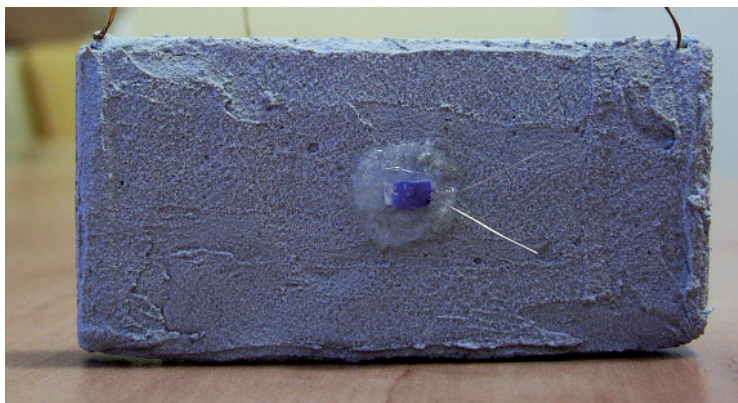
Rys. 7. Schemat stanowiska używanego w eksperymencie głównym

umieszczona zostanie grzałka (Rys. 9, 10) której zadaniem jest utrzymywanie stałej temperatury na poziomie 100°C. Fotografia stanowiska zaprezentowana jest na Rys. 8.

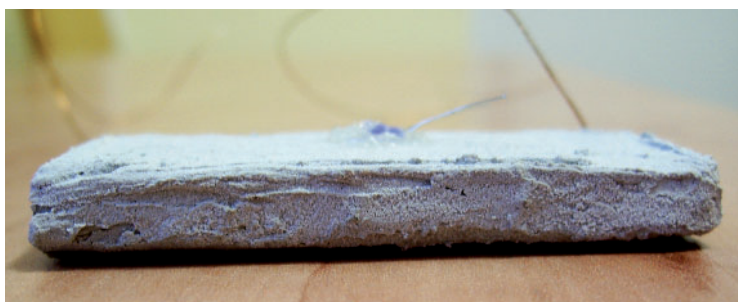
Konstrukcja stanowiska umożliwi pomiar w zarówno w pionowej jak i po niewielkich modyfikacjach poziomej pozycji omywania złoża porowatego.



Rys. 8. Widok stanowiska pomiarowego do eksperymentu głównego



Rys. 9. Grzałka – widok z przodu



Rys. 10. Grzałka – widok z dołu

Eksperyment ma obejmować wyznaczenie pól temperatur wewnątrz, a w późniejszym etapie również i na zewnątrz złoża porowatego oraz skorelowanie tych wielkości z mierzoną prędkością przepływu powietrza w tunelu.

Pierwsze obliczenia numeryczne przeprowadzane na siatce testowej 0.125 mm, dla warunków brzegowych:

