

Badania eksperymentalne rozkładu wektora prędkości na płaszczyźnie podziału złoża porowate – struga swobodna przy równoległym opływie złoża porowatego

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, JACEK SOBCZYK

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

Streszczenie

W artykule opisano próbę eksperymentalnego określenia parametrów strugi powietrza przepływającego stycznie nad powierzchnią złoża porowatego utworzonego z warstwy kulek o jednakowych średnicach. Badania polegały na wyznaczeniu rozkładów prędkości w pobliżu wcześniej zdefiniowanej płaszczyzny rozdziału pomiędzy złożem porowatym a przepływem swobodnym. Do eksperymentu użyto anemometryczne metody optyczne (PIV) wspomagane wynikami badań z poprzednich lat. Jak wykazały wcześniejsze analizy (Skotniczny i in., 2011-2013), dla przypadku stycznego przepływu płynu nad złożem porowatym w pobliżu płaszczyzny podziału, występuje strefa w której nie ma możliwości prostego połączenia przepływu filtracyjnego odbywającego się wewnątrz złoża porowatego, opisanego równaniem Darcy, z przepływem swobodnym nad złożem opisanym równaniami Naviera-Stokesa. Konieczność wyznaczenia parametrów omawianego obszaru jest niezbędna w aspekcie prowadzenia symulacji komputerowych.

Słowa kluczowe: anemometria obrazowa PIV, złożo porowate, przepływ styczny nad złożem porowatym

Wstęp

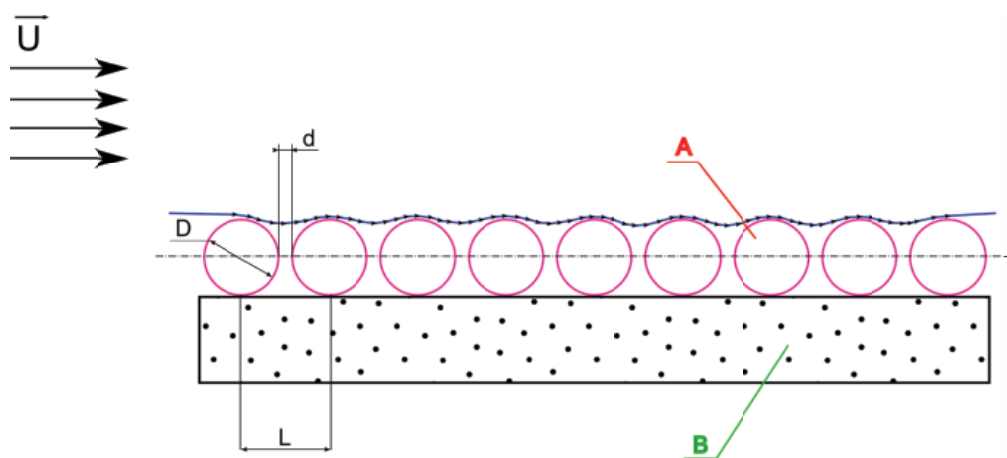
W przypadku przepływu płynu nad złożem porowatym w pobliżu złoża, od strony przepływu swobodnego pojawia się struktura, którą można nazwać strefą przejściową. W przeciwieństwie do zagadnienia klasycznego opisującego przepływ płynu nad powierzchnią nieprzepuszczalną (ściana), dokładny opis przepływu stycznego nad złożem porowatym napotyka na szereg problemów. Warstwa graniczna, zwana warstwą przyścienną tworząca się w pobliżu nieprzepuszczalnych, nieruchomych ścian jest zjawiskiem posiadającym jasno określony obszar występowania. Z jednej strony granicę warstwy przyściennej określa zerowa prędkość przepływu strugi powietrza na ścianie, a z drugiej obszar zewnętrzny warstwy przyściennej począwszy od strefy logarytmicznego rozkładu wektora prędkości a skończywszy na strefie intermencji (Elsner, 1987). Z kolei zjawisko tworzące się w pobliżu granicy złoża porowatego i przepływającej strugi płynu jest zdecydowanie trudniejsze do umieszczenia w konkretnym obszarze przestrzennym z uwagi na brak wiedzy na temat wartości prędkości występującej na granicy złoża porowatego, tak zwanej prędkości poślizgu. Badania nad poznaniem zależności opisującej wartość prędkości poślizgu trwają już od ponad 40 lat. Za prekursorów można uznać Beaversa i Josepha (Beavers i Joseph, 1967), którzy w 1967 roku wykonali eksperyment wykazujący istnienie pewnej prędkości na granicy złoża skierowanej stycznie do złoża, zgodnie z głównym kierunkiem przepływu płynu. Zaproponowany przez nich model jest jednak zbyt uproszczony. Głębsze analizy wskazują na duży brak uniwersalności modelu (w zasadzie jego stosowalność ogranicza się do przypadku przepływowego realizowanego przez Beaversa i Josepha). Ponadto przeszkodą w stosowaniu tego modelu w analizach numerycznych jest niezgodność rzędów równań N-S z modelem Beaversa i Josepha, co z kolei uniemożliwia wprowadzenie uniwersalnej funkcji łączącej.

Zjawisko przepływu stycznego strugi płynu nad złożem porowatym nie jest popularne i często spotykane w zagadnieniach przepływowych – najczęściej rozpatrywanym sposobem wymiany masy pomiędzy strugą swobodną a złożem jest przepływ prostopadły powodujący zjawisko filtracji. W tym przypadku rozkład

ciśnien na płaszczyźnie podziału złoża- struga jest wyznaczony za pomocą równań N-S a transport masy płynu wewnątrz złoża jest modelowany poprzez dodanie członu źródłowego do równań ruchu w postaci równania Dupuita-Forchheimera.

