

Określenie prędkości poślizgu przy stycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

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

Streszczenie

W procesach wymiany masy i energii pomiędzy ośrodkiem płynnym a porowatym, szczególnie podczas stycznego przepływu strugi płynu w stosunku do powierzchni ośrodka porowatego kluczową rolę odgrywa właściwe określenie warunków przepływowych odbywających się wewnątrz materiału porowatego. Właściwa ich ocena wpływa na poprawne wyznaczenie parametrów określających wymianę masy pomiędzy tymi dwoma ośrodkami. Z uwagi na trudności natury technicznej, bezpośredni pomiar prędkości przepływu płynu wewnątrz złoża w funkcji odległości od powierzchni rozdziału płyn-złoże porowate jest niezwykle trudny do wykonania. Dostępne dane literaturowe ograniczają się do opisów wyników badań numerycznych opisywanego zagadnienia i opierają się na wczesnych badaniach eksperymentalnych z połowy ubiegłego wieku (Beavers i Joseph, 1967).

Przeprowadzane poprzednio przez autora prace eksperymentalne (Skotniczny, 2010) wykazały brak zgodności pomiędzy danymi eksperymentalnymi a numerycznymi w pewnym zakresie prędkości strugi przepływającej nad złożem porowatym.

W bieżącej pracy skoncentrowano się na wyznaczeniu profilu prędkości strugi powietrza poruszającej się stycznie do powierzchni rozdziału, oraz na próbie korelacji uzyskanych wyników z dostępnymi danymi literaturowymi i rozwiązaniami numerycznymi dla wybranych modeli turbulencji.

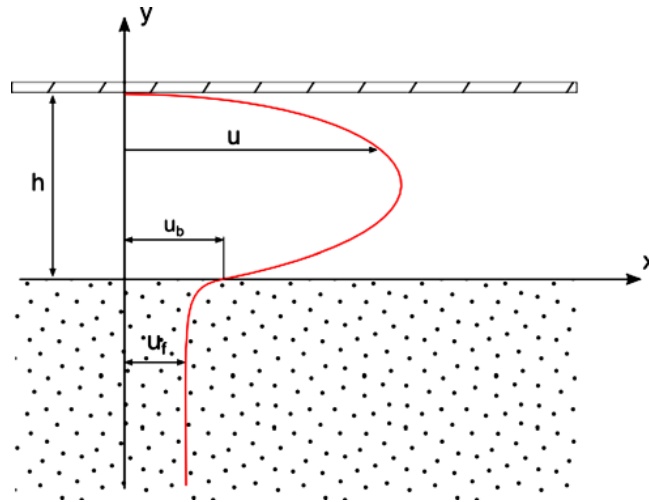
Słowa kluczowe: złożo porowate, przepływ styczny, warstwa łącząca

Wstęp

W przepływie stycznym płynu rzeczywistego nad złożem porowatym na granicy dwóch ośrodków, analogicznie do przepływu płynu w pobliżu nieprzepuszczalnej przegrody tworzy się charakterystyczny obszar zwany warstwą przyścienną. W przeciwieństwie do klasycznego zagadnienia mechaniki płynów opisującego tworzenie się warstwy przyściennej w pobliżu nieprzepuszczalnej powierzchni w przypadku obszaru na granicy ośrodka porowatego i omywającej go strugi płynu występuje warunek niezerowej wartości składowej stycznej wektora prędkości – tak zwana prędkość poślizgu u_b . Znajomość jej wartości na równi ze znajomością rozkładu prędkości w strudze swobodnej i w materiale porowatym stanowi podstawę właściwego określenia warunków wymiany zarówno masy jak i energii pomiędzy złożem porowatym a omywającą go strugą płynu.

Badania mające na celu określenie powyższych parametrów trwają od ponad 40 lat. Prekursorem w dziedzinie eksperymentalnego określenia prędkości poślizgu u_b oraz rozkładu prędkości nad złożem porowatym uznaje się Beaversa i Josepha.

Eksperyment przeprowadzony przez Beaversa i Josepha polegający na symultanicznym wyznaczeniu wartości masowego natężenia przepływu płynu w złożu porowatym i przestrzeni nad złożem (Beavers i Joseph, 1967) stał się podstawą do rozpoczęcia szeroko zakrojonej dyskusji na temat właściwego sformułowania warunku brzegowego na styku dwóch ośrodków. Autorzy omawianej pracy w celu określenia warunku brzegowego na styku dwóch ośrodków rozważali prostoliniowy, dwuwymiarowy przepływ płynu lepkiego przez kanał (przepływ Poiseuill'a) utworzony przez nieprzepuszczalną górną ścianę ($y = h$) i przepuszczalną dolną ($y = 0$) (rys. 1.)



Rys. 1.

Przyjęto, że składowa gradientu ciśnienia dP/dx jest równomierna zarówno w kanale jak i w złożu porowatym, oraz przepływ płynu w obrębie złoża porowatego jest opisany równaniem Darcy, który w przypadku zaniedbania sił masowych przyjmuje postać

$$u_f = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad [1]$$

gdzie

- k – przepuszczalność materiału złoża,
- μ – współczynnik lepkości dynamicznej,
- u_f – objętościowy strumień przepływu przypadający na jednostkowe pole przekroju poprzecznego złoża – czyli prędkość filtracji.

Dodatkowo założono że:

- wartość prędkości poślizgu u_b różni się od średniej wartości prędkości filtracji u_f ,
- naprężenia ścinające są transportowane do wewnątrz materiału porowatego przez obszar przyścienny,
- w obszarze warstwy przyściennej prędkość zmienia się gwałtownie z wartości u_b na granicy ośrodków do wartości u_f wewnątrz złoża określonej równaniem [1].
- Wartość prędkości poślizgu u_b dla przepływu w kanale jest proporcjonalna do wartości naprężeń stycznych w płaszczyźnie rozdziału, w związku z tym warunek brzegowy na styku dwóch ośrodków został sformułowany zgodnie z równaniem [2].

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{0^+} = \beta (u_b - u_f) \quad [2]$$

gdzie

- 0_+ – punkt graniczny warstwy przyściennej utworzonej w przepływie w kanale,
- β – współczynnik proporcjonalności.

Beavers i Joseph poprzez analizę wymiarową wykazali, że współczynnik β zależy tylko i wyłącznie od parametrów złoża porowatego i posiada wymiar L^{-1} , a ponieważ skalą długości dla złoża porowatego jest jego współczynnik przepuszczalności k , w związku z tym wartość współczynnika β można zaisać jako

$$\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{k}} \quad [3]$$

Gdzie α jest bezwymiarową wielkością charakteryzującą strukturę złoża porowatego w obrębie obszaru przyściennego.

Dla przepływu Poiseuilla równanie zachowania pędu przyjmuje następującą postać

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad [4]$$

z warunkami brzegowymi:

$$\begin{aligned} u &= 0 \quad \text{dla } y = h, \\ \frac{du}{dy} &= \frac{\alpha}{\sqrt{k}}(u_b - u_f) \quad \text{dla } y = 0 \end{aligned} \quad [4a]$$

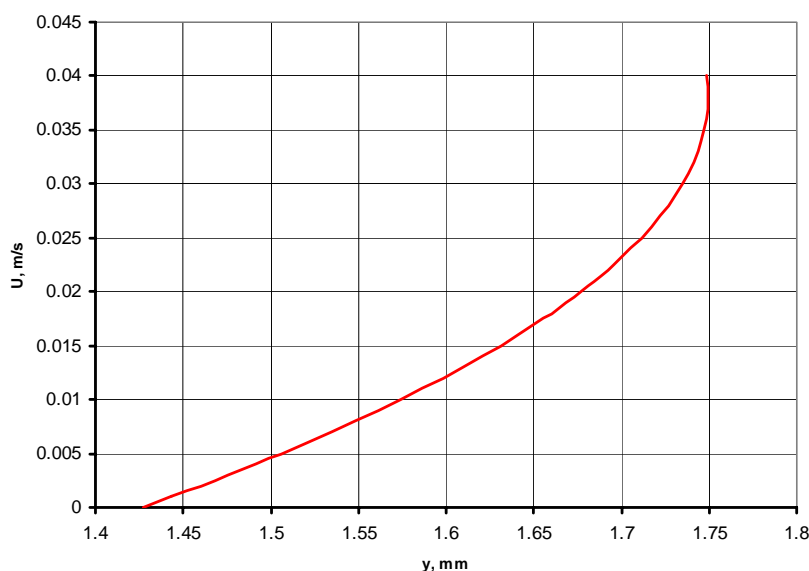
Rozwiązanie równania [4] opisuje rozkład wektora prędkości w przekroju kanału zgodnie z wyrażeniem [5].

$$u = u_b \left(1 + \frac{\alpha}{\sqrt{k}} y \right) + \frac{1}{2\mu} (y^2 + 2\alpha y \sqrt{k}) \frac{dP}{dx} \quad [5]$$

Obecna w równaniu [5] prędkość poślizgu u_b jest dana przez [6]

$$\begin{aligned} u_b &= -\frac{k}{2\mu} \left(\frac{\sigma^2 + 2\alpha\sigma}{1 + \alpha\sigma} \right) \frac{dP}{dx} \\ \sigma &= \frac{h}{\sqrt{k}} \end{aligned} \quad [6]$$

Rozwiązanie powyższego problemu w postaci równań [5] i [6] daje satysfakcjonujące wyniki dla małych prędkości przepływu, to znaczy takich dla których liczba Re określona dla wymiaru charakterystycznego \sqrt{k} nie przekracza 1000.



Rys. 2. Rozkład wartości prędkości u w przekroju poprzecznym kanału, zgodnie z funkcją [5]

Na rys. 2 zaprezentowano rozkład wartości prędkości u w przekroju poprzecznym kanału, zgodnie z funkcją [5] dla przykładowych danych:

$dP/dx = 20$ Pa/m, $h = 0.15$ m, $k = 1.57e-6$ m², $\alpha = 0.78$, $y = 0.04$ m, płyn – powietrze w warunkach normalnych.

Zaprezentowane przez Beaversa i Josepha podejście do problemu wyznaczenia prędkości poślizgu oraz profilu prędkości w kanale nad złożem porowatym pomimo łatwości wyznaczania interesujących wielkości

fizycznych oraz dobrej zbieżności wyników eksperymentalnych i analitycznych (Beavers i Joseph, 1967) posiada szereg cech uniemożliwiających szerokie stosowanie. Przede wszystkim zakres liczby Reynoldsa, której wartość plasuje charakter przepływu w obszarze laminarnym (przepływ Poiseuille'a sam w sobie jest laminarnym przepływem płynu lepkiego w przewodzie zamkniętym) ponad to założenie dwuwymiarowości warstwy przyściennej w przypadku przepływu innego niż laminarny może budzić duże kontrowersje.

Teoretyczne rozważania nad poprawnością formułowania warunku brzegowego na styku medium porowatego i omywającej go stycznie strugi płynu były przedmiotem intensywnej dysputy naukowej przez kolejne lata. W 1971 roku Saffman na podstawie statystycznej analizy danych wskazał na to, że postać warunku brzegowego zaprezentowanego przez Beaversa i Josepha była unikalna dla badanych przez nich geometrii i w rzeczywistości nie była właściwa co do rzędu parametru k . Według Saffmana właściwszą formą zależności opisującej rozkład prędkości u w kanale w pobliżu porowatej ściany jest [7].

$$u = \frac{\sqrt{k}}{\alpha} \frac{du}{dn} + u_b \quad [7]$$

gdzie n – wskazuje kierunek normalny do ściany.

W 1973 roku Jones stwierdził, że warunek brzegowy Beaversa i Josepha jest zależnością bardziej opisującą naprężenia ścinające na granicy złoża porowate – struga płynu niż prędkość ścinania i z tego punktu widzenia zaproponował zależność [8]

$$\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} = \frac{\alpha}{\sqrt{k}} (u - u_b) \quad [8]$$

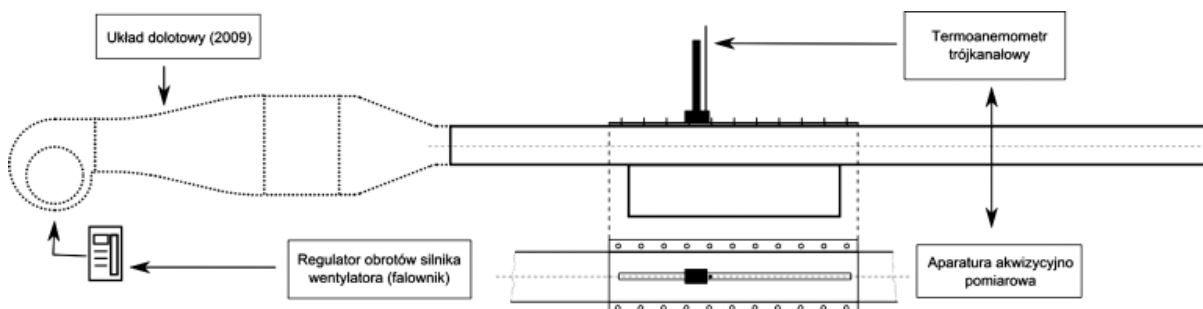
Warunek brzegowy Jonesa [8] jest odpowiedni w przypadku gdy składowa prostopadła do osi przepływu v jest różna od zera.

Eksperyment laboratoryjny

Prowadzone dotychczasowo badania eksperymentalne mające na celu określenie parametrów przepływu strugi powietrza nad złożem porowatym (Skotniczny i in., 2008, 2009, 2010) wskazały konieczność modyfikacji w obszarze zarówno konstrukcji stanowiska badawczego (2009) jak i metody pomiarowej (niezbędne modyfikacje zostały wykonane w 2010 r.). Zakres prędkości strugi w przestrzeni pomiarowej został określony przy okazji poprzednich badań i wynosił $u_{\min} = 2,8$ m/s oraz $u_{\max} = 12,4$ m/s.

Ponieważ w bieżących pomiarach wykorzystano sondę termooanemometryczną jednowłóknową (charakteryzującą się lepszą rozdzielczością przestrzenną w porównaniu do używanego poprzednio czujnika trójwłóknowego), konieczne było sprawdzenie możliwości pomiarowych czujnika w pomiarach warstwy przyściennej.

Omawiane w niniejszym artykule badania zostały wykonane na stanowisku pomiarowym (Skotniczny, 2010) przedstawionym na rys. 3.

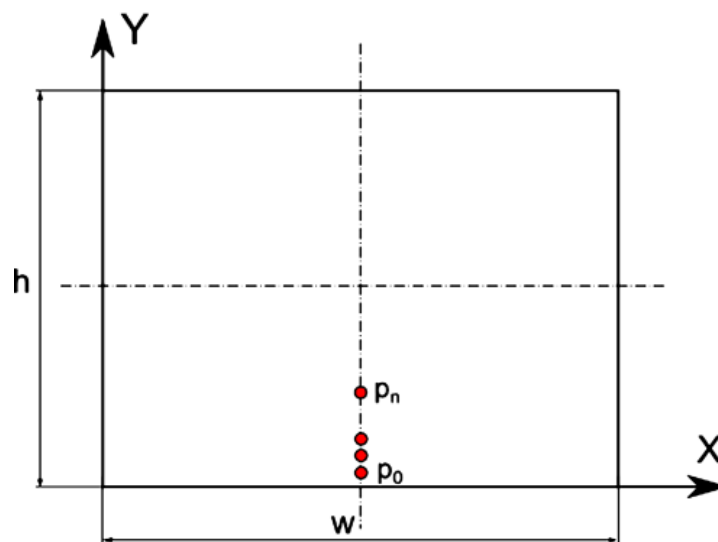


Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

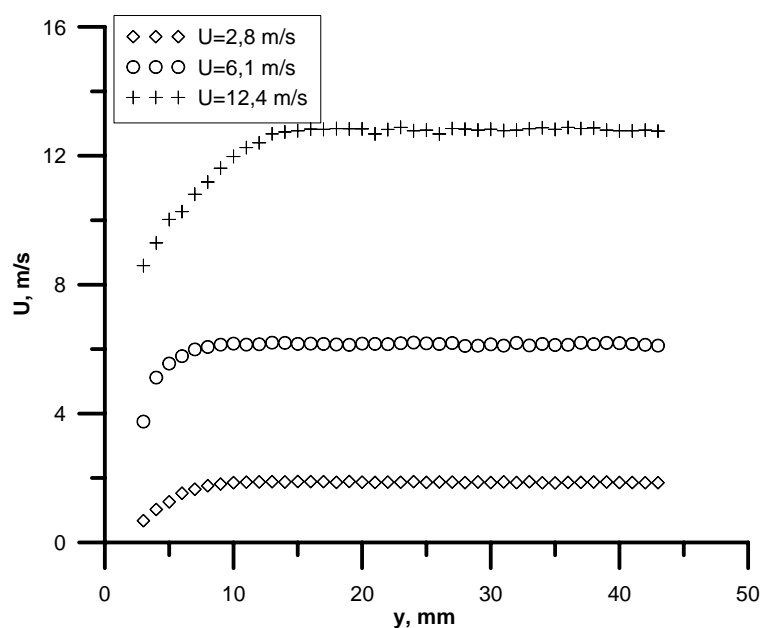
W pierwszej kolejności został wykonany pomiar kalibrujący warstwy przyściennej tworzącej się na jednej ze ścian kanału dolotowego. Pomiar polegał na zmierzeniu wartości prędkości średniej U w przekro-

ju tunelu dolotowego, prostopadłym do osi przepływu w równych odległościach $\Delta l = 1$ mm z pierwszym punktem p_0 mieszczącym się w odległości 3 mm od ściany tunelu oraz ostatnim p_n w odległości 45 mm od ściany (rys. 4).

Profile prędkości uzyskane w wyniku pomiarów zostały zamieszczone na rys. 5.



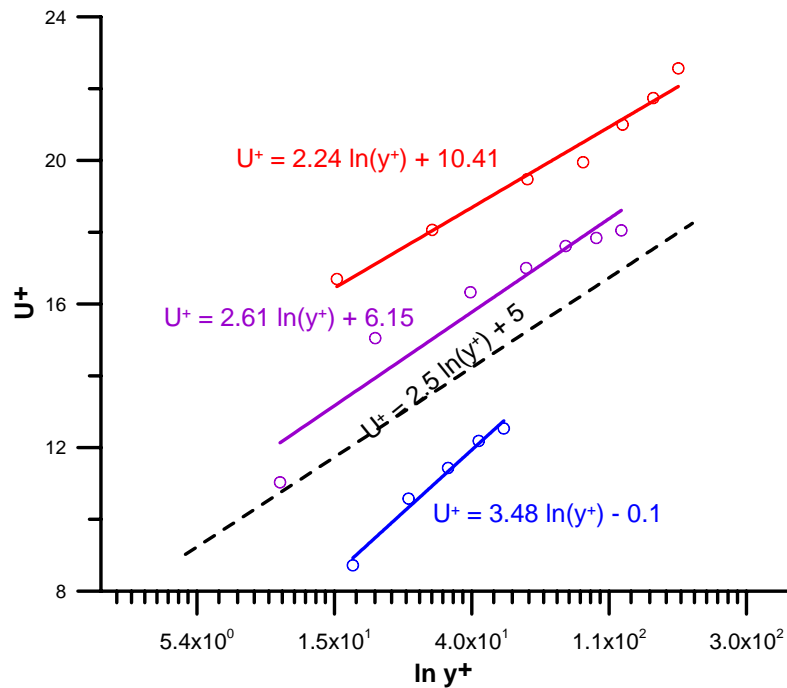
Rys. 4. Przekrój pomiarowy w osi tunelu dolotowego



Rys. 5. Profil prędkości U dla 3 prędkości przepływu powietrza w tunelu

W zależności od wartości wektora prędkości strugi powietrza przepływającego przez tunel, równomierny rozkład prędkości, dla którego $dU/dy \approx 0$ można zaobserwować w odległości od około 10 do 15 mm od ściany (rys. 5).

Dla pełnej analizy rozkładu wektora prędkości w obrębie warstwy przyściennej, a więc w obszarze znajdującym się w odległości do 10 mm od ściany należało przedstawić zmierzone rozkłady w bezwymiarowym układzie odniesienia y^+ , U^+ (White, 1986).



Rys. 6. Zmierzone profile prędkości w obszarze warstwy przyściennej dla 3 prędkości przepływu powietrza w tunelu pomiarowym przedstawione w bezwymiarowym układzie U^+ , y^+

Na wykresie zamieszczonym na rys. 6 linią przerywaną zaznaczono rozkład prędkości w obszarze logarytmicznej strefy rozkładu wektora prędkości dla uniwersalnego modelu turbulენტnej warstwy przyściennej opisanej równaniem w postaci [9]

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yU_*}{\nu}\right) + B \quad [9]$$

gdzie,

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \text{ – prędkość dynamiczna,}$$

κ – stała von Karmana (przyjmuje się ją równą około 0,41),

B – stała wynosząca ≈ 5.0 .

Najczęściej równanie [9] można spotkać w literaturze przedstawione w postaci [10]

$$U^+ = 2,5 \ln(y^+) + 5 \quad [10]$$

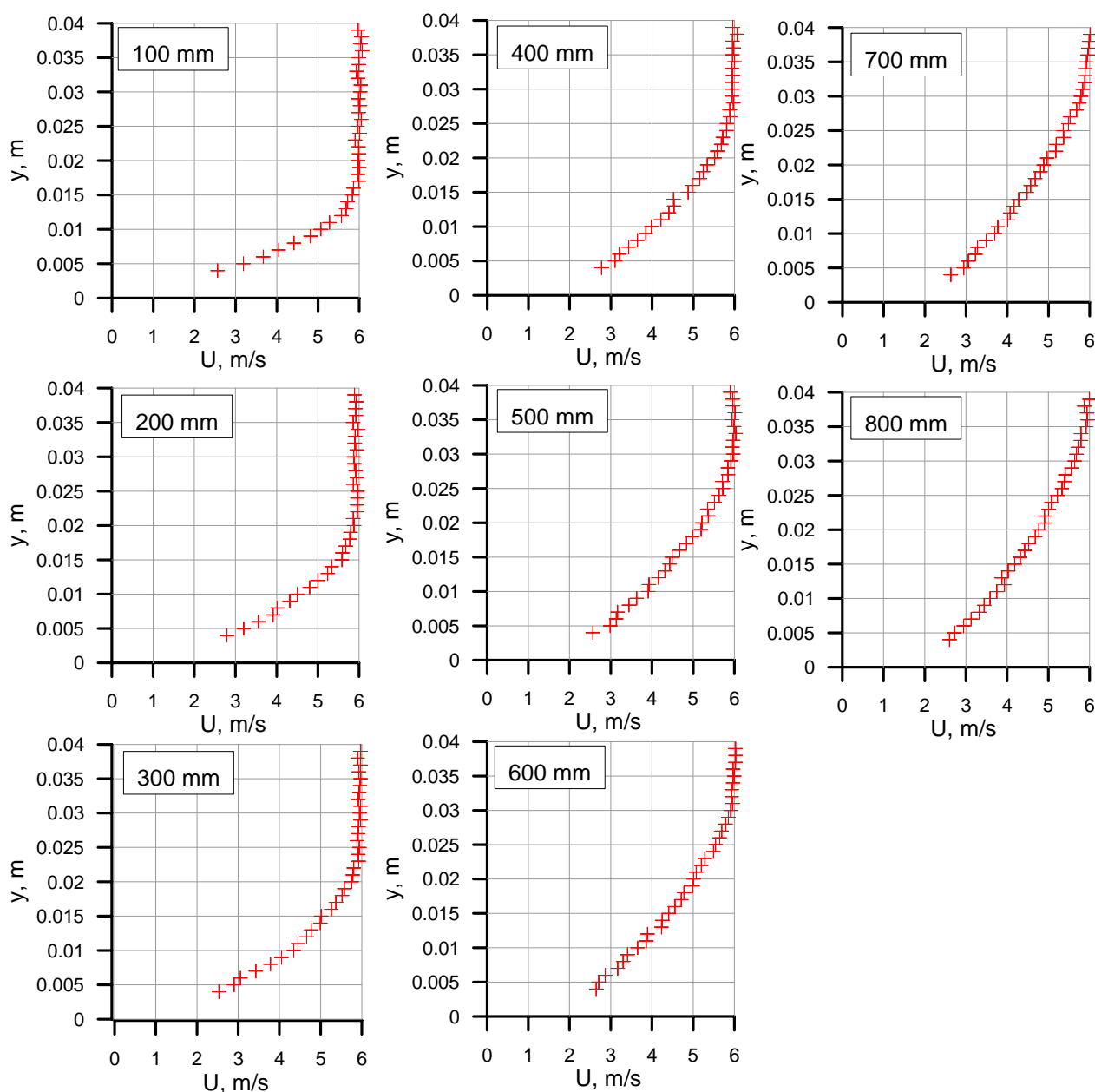
Analizując rozkłady prędkości zamieszczone na rys.6 można zauważyć, że współczynniki kierunkowe $1/\kappa$ są zbliżone wartością do przyjętego w uniwersalnym logarytmicznym profilu prędkości. Najbardziej przystającą do wyrażenia [10] postacią równania opisującego uzyskane dane pomiarowe jest ta dla $U = 6,1$ m/s, w której współczynnik $1/\kappa = 2,61$ i $B = 6,15$. Z tego względu zdecydowano się przeprowadzić eksperyment dla prędkości strumienia powietrza w tunelu pomiarowym $U = 6,1$ m/s, co przy przyjęciu jako wymiar charakterystyczny średnicę hydrauliczną tunelu dolotowego $D_h = 4A/S = 0.171$ m dawało wartość liczby Reynoldsa $Re = 61\ 000$.

Pomiar profilów prędkości nad złożem

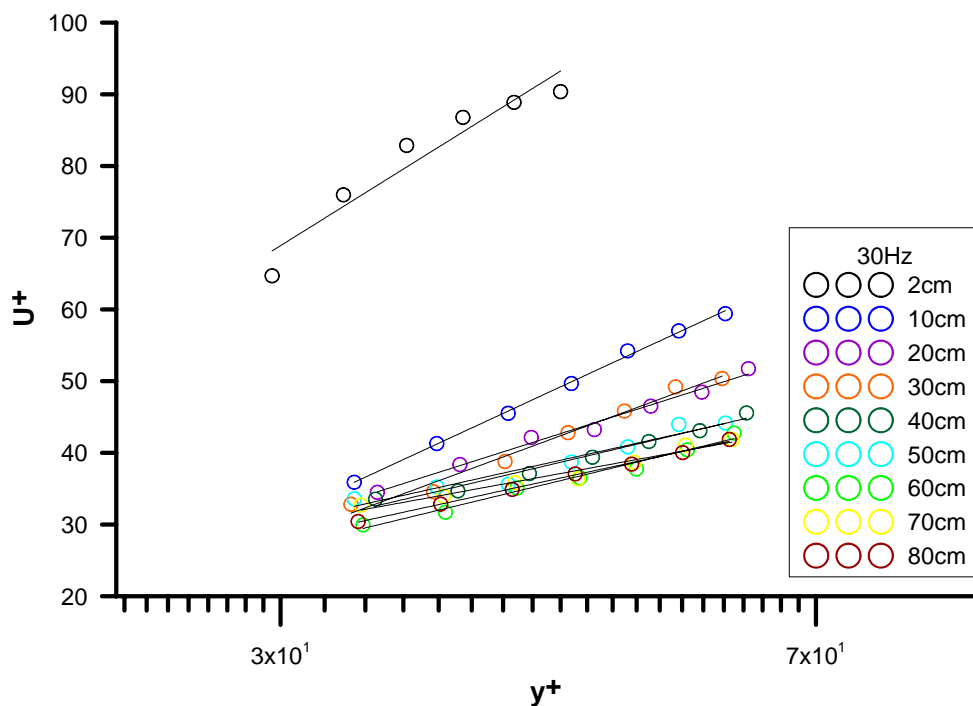
W poprzednim eksperymencie wykonano serie pomiarów rozkładów prędkości nad złożem w przekrojach prostopadłych komory pomiarowej (Skotniczny, 2010). Zwrócono wówczas uwagę na niedostateczną rozdzielczość przestrzenną używanego czujnika (sonda trójwóknowa) w pomiarze prędkości w obrębie warstwy przyściennej.

W bieżących badaniach posłużono się sondą termoanemometryczną jednowłóknową której gabaryty umożliwiły pomiar rozkładów prędkości średniej w bezpośrednim sąsiedztwie płaszczyzny podziału struga powietrza – złoża porowate. Pomiary, podobnie do przeprowadzonych w 2010 roku obejmowały wyznaczenie wartości prędkości w punktach z których pierwszy p_0 – najbliższej płaszczyzny podziału znajdował się w odległości około 4 mm od niej a kolejne co 1 mm. Komora pomiarowa, której jedną ze ścian tworzyło złożo porowate, została podzielona na 41 przekrojów pomiarowych odległych od siebie o 20 mm. Całkowita liczba punktów pomiarowych w każdym z przekrojów wynosiła 36 co wraz z odległością pierwszego punktu pomiarowego dawało maksymalną wysokość pomiaru $h = 40$ mm. Przyjęto, że prędkość mierzona w sąsiedztwie płaszczyzny podziału (w obrębie warstwy przyściennej) jest składową u_x wektora prędkości u .

Wyniki pomiarów w postaci wykresów profili prędkości dla wybranych przekrojów pomiarowych zostały zamieszczone na rys. 7. Jak można zauważyć, rozkłady prędkości w obrębie warstwy przyściennej stabilizują się w odległości około 300 mm od wlotu do komory pomiarowej. W pierwszych przekrojach, na wartość prędkości mają wpływ warunki przepływu utworzone w tunelu dolotowym. Szczególnie dobrze jest to widoczne po przeliczeniu uzyskanych danych na wartości bezwymiarowe, zgodnie z równaniem [10]. Wynik obliczeń zaprezentowano na wykresie zamieszczonym na rys. 8.



Rys. 7. Zmierzone profile prędkości u_x (punkty zaznaczone krzyżykami) oraz profile prędkości u_x wyznaczone numerycznie (linia ciągła) dla średniej prędkości przepływu powietrza w tunelu pomiarowym $u = 6,1$ m/s



Rys. 8. Zmierzone profile prędkości w obszarze warstwy przyściennej tworzącej się nad złożem porowatym dla $U = 6\text{ m/s}$, przedstawione w bezwymiarowym układzie U^+, y^+

Profile prędkości utworzone nad złożem dla przekrojów od 400-800 mm tworzą jedną rodzinę krzywych relatywnie nieznacznie różniących się od siebie wartościami współczynników kierunkowych (tab. 1.), z kolei profil prędkości utworzony nad złożem w przekroju odległym od wlotu komory o 20 mm istotnie różni się w przebiegu od pozostałych.

Tab. 1. Współczynniki równania [10] dla warstwy przyściennej nad złożem porowatym

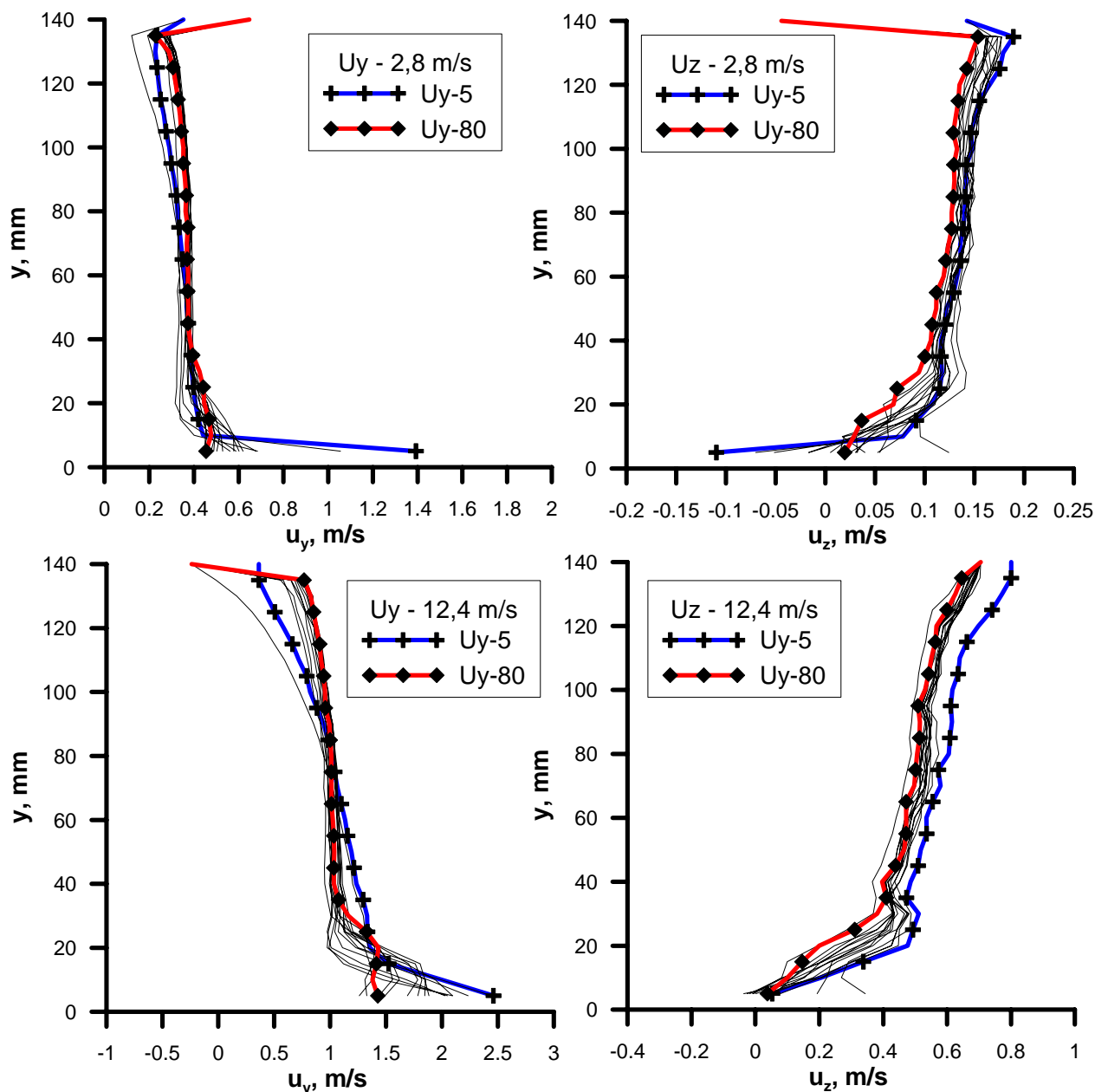
Przekrój	$1/\kappa$	B
20	46,547	-84,902
100	34,542	-82,946
200	23,715	-48,047
300	27,573	-63,108
400	17,666	-28,906
500	16,680	-24,851
600	18,088	-33,080
700	13,697	-15,283
800	16,255	-25,707

Opierając się na wynikach pomiarów przedstawionych na rys. 7 i 8 można wstępnie oszacować graniczną, górną wartość prędkości poślizgu u_b nie przekraczającą 2,5 m/s. To oszacowanie ma sens z uwagi na obserwowaną monotoniczną redukcję wartości prędkości w obrębie warstwy przyściennej w kierunku płaszczyzny podziału.

Pewne zaniepokojenie budzą jednak wysokie wartości współczynników $1/\kappa$ oraz B wyznaczone dla zmierzonych profili prędkości zamieszczone w tabeli 1.

Tego typu zależność można obserwować przy silnym zniekształceniu warstwy przyściennej spowodowanej występowaniem w przepływie struktur koherentnych.

Wydaje się, że obserwowane zniekształcenie warstwy przyściennej na płaszczyźnie podziału może wynikać ze stanu powierzchni, konkretnie jej wysokiej chropowatości (płaszczyzna podziału „zbudowana” jest z kulek o średnicy 5 mm). W celu weryfikacji tej hipotezy sięgnięto do pomiarów profili prędkości wykonanych sondą trójwłókową (Skotniczny, 2010). Na podstawie analizy zmienności wartości składowych wektora prędkości (rys. 9) można zauważyć, że w strefie położonej przy płaszczyźnie podziału występuje znaczny wzrost wartości składowych u_y i u_z .



Rys. 9. Zmiana wartości składowych wektora prędkości u_y i u_z w funkcji wysokości nad płaszczyzną podziału h

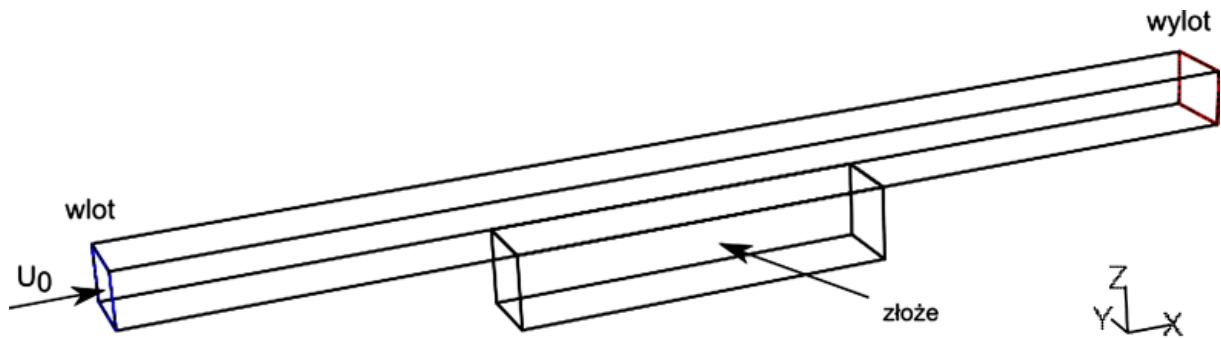
Powyższa obserwacja jest istotna w aspekcie właściwej analizy danych eksperymentalnych. Założenie dwuwymiarowości przepływu w warstwie przyściennej tworzącej się na płaszczyźnie podziału złoża porowate – przepływająca struga jest zagrożone. Jeżeli w przypadku składowej u_z wartości rzędu 0,1-0,15 m/s przy wartości modułu $u = 2,8$ m/s stanowią mniej niż 10%, to w przypadku składowej u_y , gdzie prędkości w odległości 0,005-0,02 m są rzędu 0,4-0,6 mogą wносить istotny wpływ na postać naprężeń stycznych.

Analiza numeryczna przypadku

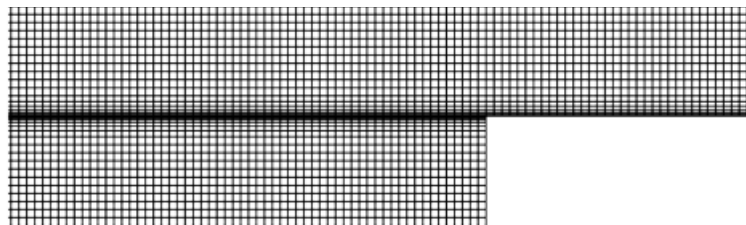
Przedstawione powyżej wyniki badań eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji danych uzyskanych na drodze obliczeń numerycznych, wykonanych przy pomocy pakietu programów CFD Ansy Fluent w wersji 6.3. Model przepływowy w którym przeprowadzono symulację składał się z części tunelu dolotowego, komory pomiarowej wraz ze złożem porowatym oraz części wylotowej zamodelowanych w skali 1:1 (rys. 10).

Z uwagi na nieskomplikowaną geometrię przypadku obliczeniowego możliwe było wykorzystanie strukturalnej siatki typu QUAD-MAP do dyskretyzacji domeny obliczeniowej. Całkowita liczba elementów

w siatce wynosiła 1 136 000. Zakładając złożony charakter wymiany masy pomiędzy złożem porowatym a omywającą go stycznie struga powietrza dodatkowo zagęszczono siatkę na granicy styku tych dwóch ośrodków (rys. 11).



Rys. 10 Numeryczny model tunelu przepływowego



Rys. 11. Fragment siatki obliczeniowej na granicy dwóch ośrodków

Obliczenia wykonano przy następujących założeniach:

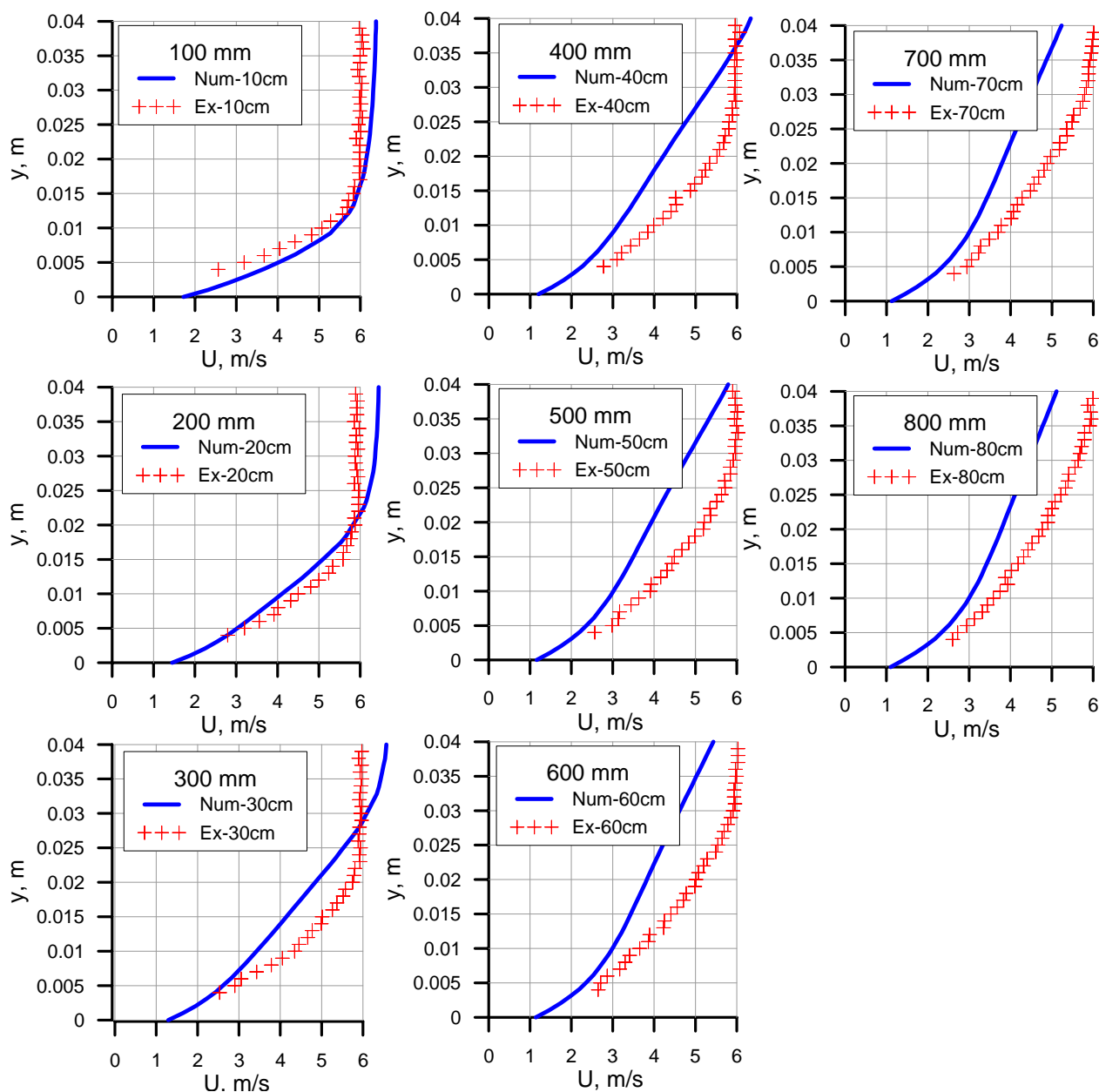
- Przepływ płynu lepkiego, nieściśliwego,
- Warunki przepływowe – izotermiczne,
- Z uwagi na wysoką wartość liczby Reynoldsa $Re = 60e^{+3}$ charakter omawianego przepływu należało traktować jako w pełni turbulentny.

Modelowanie przepływu turbulentnego wykonano korzystając z modelu RSM, w którym obecna w równaniu Reynoldsa wielkość $-\rho(\overline{u'_i u'_j})$ określająca tensor naprężeń turbulentnych przyjmuje postać równania [11],

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(-\rho \overline{u'_i u'_j})}_{\text{lokalna pochodna czasowa}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}_{C_{ij} - \text{konwekcja}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\rho \overline{u'_i u'_j u'_k}) + p(\delta_{kj} \overline{u'_i} + \delta_{ik} \overline{u'_j}) \right]}_{\text{dyfuzja turbulentna}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{\text{dyfuzja molekularna}} \\
 & - \rho \underbrace{\left(\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}_{P_{ij} - \text{produkcja naprężeń}} - \underbrace{\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta})}_{G_{ij} - \text{człon wypornościowy}} + \underbrace{p \left(\frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right)}_{\text{odkształcenia normalne}} - \underbrace{2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k}}_{\text{dysypacja}} \\
 & \underbrace{-2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm})}_{\text{Produkcja przez obrót układu}} + S_u
 \end{aligned} \tag{11}$$

W którym S_u jest członem zdefiniowanym przez użytkownika i w omawianym przypadku przyjmuje wielkość opisaną równaniem Forcheimera (Skotniczny, 2008).

Wyniki obliczeń numerycznych w postaci wykresów porównawczych zostały zamieszczone na rys. 12.



Rys. 12. Porównanie rozkładów prędkości w pobliżu płaszczyzny podziału.
Linia ciągła – rozwiązanie numeryczne, + pomiary na stanowisku

W początkowych przekrojach pomiarowych profile prędkości zarówno zmierzone jak i wyznaczone numerycznie mają podobne przebiegi. Jednak począwszy od przekroju 300 mm obserwuje się rosnące odchylenie wartości zmierzonych od obliczonych, począwszy od rzędnej $y > 0,006$ m.

Przyczyna tego zjawiska może mieć źródło w sposobie w jakim Fluent traktuje obecność złoża porowatego w przepływie stycznym. Równanie Reynoldsa w postaci [12]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad [12]$$

po prawej stronie zawiera dwa wyrazy opisujące transport naprężeń lepkich $-\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right]$ oraz turbulentnych $\frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i' u_j'})$ powstałych w wyniku procedury dekompozycji wektora prędkości.

W przypadku opisywania przepływu w pobliżu ściany, szczególnie w subwarstwie lepkiej warstwy przyściennej, wartości naprężeń lepkich uzyskują maksimum monotonicznie malejąc w kierunku osi rdzenia potencjalnego przepływu – wyniki analizy numerycznej pokrywają się z dostateczną dokładnością z wynikami eksperymentu. Sytuacja komplikuje się przy opisie przepływu płynu na styku złoża porowatego i strugi swobodnej. W oprogramowaniu do CFD brakuje możliwości zastosowania w tym przypadku warunku brzegowego typu „przepuszczalna ściana”, który umożliwiłby proporcjonalny wkład członu lepkiego i turbulentnego w proces transportu naprężeń.

W zamian Fluent oferuje wprowadzenie dodatkowego członu do równania [12] w postaci tzw. „User defined source”, który w przypadku rozpatrywania przypadku opływu złoża porowatego płynem lepkiem przyjmuje postać równania Forcheimera.

Skutkiem takiego zabiegu jest złe określenie wartości naprężeń lepkich w obrębie warstwy przyściennej, co w praktyce można zaobserwować na rys. 12 jako różnice w zmienności wartości prędkości w warstwie przyściennej dla modelu numerycznego oraz eksperymentu.

Zbliżone wartości prędkości w obrębie warstwy przyściennej dla profilów prędkości w początkowych przekrojach można wytłumaczyć zjawiskiem przeniesienia warstwy przyściennej utworzonej na ścianach tunelu dolotowego na obszar komory pomiarowej. Proces ten polegał na transporcie lepkich naprężeń stycznych „utrzymywanych” przez stały gradient ciśnienia dP/dx . W przypadku braku członu źródłowego w miejscu złoża porowatego, Fluent wykazuje tworzenie się strefy recyrkulacji strugi powietrza (zagadnienie kanału z uskokiem).

W zaistniałej sytuacji rozwiązania problemu mogą być dwa. Pierwsze, stworzenie nowego kodu CFD na potrzeby bieżącego przypadku przepływowego, oraz drugie – próba modyfikacji w istniejącym kodzie CFD (Fluent) obszaru podziału ośrodków płynnego i porowatego przy użyciu sztucznie wprowadzonej warstwy o założonej grubości, stanowiącej połączenie pomiędzy złożem a strugą swobodną. Unikalny kod obliczeniowy, pomimo tego, że mógłby spełniać wszystkie konieczne założenia eksperymentu wnosi ryzyko konieczności. każdorazowej walidacji przy zmianie warunków brzegowych (geometria modelu, właściwości złoża porowatego itp.). Z kolei sztucznie wprowadzona do modułu obliczeniowego Fluent warstwa łącząca, w której wykorzystano by właściwości ośrodka porowatego obecnie zaimplementowane w kodzie mogłaby w określonych okolicznościach generować trudne do interpretacji wyniki, stąd jej wprowadzenie każdorazowo wiązałoby się z szeroką analizą przypadku.

Na obecnym etapie badań szybszym, a więc bardziej kuszącym sposobem wydaje się być wprowadzenie sztucznej warstwy łączącej pomiędzy złożem a omywającą go strugą powietrza. Jednak każde z wyżej wymienionych rozwiązań wprowadza konieczność rozszerzenia zakresu badań eksperymentalnych celem pozyskania niezbędnej ilości danych do zbudowania pół empirycznego modelu płaszczyzny podziału.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych rozkładów prędkości w warstwie przyściennej tworzącej się nad złożem porowatym przy stycznym przepływie powietrza. Skoncentrowano się na zjawisku występowania tak zwanej prędkości poślizgu u_b na styku ośrodków porowatego i płynnego. Omówiono w skrócie wyniki najważniejszych prac badawczych dotyczących określania wartości u_b , oraz wykazano różnice w charakterze przepływu płynu w przypadku eksperymentu wykonanego przez Beaversa i Josepha a omawianego w tym artykule. Główna różnica polega na charakterze przepływu płynu w kanale nad złożem porowatym. W eksperymencie Beaversa i Josepha z racji niskiej wartości $Re < 1000$ przepływ należy zakwalifikować jako laminarny. Do rozwiązania równań ruchu dla takiego przepływu konieczne jest poprawne sformułowanie warunków brzegowych [4a]. Z kolei w omawianym w niniejszym artykule przepływie wartość $Re = 61\ 000$ plasuje przepływ w zakresie turbulentnym. Z tego powodu stosowanie postaci warunku brzegowego przy płaszczyźnie podziału zaproponowanej w pracy Beaversa i Josepha jest niemożliwe.

Modyfikacja warunku brzegowego zaproponowana przez Jones'a której istota polega na włączeniu występowania gradientów prędkości poprzecznych du_y/dz wydaje się być interesująca w aspekcie spostrzeżeń wynikających z opracowania danych eksperymentalnych dotyczących pomiaru rozkładu prędkości w warstwie przyściennej tworzącej się w pobliżu porowatej ściany. Do pełnego wykorzystania tej postaci potrzebne są dane eksperymentalne, które dostarczyły by informacji na temat zmian gradientów poprzecznych du_y/dz .

Zauważona różnica w rozkładach prędkości nad złożem w przypadku danych numerycznych i eksperymentalnych może wynikać z faktu zredukowania wartości naprężeń lepkich w kodzie CFD (fluent) na rzecz składowej turbulentnej naprężeń stycznych nad złożem porowatym mającego związek z brakiem występowania warunku brzegowego typu „ściana”.

Można spróbować stworzyć model, który będzie posiadał dodatkową warstwę „łączącą” porowatość z przepływem swobodnym. W tej warstwie, grubości 1 kulki można by było wprowadzić dodatkowy człon źródłowy do równania zachowania pędu w wybranym modelu turbulencji, który wprowadzałby występowanie lepkich naprężeń stycznych, których duży gradient w pobliżu płaszczyzny podziału „symulowałby” istnienie półprzepuszczalnej ściany które dodawałyby się do naprężeń turbulentnych.

Plany na najbliższą przyszłość obejmują:

1. Przekonstruowanie stanowiska tak, żeby można było wyznaczyć wartość gradientu du/dz . Zabieg ten jest istotny w aspekcie włączenia do modelu numerycznego warunku brzegowego Jonesa.
2. Biorąc pod uwagę zniekształcenia warstwy przyściennej nad złożem porowatym istnieje konieczność przeanalizowania stanowiska pomiarowego ze względu na występowanie struktur koherentnych, ich wpływu na rozwój strugi powietrza oraz sposobów redukcji intensywności występowania.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Beavers G.S., Joseph D.D., 1967. *Boundary conditions at naturally permeable wall*. JoFM.
- Elsner J.W., 1988. *Turbulencja przepływów*. PWN.
- Fluent User Manual*, 2006
- Larson R.E., Higdon J.J.L., 1985. *Microscopic flow near the surface of two dimensional porous media*. Part 1, Journal of Fluid Mechanics, vol. 166, pp. 449-472.
- Nield D., Bejan A., 2006. *Convection in porous media*. Springer Science + Business and Media.
- Skotniczny P., 2008. *Model przepływu powietrza w ośrodku porowatym z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła*. Transactions IMG.
- Skotniczny P., Cierniak W., Gorgoń J., Nowak R., 2009. *Eksperymentalna weryfikacja zjawiska wymiany masy i energii w medium porowatym*. Transactions IMG.

Współautorzy: WIESŁAW CHMIEL, ROBERT NOWAK, JERZY GORGON, WŁADYSŁAW CIERNIAK

Determination of the tangential slip velocity of air flow over a porous bed

Abstract

In the processes of mass and energy exchange between the fluid and porous medium, especially in the tangential flow stream of fluid to the surface of the porous medium it is vital to determine appropriate conditions of flow taking place inside the porous material. Due to technical difficulties, direct measurement of the flow rate of fluid within the porous material as a function of distance from the interface fluid-porous bed is extremely difficult to implement. Available literature data are limited to descriptions of the numerical results described issues and based on early experimental studies of the middle of last century (Beavers & Joseph, 1967).

Carried out previously by the author of research papers (Skotniczny, 2010) showed weak correlation between the experimental and numerical data. The current work focuses on determining velocity profile of air stream moving tangentially to the interface, and a sample correlation of results with available literature data and numerical solutions for selected models of turbulence.

Keywords: porous bed, tangential flow, merge layer