$$U_{in} = 0.6 \text{ m/s,}$$

$$\varepsilon = 0.3,$$

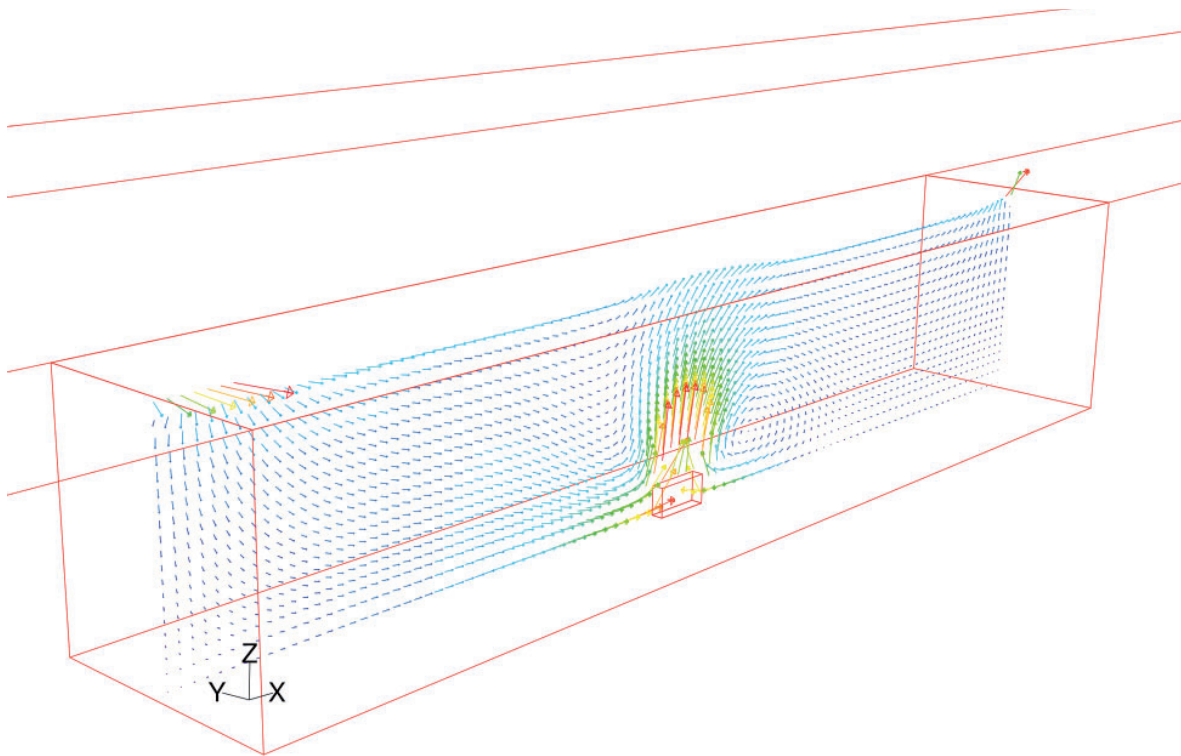
$$K = 1.53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2,$$

$$T = 239 \text{ K}$$

dają ogólny pogląd na proces transportu energii w materiale porowatym.

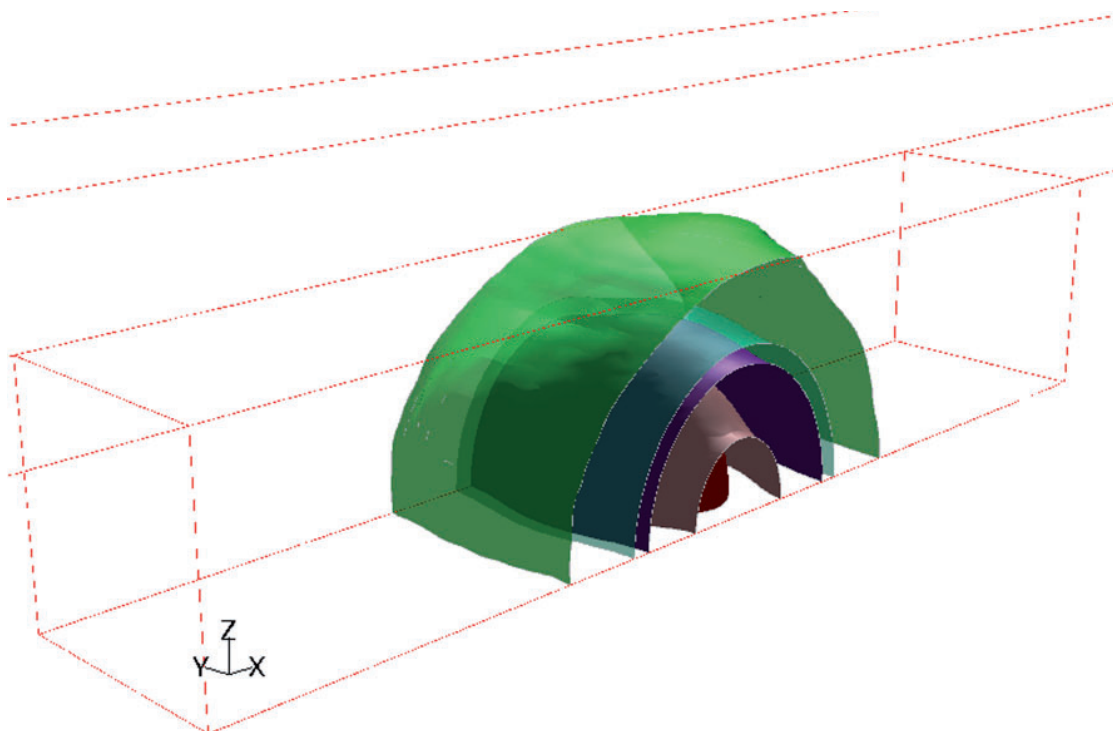
Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji przepływu powietrza w omawianej geometrii, które pozwalają na wstępne oszacowanie skali zjawiska co może być przydatne przy procesie projektowania eksperymentu właściwego.