Ten sposób jest niewystarczający w przypadku przepływu stycznego przede wszystkim dlatego, że płyn przepływający nad złożem porowatym powoduje powstawanie struktur turbulentnych, które mogą mieć wpływ na wartość ciśnień „wymuszających” przepływ filtracyjny. Dodatkowym czynnikiem jest brak zdefiniowanego warunku brzegowego, który można nazwać „ściana porowata”, który oprócz wartości porowatości oraz współczynnika przepuszczalności charakteryzowałaby się dodatkowymi parametrami takimi jak chropowatość, oraz rozłożenie geometryczne struktury półprzepuszczalnej na swojej powierzchni.

Z tego powodu powstała koncepcja hybrydowej warstwy granicznej (Skotniczny i Sławomirski, 2013). Model warstwy granicznej (Rys. 1) zakłada istnienie warstwy pośredniczącej A, o znanej strukturze (przykładowo kulki o średnicy D , rozłożone równomiernie z podziałem d i L), dla której ruch płynu opisywany jest równaniami N-S, oraz złoża właściwego B. W wyniku rozwiązania równań ruchu dla warstwy A otrzymywane są pola ciśnień powodujące klasyczny przepływ filtracyjny w warstwie B, umieszczonej poniżej w której wymiana masy jest opisana klasycznym równaniem Dupuita-Forchheimera.



Rys. 1. Koncepcja hybrydowego modelu złoża porowatego

Dla tak postawionego zagadnienia przepływowego niewiadomymi są rozkłady prędkości w przestrzeniach d , a co za tym idzie rozkłady ciśnień całkowitych powodujących proces filtracji w złożu porowatym.

W poprzednim artykule (Skotniczny i Sławomirski, 2013) przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych rozkładów wartości prędkości w przestrzeniach międzykulkowych d (Rys. 1) oraz rozwiązanie numeryczne tak postawionego zagadnienia. Pomimo tego, że przedstawione w tej pracy wyniki badań były obiecujące, w dalszym ciągu istniała potrzeba zgłębiania zjawiska przepływu płynu w tak zdefiniowanej geometrii. Poprzednie wyniki badań uzyskano wykorzystując metody termooanemometryczne. Pomimo dobrej zbieżności wyników eksperymentalnych z numerycznymi istniało ryzyko wpływu obecności czujnika termooanemometrycznego w przestrzeni międzykulkowej na rozkłady prędkości przepływającej strugi płynu (powietrza) W związku z tym zdecydowano się na wykonanie pomiarów nieinwazyjnych przy pomocy zestawu do cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV).

Pomiary PIV

Pomiary przeprowadzono na stanowisku tunelu aerodynamicznego, wyposażonego w zestaw pomiarowy do cyfrowej anemometrii obrazowej (ang. *Particle Image Velocimetry – PIV*). Model złoża (Skotniczny, 2011) znajdował się w środku komory pomiarowej o wymiarach $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$. Parametry strugi powietrza w przekroju pomiarowym:

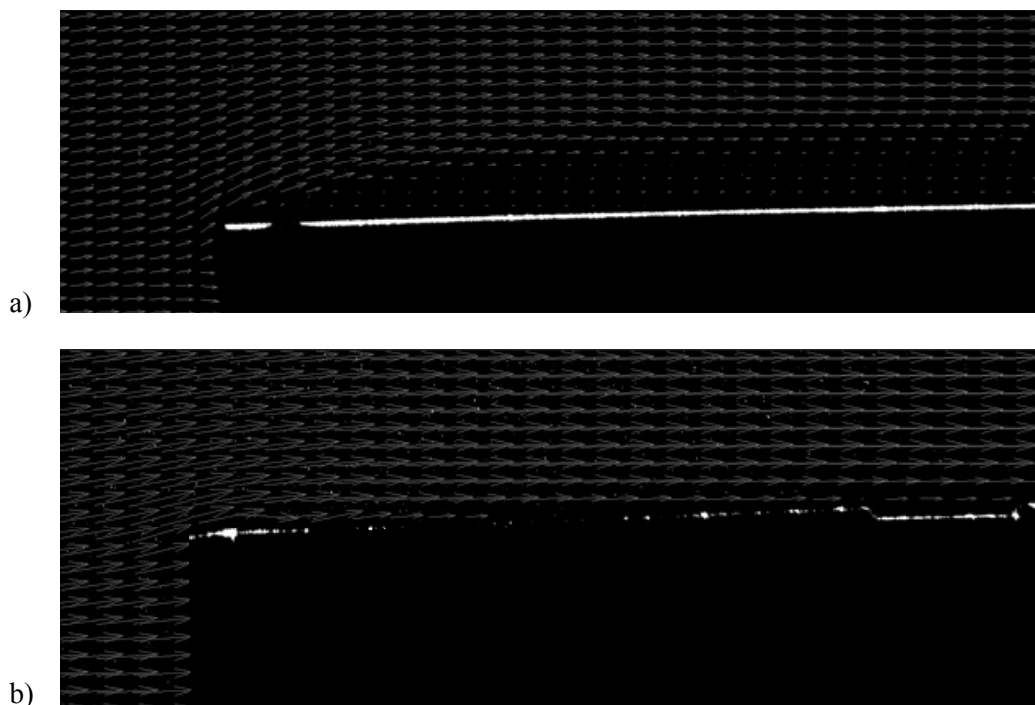
- prędkość: $4,00 \pm 0,05 \text{ m/s}$,
- intensywność turbulencji: $< 0,4\%$,
- temperatura: 22°C ,
- wilgotność względna: 52% .

Pomiary wykonano metodą 2D PIV z wykorzystaniem kamery typu sCMOS o rozdzielczości 2560×2160 pikseli, wyposażonej w stałogniskowy obiektyw makro 1:1 oraz lasera Nd:YAG emitującego impulsy świetlne o długości fali 532 nm, czasie trwania 6 ns i energii 200 mJ. Zastosowano posiew cieczowy o średnim rozmiarze cząstek zawiesiny $1 \mu\text{m}$. W celu zminimalizowania odbłasków cały model złoża został pomalowany cienką warstwą czarnej, matowej farby.

W czasie pomiarów wstępnych zestaw pomiarowy pracował w typowej konfiguracji. W czasie pomiarów zasadniczych kamera była nachylona 10° względem płaszczyzny modelu i 80° względem płaszczyzny noża świetlnego zorientowanego pionowo i przechodzącego przez środki kulek. Pomiary wykonano w oparciu o zwykłą kalibrację jak dla płaszczyzny pomiarowej normalnej do osi optycznej kamery ze względu na brak płyty kalibracyjnej dla wybranej skali odwzorowania. Wpływ nachylenia kamery na składowe prędkości oszacowano na:

- nie większy niż $\sim 1,1\%$ dla składowej poziomej U (równoległa do linii horyzontu i napływu), wynikająca ze stosunku 5 mm (wysokość połowy pola pomiarowego) do 450 mm (średnia odległość matrycy światłoczułej od pola pomiarowego),
- nie większy niż $\sim 1,5\%$ dla składowej pionowej V (normalna do linii horyzontu i napływu), wynikającą z wielkości skalującej, tj. odwrotności cosinusa 10° .

Najpierw wykonano analizę rozwoju warstwy przyściennej na czole platformy z kulkami. Zastosowano typową konfigurację zestawu pomiarowego: laserowy nóż świetlny pokrywał się z płaszczyzną symetrii złoża kulek, normalną do powierzchni platformy, zaś oś optyczna kamery leżała w płaszczyźnie platformy i była normalna do noża laserowego. Okazało się, że zbyt duża wysokość czoła platformy wynosząca ok. 1,5 mm powoduje oderwanie warstwy granicznej i w konsekwencji przepływ turbulentny w dalszej części strefy przyściennej.



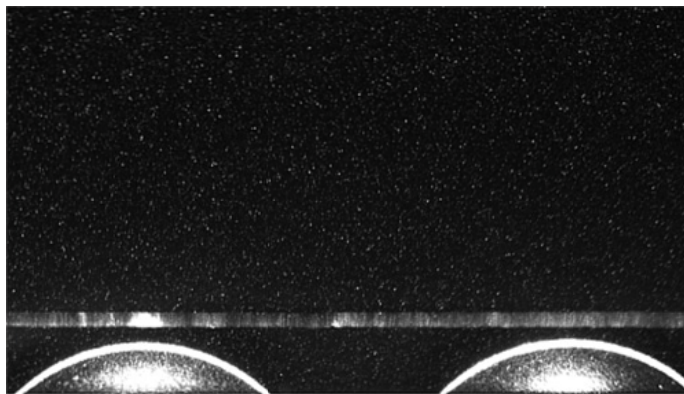
Rys. 2. Napływ na krawędź płyty. a) krawędź oryginalna b) krawędź zmodyfikowana

Zmniejszenie przekroju poprzecznego czoła platformy poprzez umocowanie wysuniętej poza jego krawędź żyłki usunęło to niepożądane zjawisko (rysunek 2b). Sprawdzone, że wzdłuż całej długości płaskiej części platformy przed złożem następuje normalny rozwój warstwy przyściennej.

Ponieważ celem badań była analiza przepływu nie tylko w warstwie graniczącej ze złożem porowatym, ale również wewnątrz niego, to zasadnicze pomiary przeprowadzono ze zmienioną geometrią układu pomiarowego. Kamery uniesiono do góry względem złoża i pochylono pod kątem 10° względem płaszczyzny platformy. Dzięki temu rejestrowano przepływ w ok. 1,5 mm warstwie poniżej powierzchni złoża. Obszar

pomiarowy (kadr zdjęcia) obejmował obszar $11,5 \text{ mm} \times 19,1 \text{ mm}$, co pozwalało na obserwację również całej warstwy granicznej na długości ok. 19 mm (Rys. 2).

Niestety przy takiej konfiguracji kamera rejestrowała również niemożliwe do usunięcia odbłaski od dalszej krawędzi złoza kulek, które utrudniały analizę numeryczną pomiarów. Posiew w tym obszarze był słabo lub zupełnie niewidoczny, co owocowało błędnie wyznaczonymi wektorami. Wyniki pomiarów wstępnych (wykonanych przy inaczej ustawionej kamerze) nie wykazały w tym obszarze żadnych anomalii i pozwalają przyjąć, że wartości prędkości można w nim interpolować na podstawie znajomości rozkładów prędkości w obszarach sąsiednich.

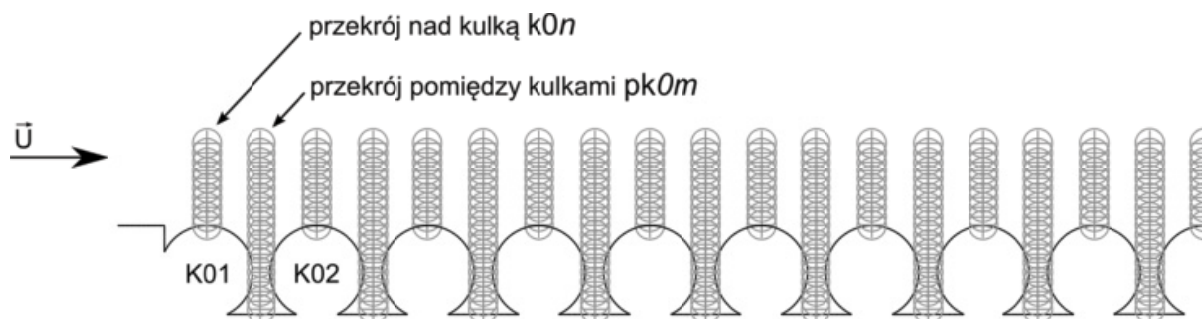


Rys. 3. Obszar pomiarowy

Dla wybranych lokalizacji wykonywano po 50 par zdjęć, na podstawie których wyznaczono chwilowe i średnie rozkłady prędkości. Wektory prędkości obliczano korzystając z 3 stopniowego algorytmu korelacji adaptacyjnej z końcowym oknem interrogacji $32 \text{ piksele} \times 32 \text{ piksele}$. Ze względu na dobrą jakość zdjęć i równomierność posiewu nie zastosowano filtra walidacyjnego. W efekcie uzyskiwano 15 264 wektory dla każdej pary zdjęć. Po usunięciu wektorów „niefizycznych”, tj. wyznaczonych na obszarach widocznych powierzchni kulek, liczba ta ulegała zmniejszeniu o ok. 7%.

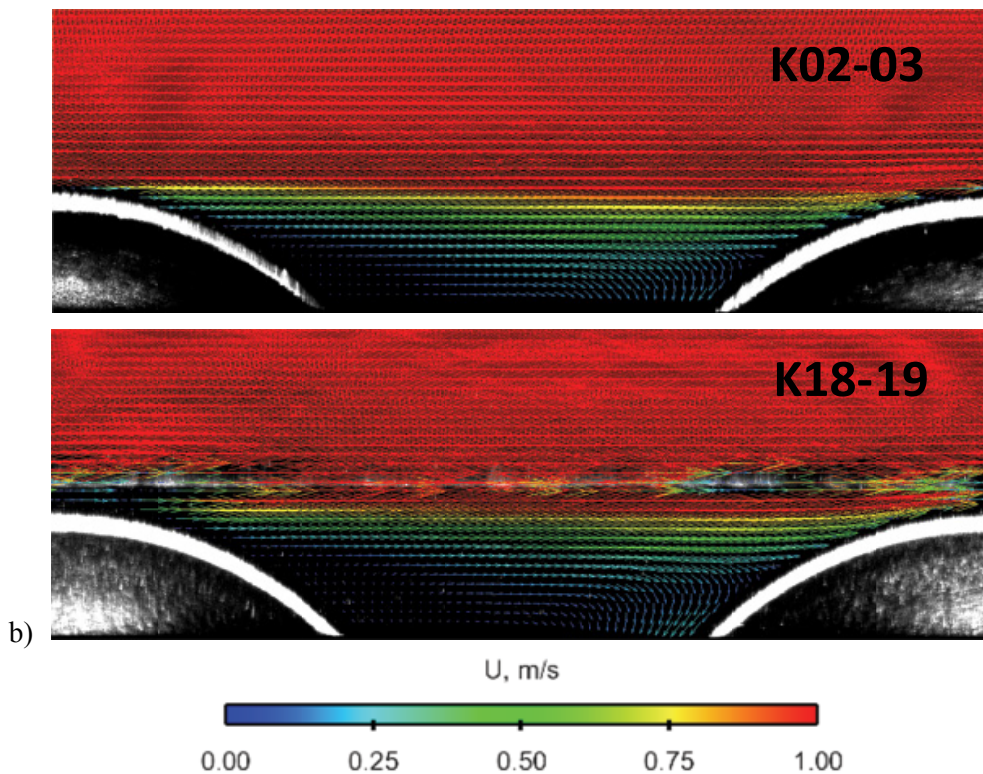
Wyniki pomiarów PIV

Podczas opracowywania danych pomiarowych eksperymentalnych skoncentrowano się na tych samych obszarach co w pomiarach wykonanych w 2013 roku. Podobnie jak wówczas analizie poddano rozkłady prędkości na linii leżącej w osi wybranych kulek, w płaszczyźnie normalnej do przepływu oraz rozkłady prędkości na linii leżącej w płaszczyźnie normalnej do przepływu umieszczonej w odległości $d/2$ (Rys. 4).



Rys. 4. Linie sondowania (2013)

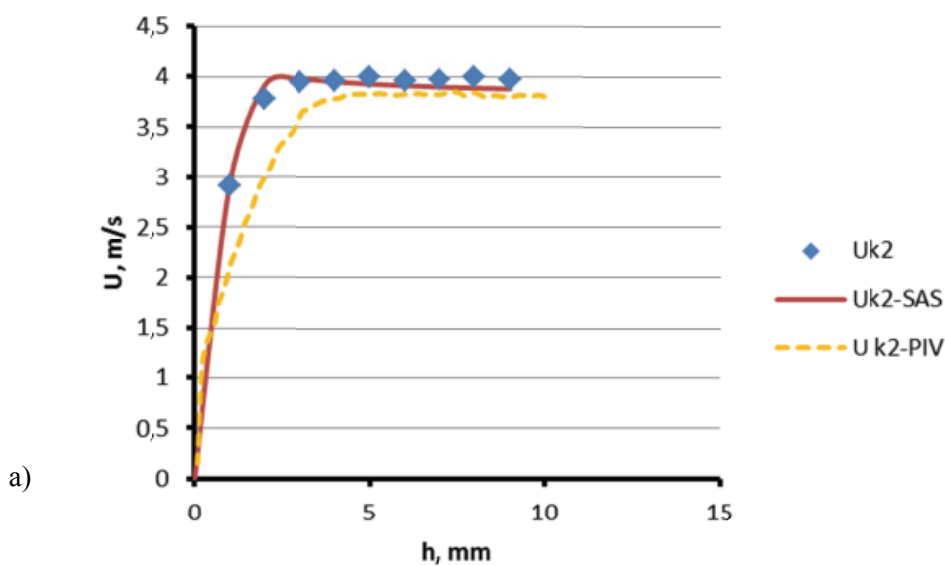
W wyniku pomiarów uzyskano zdjęcia, których liczba umożliwiła wykonanie obliczeń statystycznych. Na Rysunek 5 zamieszczono przykładowe realizacje procesu pomiarowego, dla przestrzeni międzykulkowej k02-k03 (Rys. a) oraz k18-k19 (Rys. b)

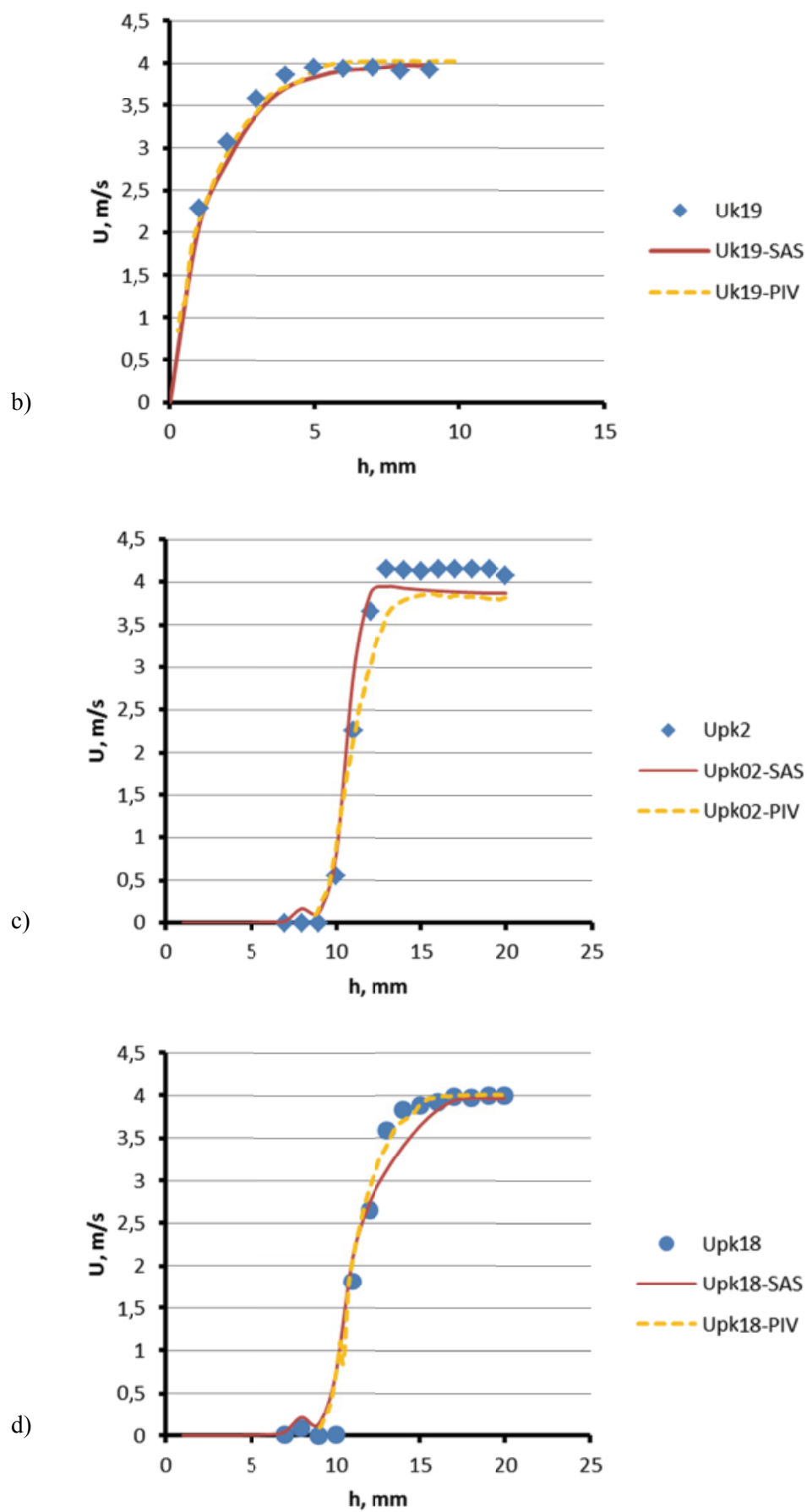


Rys. 5. Przykładowe zdjęcia z naniesionym obliczonym polem prędkości. a) pole przepływowe pomiędzy kulkami 2 i 3, b) pole przepływowe w sąsiedztwie kulek 18 i 19

Dyskusja wyników

Rozkłady prędkości na liniach sondowania (rysunek 4) uzyskane z bieżących pomiarów PIV porównano z rozkładami prędkości uzyskanymi z pomiarów termooanemometrycznych (Skotniczny i Sławomirski, 2013) oraz rozkładami prędkości z dwuwymiarowych analiz numerycznych. Wykresy z zestawieniami zaprezentowano na rysunku 6 a-d.





Rys. 6. Porównanie profili prędkości. Objasnienie w tekście

Przebieg profilów na wykresach przedstawionych na rysunku 6 wyraźnie wskazują na dużą zbieżność wyników badań eksperymentalnych wykonanych termoanemometrem (punkty) oraz PIV (linia przerywana) z wynikami analiz numerycznych (linia ciągła). Bardzo dobra zbieżność wyników eksperymentalnych jest szczególnie widoczna na **rysunkach b i d**, na których zamieszczono odpowiednio: profile prędkości bezpośrednio nad kulką (k19 – **rys. b**) i pomiędzy kulkami k18 i k19 (pk18, **rys. d**).

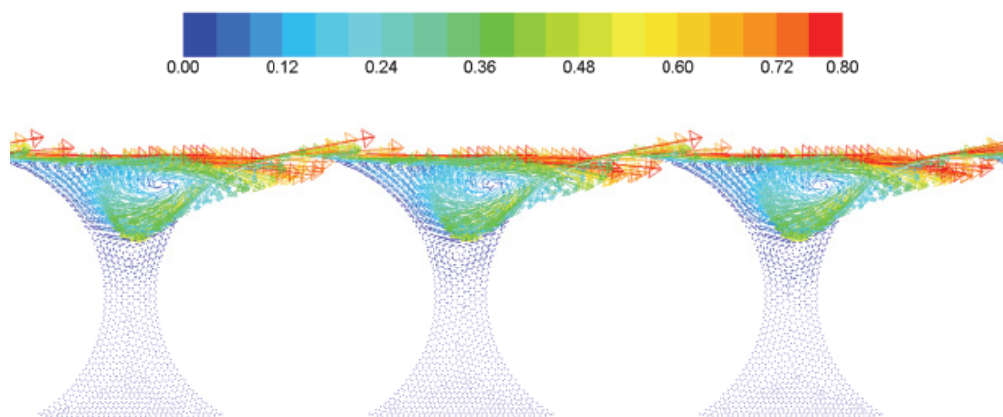
Mniejsza zgodność z wynikami pomiarowymi uzyskanymi termoanemometrem i PIV a profilem numerycznym, obserwowana dla linii sondowania znajdujących się w pobliżu pierwszych rzędów kulek w złożu (od strony napływu) najprawdopodobniej wynika z nieznaczących różnic w warunkach brzegowych dla eksperymentu oraz rozwiązania numerycznego. Ponadto, co można zaobserwować na **rys. a** istniejąca różnica w przebiegu zmian wartości prędkości uzyskanej przy pomocy PIV a uzyskanej przy pomocy termoanemometru może wynikać z dużego rozbłysku spowodowanego działaniem noża świetlnego w tym obszarze. Zwiększony rozbłysk wynikał z tego, że eksperyment PIV był kalibrowany na obszarze zajmowanym przez początkowe rzędy kulek, co spowodowało większe wypalenie farby antyrefleksyjnej, którą pokryte było złożo i płyta z plexi (**Rys. 7**).



Rys. 7. Zniszczenie warstwy antyrefleksyjnej na pierwszych rzędach kulek

Przeprowadzone pomiary rozkładów prędkości pomiędzy kulkami również wykazały istnienie przewidzianych w poprzednich badaniach stref recyrkulacji (Skotniczny i Sławomirski, 2013, zam. Rysunek 8). Brak wyraźnego przepływu wstecznego widocznego na rysunku 8 najprawdopodobniej wynikał z występowania trójwymiarowego przepływu strugi powietrza w tym obszarze a zatem zjawiska przepływowe istotne dla wymiany masy były poza obszarem pola pomiarowego. W celu weryfikacji tej hipotezy wykonano analizę numeryczną trójwymiarowego przypadku przepływowego dla warunków brzegowych takich samych jak w bieżącym eksperymencie.

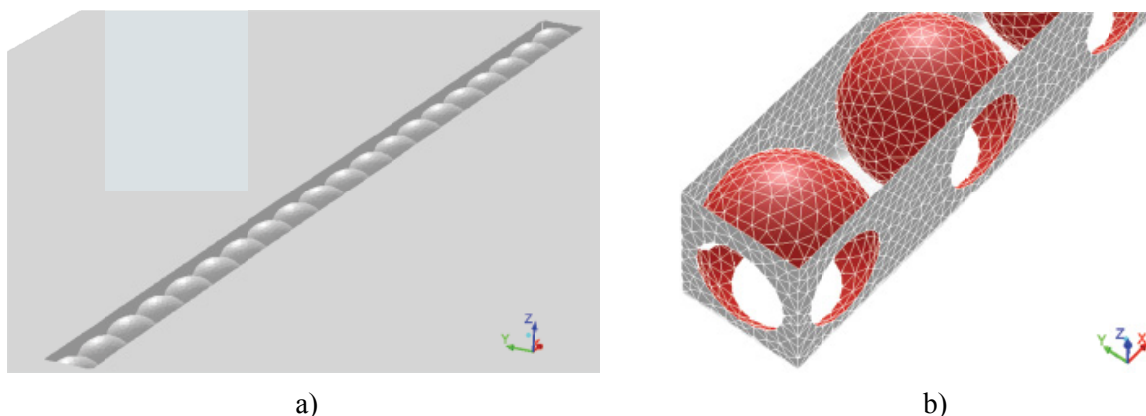
Poniżej, na rysunku 9 zamieszczono widok ogólny zaprojektowanej domeny obliczeniowej (**Rys. a**) oraz fragment zdyskretyzowanej geometrii (**Rys. b**) dla przypadku przepływu trójwymiarowego strugi powietrza nad złożem.



Rys. 8. Recyrkulacje pomiędzy kulkami. Analiza 2D (Skotniczny i Sławomirski, 2013)

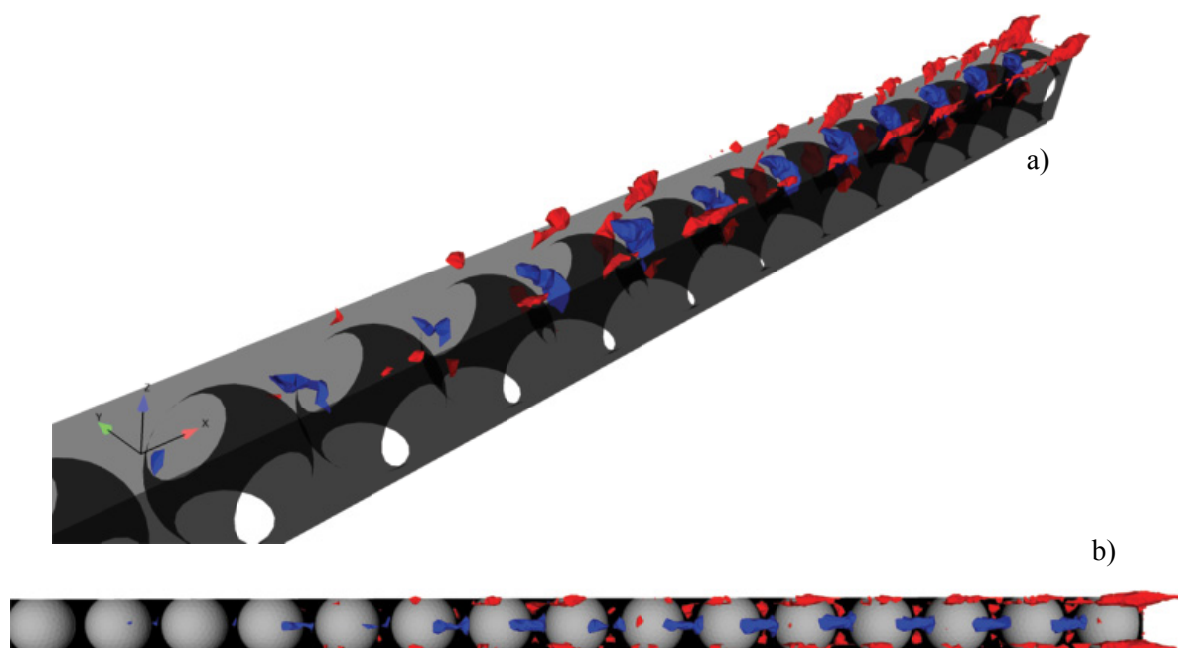
Obliczenia numeryczne zostały wykonane w programie Ansys Fluent v.15 dla przypadku turbulentnego przepływu powietrza traktowanego jako płyn rzeczywisty o stałej gęstości. Przepływ turbulentny był

realizowany za pomocą sprawdzonego i dającego najlepsze rezultaty (Skotniczny i Sławomirski, 2013) modelu turbulencji SAS (*Scale Adaptive Simulation*).



Rys. 9. Geometria złoża dla obliczeń 3D, a) widok ogólny b) fragment siatki obliczeniowej

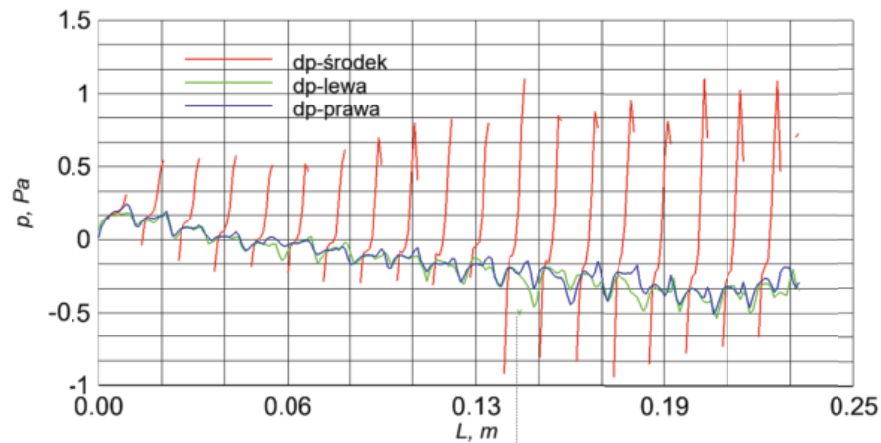
Wyniki analizy numerycznej omawianego przypadku wskazują na istnienie charakterystycznych obszarów w których występuje intensywne wymiana masy pomiędzy modelem złoża (obszar z kulkami) a strugą swobodną. Wymiana masy jest szczególnie wyraźna pod koniec złoża, począwszy od kulki o numerze k9. Zjawisko to zostało zaprezentowane na Rysunek 10.



Rys. 10. Obszary intensywnej wymiany masy pomiędzy modelem złoża a strugą swobodną, a) widok izometryczny na końcowe rzędy kulek, b) widok z góry

Celem lepszej identyfikacji zjawiska wymiany masy, na rysunku 10 zaprezentowano izopowierzchnie dwóch wartości prędkości składowej U_z . (składowej pionowej w stosunku do płaszczyzny podziału) $U_{z_min} = 0.3$ m/s (izopowierzchnia leżąca w osi złoża) oraz $U_{z_max} = -0.3$ m/s (izopowierzchnie leżące na skraju złoża, symetrycznie do osi złoża). Przedstawiony na powyższym rysunku obraz izopowierzchni wyraźnie wskazuje na trójwymiarowy charakter przepływu strugi powietrza w omawianym obszarze. Dopływ strugi powietrza odbywa się w osi złoża kulek, natomiast odpływ – symetrycznie względem jego osi, stycznie do powierzchni kulek. Obserwacja ta potwierdza wcześniejsze założenie o trójwymiarowości przepływu.

Nierozstrzygniętą kwestią pozostaje wartość gradientu ciśnień statycznych tworzącego się przy stycznym przepływie płynu nad tak zdefiniowanym modelem złoża porowatego. Zakładając, że obliczenia numeryczne dla omawianego przypadku geometrycznego są słuszne, dla przepływu powietrza o prędkości średniej $U_{sr} = 4$ m/s można się spodziewać spadków ciśnień statycznych rzędu $p_s = 1.5$ do 2 Pa, obserwowanych w kolejnych obszarach pomiędzy rzędami kulek (Rys. 11 – wykresy nieciągłe).



Rys. 11. Rozkład ciśnień statycznych w płaszczyźnie pionowej złoża kulek, leżącej w osi symetrii

Na wykresie zamieszczonym na rysunku 11 oprócz wartości ciśnień statycznych oszacowanych dla linii leżącej w osi kulek (wzdłuż osi przepływu) – krzywe zaznaczone linią nieciągłą zamieszczono również przebieg ciśnienia statycznego dla linii sondowania umieszczonych przy prawej i lewej ścianie zagłębienia w którym zostały umieszczone kulki. Jak można zauważyć, spadek ciśnienia statycznego przy krawędziach zagłębienia jest znacząco mniejszy niż w osi złoża. Zjawisko to sugeruje, że za wymianę masy pomiędzy złożem porowatym a opływającą go stycznie strugą płynu będzie odpowiedzialny gradient ciśnień leżący w osi.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że eksperyment pomiarowy potwierdzający powyższe spostrzeżenie będzie trudny do realizacji z uwagi na konieczność zastosowania bardzo precyzyjnych mierników ciśnień różnicowych z uwagi na konieczność estymowania małych wartości ciśnień statycznych.

Podsumowanie i wnioski

W toku realizacji zadań badawczych opisanych w artykule wykonano pomiary wartości prędkości nad modelem złoża porowatego, rozpatrywanego poprzednio w roku 2013. Wyniki pomiarów wykonanych w innych warunkach – w tunelu aerodynamicznym, są zbieżne z wynikami eksperymentów termooanemometrycznych wykonanych na odrębnym stanowisku badawczym (2013). Wykazana zbieżność zjawisk na poziomie zarówno ilościowym jak i jakościowym sugeruje ich małą wrażliwość na warunki brzegowo-początkowe.

Ze względu na trójwymiarowy charakter omawianych zjawisk przepływowych w przyszłości wskazane by był pomiar przy użyciu 3D PIV. Statystycznie opracowane wyniki takiej serii pomiarów mogłyby wnieść istotne informacje co do rzeczywistego charakteru przepływu strugi powietrza w omawianej geometrii.

Obecny układ i konstrukcja stanowiska pomiarowego sprawia, że pomiary wykonywane techniką PIV są ograniczone zasięgiem do kilku mm poniżej płaszczyzny rozdziału płyn – złożo. Konieczna jest modyfikacja stanowiska.

Koncepcja warstwy pośredniej może być bardziej złożona. W przepływie stycznym nad złożem porowatym, należy również wziąć pod uwagę stan powierzchni granicznej – chropowatość. Dla powierzchni hydraulicznie gładkich, przykładowo wykonanych ze spieków dodatkowo polerowanych zjawiska przepływowe w najbliższym sąsiedztwie płaszczyzny podziału płyn-ciało stałe będą zależały głównie od naturalnie tworzących się gradientów ciśnień wzdłuż głównej osi przepływu. Z kolei dla powierzchni o zróżnicowanej morfologii na wartość tworzącego się gradienty będą miały wpływ również zjawiska przepływowe charakterystyczne dla przepływu w pobliżu ścian chropowatych (grubość warstwy granicznej będzie większa niż w przypadku ścian hydraulicznie gładkich).

Niniejsza publikacja stanowi prezentację wyników uzyskanych w trakcie realizacji zadania T1Z1.2 *Badania eksperymentalne rozkładu wektora prędkości na płaszczyźnie podziału złoża porowate – struga swobodna przy równoległym opływie złoża porowatego* wykonywanego w ramach prac statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN w 2015 roku.

Literatura

- Skotniczny P., Sławomirski M.R., 2013: *Model hybrydowy złoża porowatego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 15, Nr 3-4, s. 27-52.
- Skotniczny P., Sławomirski M.R., 2012: *Czynniki wpływające na deformację warstwy przyściennej przy statycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym oraz ich wpływ na prędkość poślizgu. Część II: Badania eksperymentalne*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 14, Nr 1-4, s. 179-193.
- Sławomirski M.R., Skotniczny P., 2012: *Czynniki wpływające na deformację warstwy przyściennej przy statycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym oraz ich wpływ na prędkość poślizgu. Część I: Turbulentna warstwa graniczna nad złożem chropowatym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, T. 14, Nr 1-4, s. 165-177.
- Beavers G.S., Joseph D.D., 1967: *Boundary conditions at naturally permeable wall*. Journal of Fluid Mechanics, **30**, 197.
- Elsner J.W., 1987: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa.

Experimental studies of velocity vector distribution in vicinity of split-plane during parallel air flow over porous bed

Abstract

The article describes an experimental attempt to determine the parameters of the air stream flowing tangentially to the surface of the porous bed, formed with balls of equal diameter. The study consisted in determining the velocity distributions in the vicinity of a predefined plane interface between the porous bed and free flow. For the experiment the anemometric optical methods (PIV) were used, supported by the previous year's findings. As shown by previous analysis (Skotniczny, 2011-2013), for the case of a tangential flow of fluid over the porous bed near the parting plane, there is a zone in which there is no possibility of simply combining the movement of the flow described by Darcy equation, with the free flow over the deposit described by Naviera- Stokes equations. The determination of the parameters within this area is essential in terms of conducting computer simulations.

Keywords: Particle image velocimetry, porous bed, tangential air flow over porous bed