Na Rys. 11 zamieszczono rozkład wektorów prędkości wewnątrz materiału porowatego. Pole prędkości przepływu powietrza penetrującego materiał porowaty w pobliżu źródła ciepła, zgodnie z oczekiwaniami jest zaburzone konwekcyjnym transportem masy spowodowanym zmianą gęstości powietrza. Zwraca uwagę podwyższona w stosunku do reszty obszaru prędkość konwekcyjna, która ułatwia transport ciepłego powietrza na zewnątrz obszaru porowatego.



Rys. 11. Wektory prędkości w przekroju podłużnym kawerny

Ponieważ założonym materiałem porowatym jest ballotyna, która z racji kształtu ziaren jak i składu chemicznego może być traktowana jako materiał izotropowy, rozkład temperatur wewnątrz utworzonego z niej złoża powinien być jednorodny, co znajduje potwierdzenie w wyznaczonym numerycznie rozkładzie temperatur zamieszczonym na rys. 12.



Rys. 12. Izotermy w materiale porowatym

W aspekcie doświadczeń związanych z przepływem powietrza przez materiał porowaty stanowisko wymaga bardzo dokładnego „zestrojenia” polegającego głównie na precyzyjnym dopasowaniu wszystkich jego elementów.

Na chwilę obecną oprócz skonstruowania stanowiska pomiarowego wraz z wentylatorem, po szeregu prób z różnymi materiałami została wykonana grzałka z drutu manganinowego nawiniętego na alundowym rdzeniu, w całości otoczona pastą ceramiczną o temperaturze rozkładu 1200°C, która może sprostać zadaniu utrzymania stałej temperatury podczas trwania całego eksperymentu.

Planowany zakres badań będzie obejmował wyznaczenie rozkładów prędkości i temperatur w zadanej geometrii, dla różnych wartości współczynnika przepuszczalności – będzie to realizowane poprzez zmienianie sortu kulek ballotyny, wpływu pozycji źródła ciepła (grzałki) wewnątrz złoża porowatego na intensywność wymiany energii, oraz w późniejszej fazie modyfikację pozycji opływanego złoża.

Poprawnie przeprowadzony eksperyment będzie służył kalibracji modelu numerycznego, co stanowi dalszą część rozpoczętych badań.

Wnioski

Opierając się na wynikach dotychczasowo przeprowadzonych badań podstawowych, oraz ich weryfikacji numerycznych można zauważyć następujące zależności:

1. Stanowisko pomiarowe do badań podstawowych musi zostać przekonstruowane. Wyznaczone wartości spadków ciśnień oraz w szczególności prędkości na wylocie ze złoża porowatego, z powodu nieszczelności układu zostały zmierzone z trudnym do określenia błędem.
2. Wartości współczynnika C_2 wyznaczonego z danych eksperymentalnych wymaga korekcji w stosunku do jego wartości wyznaczonej zgodnie z Instrukcją Użytkownika pakietu Fluent.

Ponadto powyższe analizy danych eksperymentalnych i numerycznych wskazują na konieczność dopracowania stanowiska pomiarowego stosowanego w eksperymencie głównym szczególnie w zakresie dokładności wykonania połączeń oraz współosiowości poszczególnych elementów składowych tunelu i komory.

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

Literatura

- D.A.Nield, A. Bejan. *Convection in Porous media*, Springer, 2006.
M.J.S. de Lemos. *Turbulence in Porous Media*, Elsevier, 2006.
J.C. Ward. *Turbulent flow in Porous Media*, ASCE, J. Hydraul. Div., 1964.
Fluent User Manual, Fluent, 2006.

Model of an air flow through the porous bed with internal heat sources

Abstract

Presented paper discusses, an experimental method in prediction of K coefficient as well as its numerical verification. The measurements has been taken using specialized test bed, where porous bed was configured with 5 mm diameter glass balls. For determination of K coefficient as well as quadratic drag coefficient the Forchheimer equation has been used. Presented data are base for the further experiments concerning mass and heat exchange in porous bed – air complex.

Keywords: Porous material, Forchheimer equation

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Wacław Trutwin*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN