

Czynniki wpływające na deformację warstwy przyściennej przy statycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym oraz ich wpływ na prędkość poślizgu

Część II: Badania ekperymentalne

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, MARIUSZ R. SŁAWOMIRSKI

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

Streszczenie

W części drugiej artykułu przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przedstawiających rozwój warstwy przyściennej tworzącej się na płaszczyźnie podziału złoża porowate – struga powietrza. Skoncentrowano się na czynnikach wpływających bezpośrednio lub pośrednio na sposób propagacji wektora prędkości, kształt tworzącej się warstwy przyściennej, oraz na wartości intensywności turbulencji i jej energii kinetycznej w obrębie spodziewanej strefy logarytmicznego rozkładu wektora prędkości. Dodatkowo dokonano próby oszacowania wpływu zmierzonych wielkości na wartość prędkości poślizgu u_f występującej na granicy złoża porowate – struga powietrza. Do opracowania zagadnienia częściowo posłużono się wynikami badań eksperymentalnych wykonanych w latach 2009-2011 oraz wynikami badań rozszerzonych z bieżącego roku.

Słowa kluczowe: złożo porowate, przepływ styczny, prędkość poślizgu

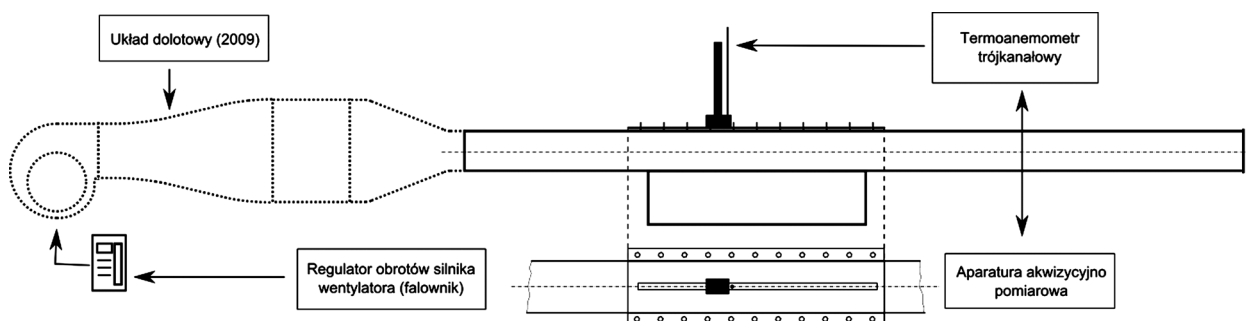
1. Wstęp

Poruszone w części pierwszej niniejszego artykułu (Sławomirski i Skotniczny, 2012) zagadnienie obecności chropowatości powierzchni niewątpliwie wpływa na jakość warstwy przyściennej tworzącej się w pobliżu ściany nieprzepuszczalnej, na której spełnione są warunki dla prędkości, intensywności turbulencji i energii kinetycznej $u|_{y=0} = 0, T|_{y=0} = 0, E_k|_{y=0} = 0$. W literaturze można znaleźć bardzo dużo danych zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych na temat rozwoju warstwy przyściennej przy ścianie charakteryzującej się określonymi parametrami chropowatości. W znakomitej większości przypadków dane te dotyczą chropowatości, które są technicznie uzasadnione, to znaczy takich, z występowaniem których należy się liczyć podczas analiz przypadków przepływowych znanych części urządzeń przepływowych.

W opisywanym w niniejszym artykule przypadku wartość chropowatości powierzchni rozdziału złoża porowate – omywająca go stycznie struga powietrza wykracza poza przyjęte w odpowiednich normach granice. Przykładem może być cytowana już niemiecka norma DIN4767 w których przyjęty parametr R_a opisuje wielkość średnią całkowitą z bezwzględnej wartości zarówno dodatnich jak i ujemnych nierówności powierzchni wyrażoną w mikrometrach. W opisywanym przypadku płaszczyzny rozdziału wartości nierówności powierzchni sięgają połowy średnicy kulki, czyli $h = 2.5$ mm.

Celem pracy było uzyskanie informacji na temat trójwymiarowego rozkładu wektora prędkości nad złożem porowatym wykonanym z kulek ballotyny omywanym w sposób styczny strugą powietrza. Dane pozyskane na drodze pomiarów bezpośrednich powinny ułatwić ocenę wpływu chropowatości powierzchni na deformację warstwy przyściennej. Pomiaru wykonane w latach ubiegłych, ze względu na zastosowanie sondy z włóknem pojedynczym, lub sondy trójwłóknowej bez możliwości wykonania pomiarów w kil-

ku płaszczyznach równoległych do osi komory pomiarowej dostarczały danych szczytkowych na temat ewentualnego występowania dodatkowych zjawisk przepływowych, jak choćby poprzecznych gradientów wektora prędkości.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

2. Stanowisko pomiarowe

Pomiary zostały wykonane na istniejącym stanowisku pomiarowym, które zostało zaprojektowane w 2009 r., z późniejszymi modyfikacjami (Skotniczny, 2010). Z uwagi na zaistniałą konieczność rozszerzenia możliwości pomiarowych w obecnej wersji stanowiska ulepszono element mocujący czujnik termoanemometryczny. Dzięki tej modyfikacji (rys. 3) możliwy był pomiar nie tylko w przekrojach prostopadłych do osi komory pomiarowej, ale również w płaszczyznach równoległych do ścian pionowych komory. Pierwotne rozwiązanie zamieszczone na rys. 2, dodatkowo wprowadzało ograniczenie polegające na możliwości pomiaru tylko w jednej płaszczyźnie równoległej do ścian pionowych komory.



Rys. 2. Dotychczasowy sposób prowadzenia sondy pomiarowej



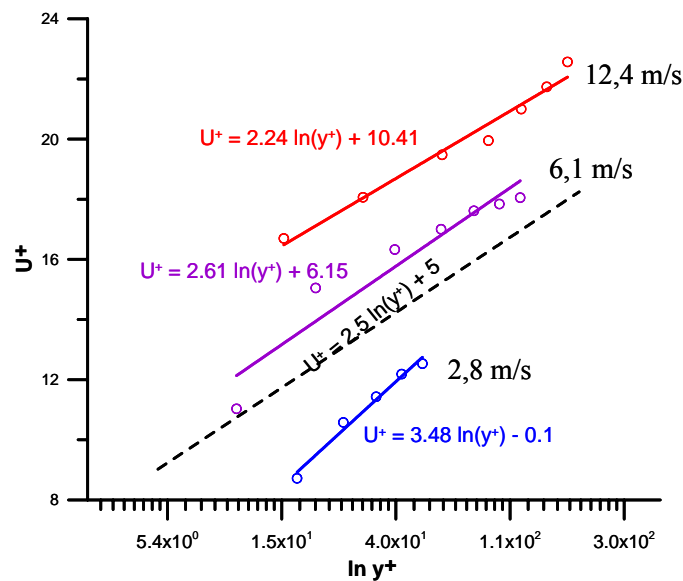
Rys. 3. Nowe mocowanie sondy pomiarowej

Zmodyfikowany sposób prowadzenia sondy w przestrzeni pomiarowej umożliwił pomiar w płaszczyznach równoległych do osi komory z rozdzielczością przestrzenną równą 5 mm. Jednakże ze względu na trudności techniczne, powstałe na etapie projektowania nowego przesuwu, pomiar nie mógł być prowadzony w bezpośrednim sąsiedztwie ścian pionowych komory pomiarowej. Minimalna odległość pomiędzy ścianą pionową komory a osią czujnika termoanemometrycznego wynosiła 15 mm. Z tego powodu nie było możliwe określenie niektórych wielkości charakteryzujących przepływ powietrza w komorze o przekroju prostokątnym.

3. Eksperyment

Na podstawie doświadczeń zebranych w poprzednich latach zdecydowano się na wykonanie pomiaru wielkości charakteryzujących warstwę przyścienneą tworzącą się na płaszczyźnie podziału złoża porowatego i omywającej go stycznie strugi powietrza dla jednej, optymalnej wartości prędkości przepływu strugi w przekroju wlotowym.

W 2011 roku wykonano trzy pomiary w obrębie warstwy przyściennej tworzącej się na dolnej ścianie tunelu dolotowego dla trzech różnych prędkości średnich w przekroju wlotowym dla prędkości $u = 2.8$, $u = 6.1$ oraz $u = 12.4$ m/s. Wyniki tych pomiarów zostały przedstawione w półlogarytmicznym układzie współrzędnych u^+ vs. $\ln(y^+)$ na rys.4. Po analizie rozkładów prędkości zdecydowano, że optymalną prędkością dla bieżących pomiarów będzie prędkość $u = 6$ m/s, dla której uzyskany profil jest najbardziej zbliżony do profilu teoretycznego opisanego równaniem $u^+ = 2.5 \ln(y^+) + 5$.



Rys. 4. Profile prędkości dla $u = 2.8$, $u = 6.1$ oraz $u = 12.4$ m/s (Skotniczny, 2011)

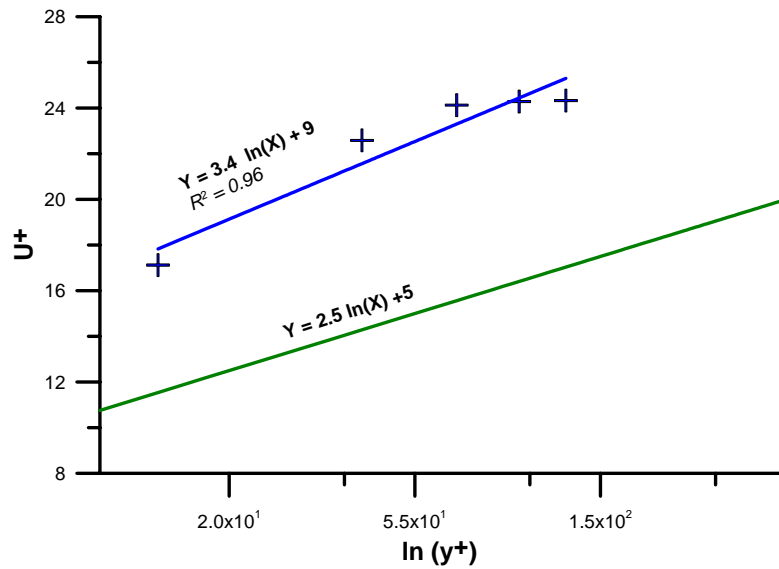
Należy nadmienić, że pomiary wykonane w 2011 r., które stanowiły podstawę bieżącego eksperymentów, których wyniki w postaci bezwymiarowych profili u^+ , $\ln y^+$ zaprezentowano na rys. 4 zostały wykonane sondą termoanemometryczną jednowłóknową.

Zastosowanie sondy z pojedynczym włóknem umożliwiło uzyskanie znacznie dokładniejszych wyników pomiarów w obrębie warstwy przyściennej niż w przypadku stosowania sondy wielowłóknowej (3 włóknowej), głównie z uwagi na gabaryty sondy, a więc jej lepszą rozdzielczość przestrzenną.

W celu weryfikacji założeń sondą trójwłóknową zmierzono profil prędkości przy ścianie poziomej tunelu dolotowego w przekroju poprzecznym oddalonym o 10 mm od wlotu do komory pomiarowej. Wyniki pomiarów zaprezentowano na wykresie zamieszczonym na rys. 5.

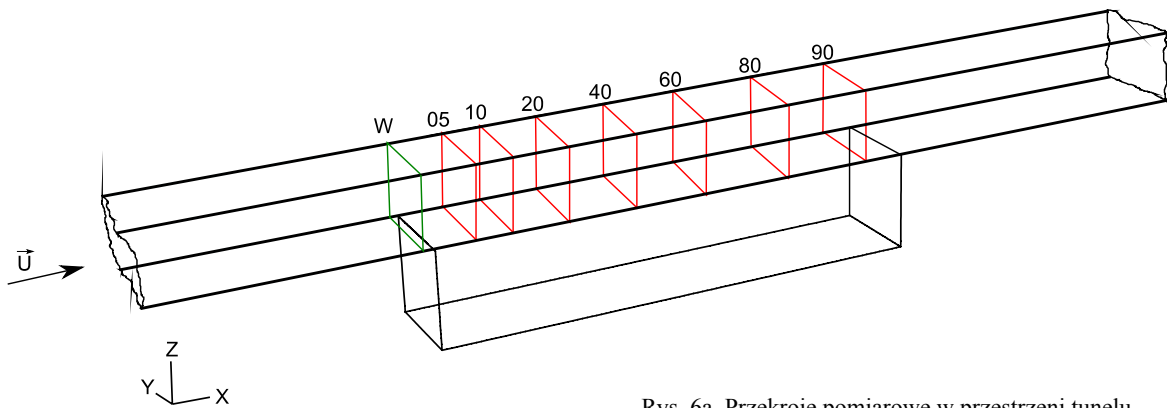
Analizując obydwa profile ten uzyskany czujnikiem jednowłóknowym oraz ten uzyskany przy pomocy czujnika trójwłóknowego można zauważyć pewne różnice w wartościach współczynników równania opisującego logarytmiczny rozkład wektora prędkości. Różnice w wartościach współczynników A i B w równaniu opisującym logarytmiczny profil wynikają głównie z dokładności pomiarów związanej z gabarytami obu czujników oraz z turbulentnego charakteru przepływu powietrza w stanowisku pomiarowym. Uznano, że zaistniałe różnice są możliwe do przyjęcia. Pomiary rozkładów prędkości nad złożem zostały wykonane dla następujących parametrów:

- Prędkość przepływu strugi w tunelu dolotowym $u_d = 6$ m/s,
- Przepływ izotermiczny,
- Rozdzielczość przestrzenna (siatka pomiarowa):
 - W płaszczyźnie Y-Z: $L = 5$ mm, $H = 2$ mm (rys. 6b),
 - W płaszczyźnie X-Z: od 50 do 100 mm (wielkość zależna od odległości od przekroju wlotowego).

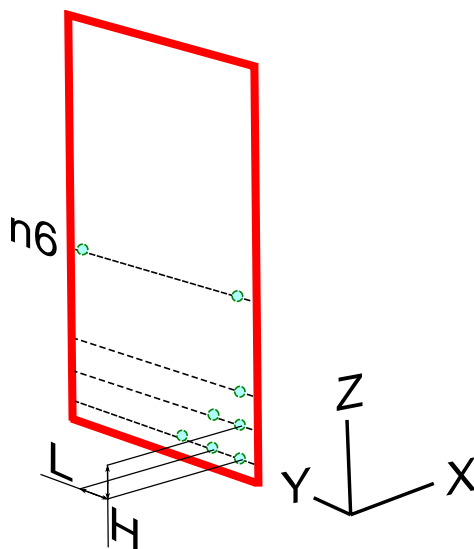


Rys. 5. Profil prędkości przy ścianie poziomej tunelu dolotowego

Na rys. 6a zamieszczono schemat stanowiska pomiarowego wraz z naniesionymi przekrojami pomiarowymi. Liczby od 05 do 90 oznaczają odległość przekroju pomiarowego od przekroju wlotowego W.



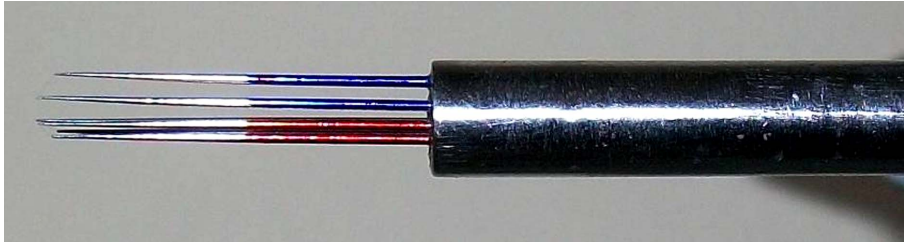
Rys. 6a. Przekroje pomiarowe w przestrzeni tunelu



Rys. 6b. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w przekroju

4. Czujnik

Bieżące pomiary zostały wykonane czujnikiem termooanemometrycznym trójwłóknowym. (rys. 7). Podobnie jak w poprzednich latach wyniki pomiarów termooanemometrycznych zostały przedstawione w układzie współrzędnych związanych z osią komory pomiarowej dzięki zastosowaniu transpozycji (kąty Eulera).



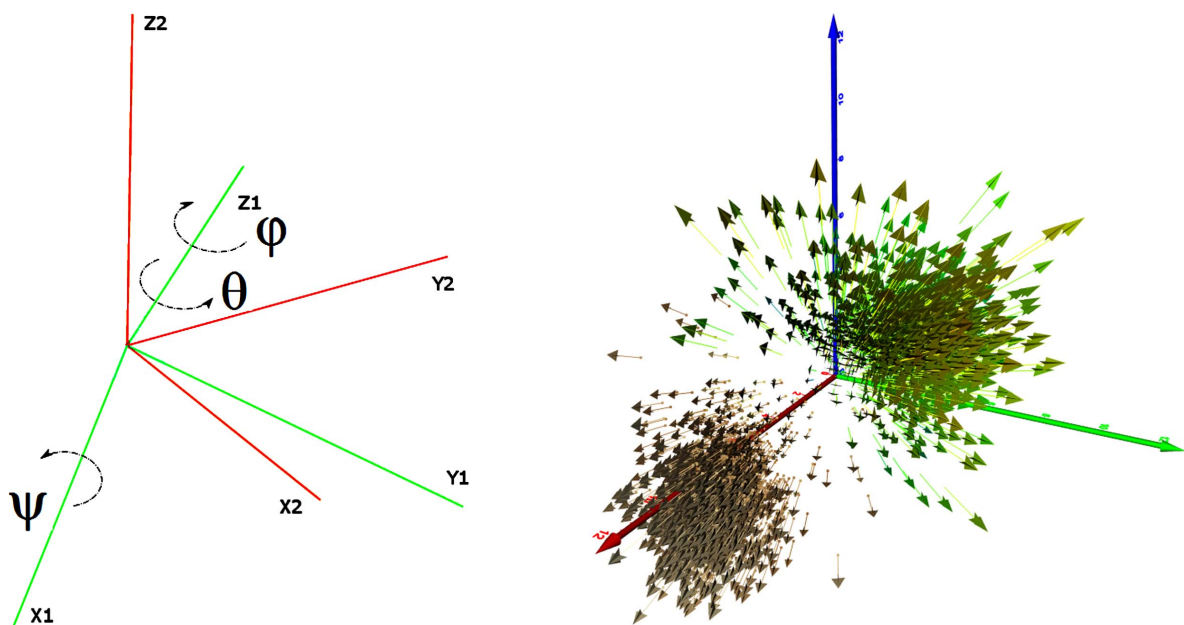
Rys. 7. Czujnik termooanemometryczny trójwłóknowy

Macierz sumarycznego obrotu zaprezentowana jest poniżej:

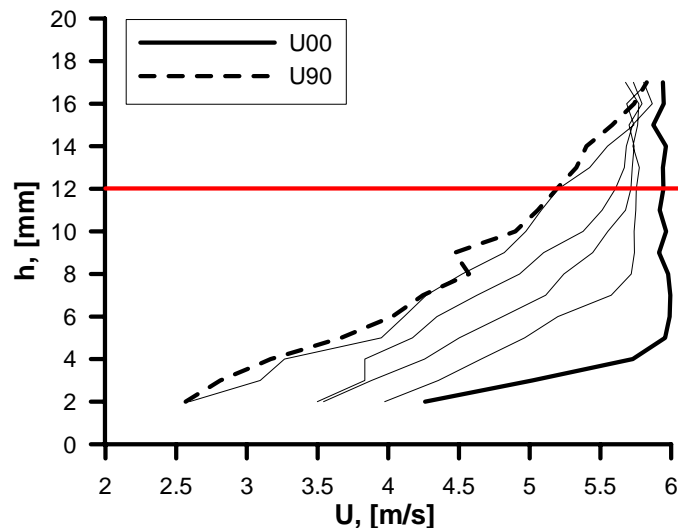
$$\begin{pmatrix} \cos(\psi) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\psi) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) & \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) & -\sin(\psi) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) & -\cos(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) & \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Zastosowanie transpozycji było konieczne w aspekcie analizy zachowania się poszczególnych składowych wektora prędkości w kolejnych przekrojach pomiarowych. Szczegółowa analiza wartości składowych wektora prędkości zaprezentowana została w kolejnym rozdziale.

Pomiary wykonano dla 8 przekrojów pomiarowych, w tym przekroju wlotowego W). W każdym przekroju pomiarowym zrealizowano 108 pomiarów, 17 w przekrojach prostopadłych do złoza komory oraz 6 w przekrojach do niego równoległych. Ponieważ interesujące były wielkości charakteryzujące warstwę przyścienną, ograniczono się do określenia rozkładów prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w odległości $2 < h < 12$ mm od powierzchni złoza.



Rys. 8. Kąty obrotu wraz z przetransformowanymi wektorami



Rys. 9. Pomiary sprawdzające przyjętą rozdzielczość przestrzenną

Wartość wysokości h została określona z pomiarów kontrolnych, których wyniki zamieszczono na rys. 9. Dla kolejnych przekrojów poprzecznych komory wykonano pomiar od 2 do 18 mm nad złożem. Na tej podstawie została określona zmienność rozkładów prędkości nad złożem oraz maksymalna wysokość pomiaru (na rys. 9 zaznaczona linią poziomą).

5. Wyniki pomiarów

W rezultacie pomiarów przeprowadzonych na stanowisku otrzymano dane umożliwiające opracowanie izopowierzchni przedstawiających rozkłady prędkości, intensywności turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w omawianych przekrojach pomiarowych. Wyniki obróbki danych pomiarowych dla przekroju 05 zostały zaprezentowane na rys. 10a. Izopowierzchnie przedstawiające przestrzenne rozkłady prędkości średnich, intensywności turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji dla pozostałych przekrojów zamieszczono na rys. 10b-10g.

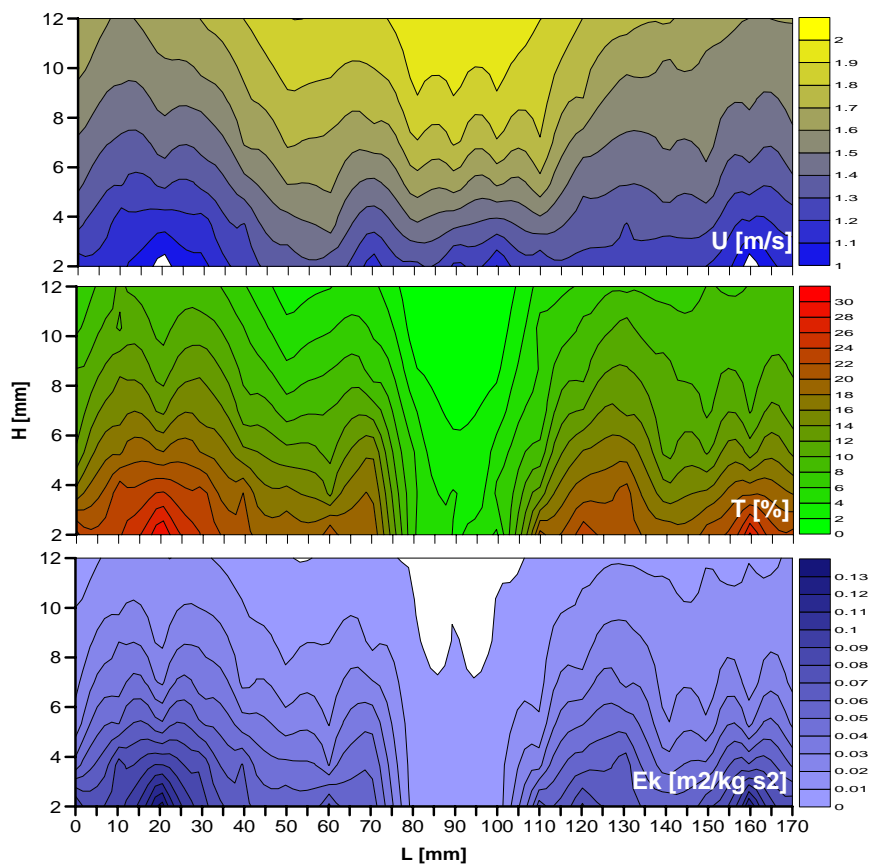
Analizując rozkłady wielkości wyznaczonych w poszczególnych przekrojach pomiarowych można zauważyć, że powierzchnia rozdziału złoża porowatego i strugi swobodnej utworzona z kulek o średnicy 5 mm wprowadza istotne zaburzenia w przepływie. Szczególnie wyraźnie to widać w przebiegu płaszczyzn opisujących intensywność turbulencji.

W zasadzie w każdym przekroju, w pobliżu płaszczyzny rozdziału obserwowana wartość intensywności turbulencji sięga 30%. Występowanie tak dużych zaburzeń naturalnie powoduje gwałtowny wzrost produkcji energii kinetycznej turbulencji, której wartość w pobliżu złoża osiąga wartość $1.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2/(\text{kg s}^2)$.

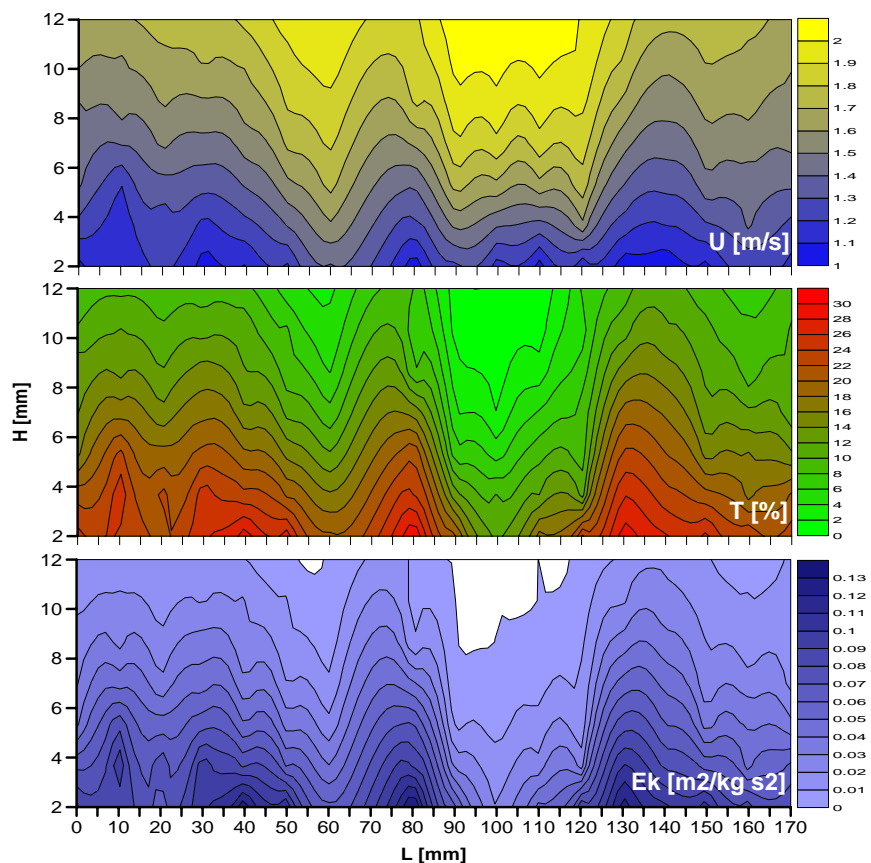
Opisywane zjawisko powoduje dużą niestabilność przepływu w pobliżu złoża, co z kolei może wprowadzać trudności interpretacyjne dotyczące struktur przepływowych w omawianym obszarze.

Ponadto, w obrazie zmienności wartości prędkości średniej nad złożem porowatym można zaobserwować dużą asymetrię w rozkładzie prędkości pomiędzy ścianą prawą i lewą komory pomiarowej. Owa zmiana nie jest skorelowana w sposób wyraźny z rozkładami intensywności turbulencji i energii kinetycznej turbulencji. Zjawisko to można obserwować w odległości od 120 mm od ściany prawej (patrząc od strony wlotu).

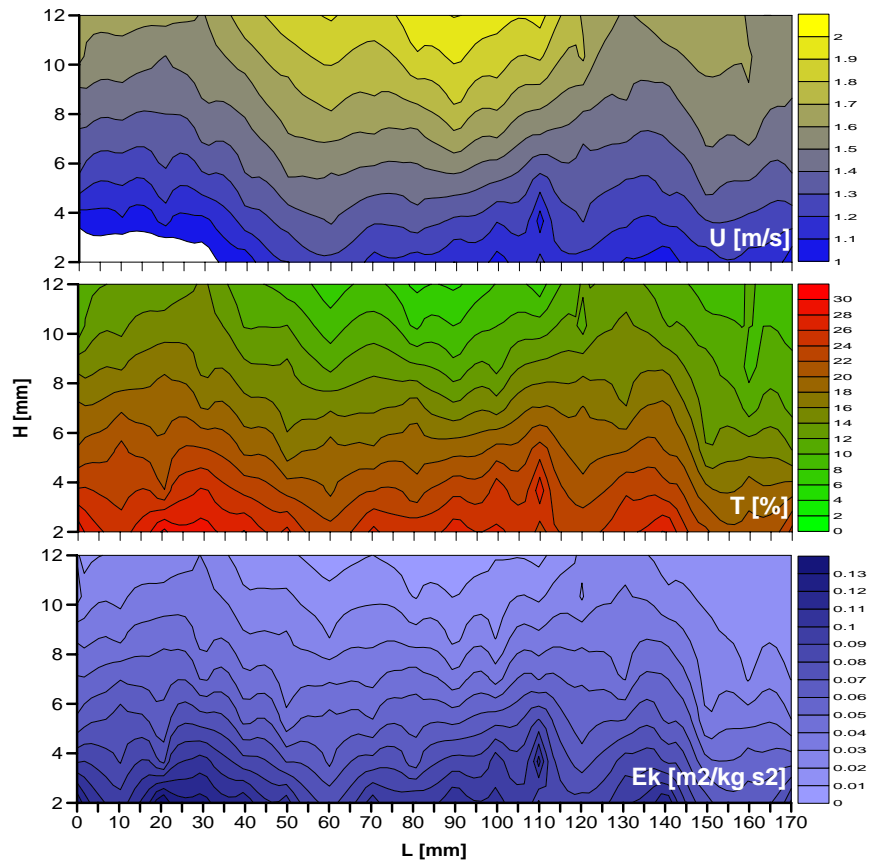
Ciekawe zjawisko można zaobserwować w początkowych przekrojach, jak przekrój 05 oraz przekrój 10. W omawianych przekrojach w odległości od 80 do około 110 mm pojawia się wyraźny spadek wartości wielkości turbulentnych (T i E_k). Jest to najprawdopodobniej spowodowane ukształtowaniem powierzchni złoża w początkowych przekrojach komory pomiarowej. Ponadto istnieje możliwość występowania zjawisk przepływowych związanych ze zmianą chropowatości powierzchni dolnej ściany komory – w tym przypadku złoża porowatego.



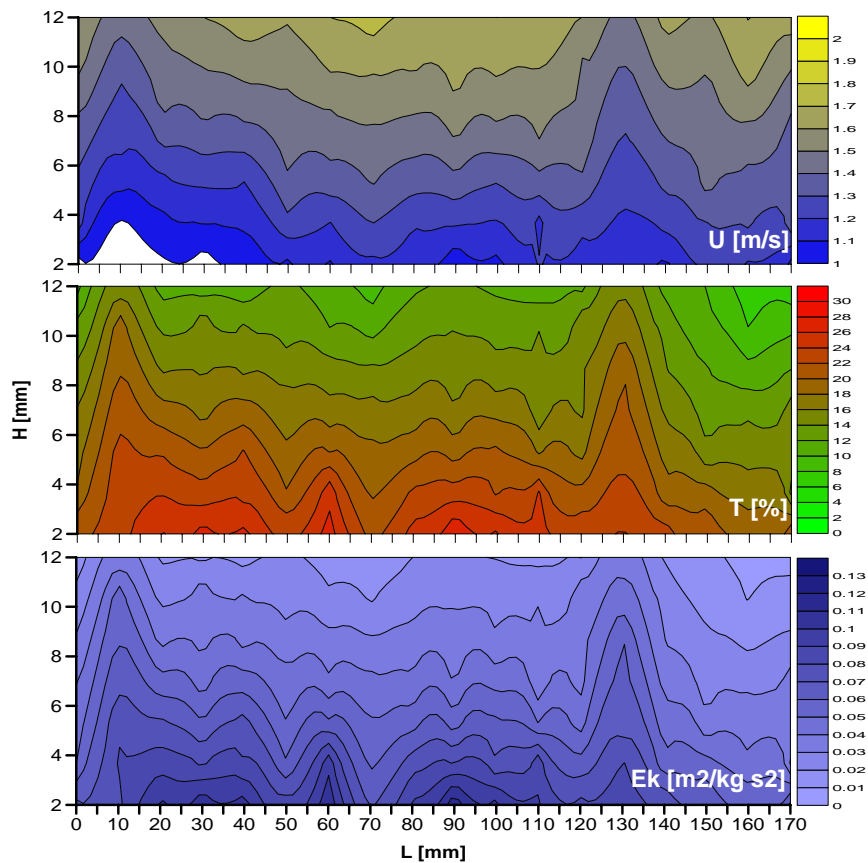
Rys. 10a. Izopowierzchnie prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 0



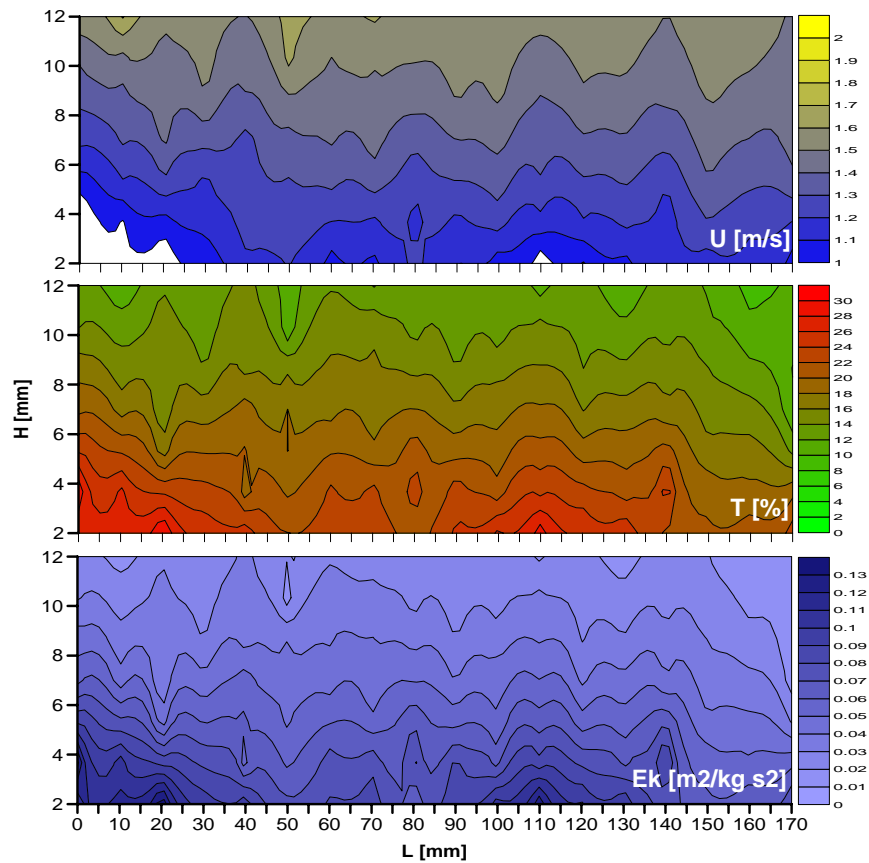
Rys. 10b. Izopowierzchnie prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 10



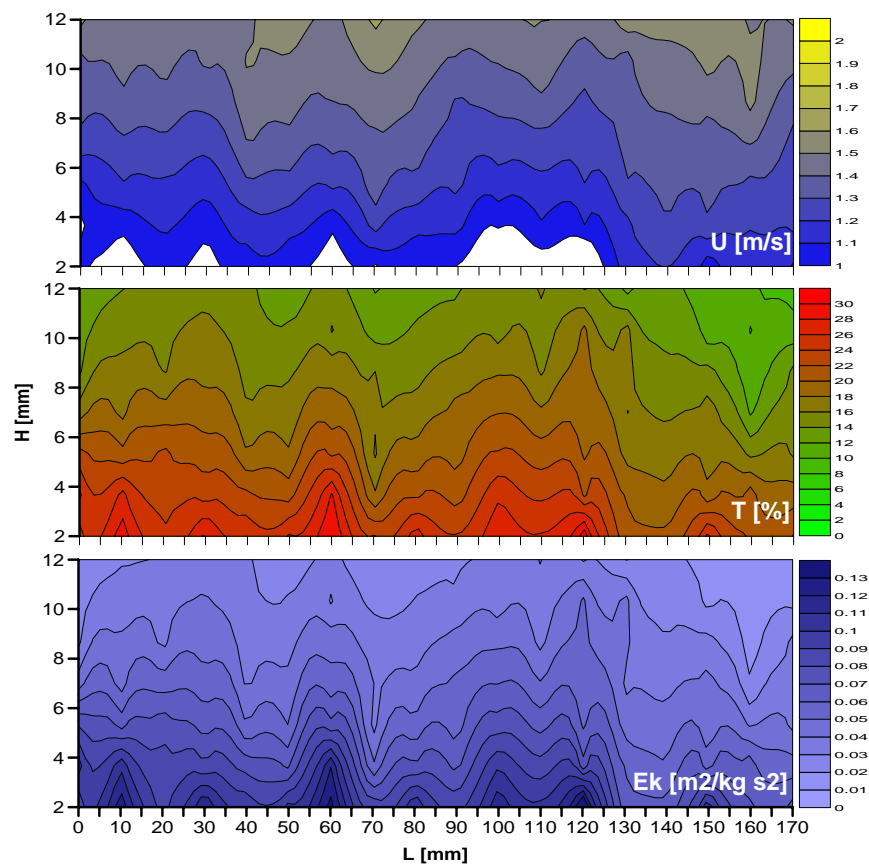
Rys. 10c. Izopowierzchnie prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 20



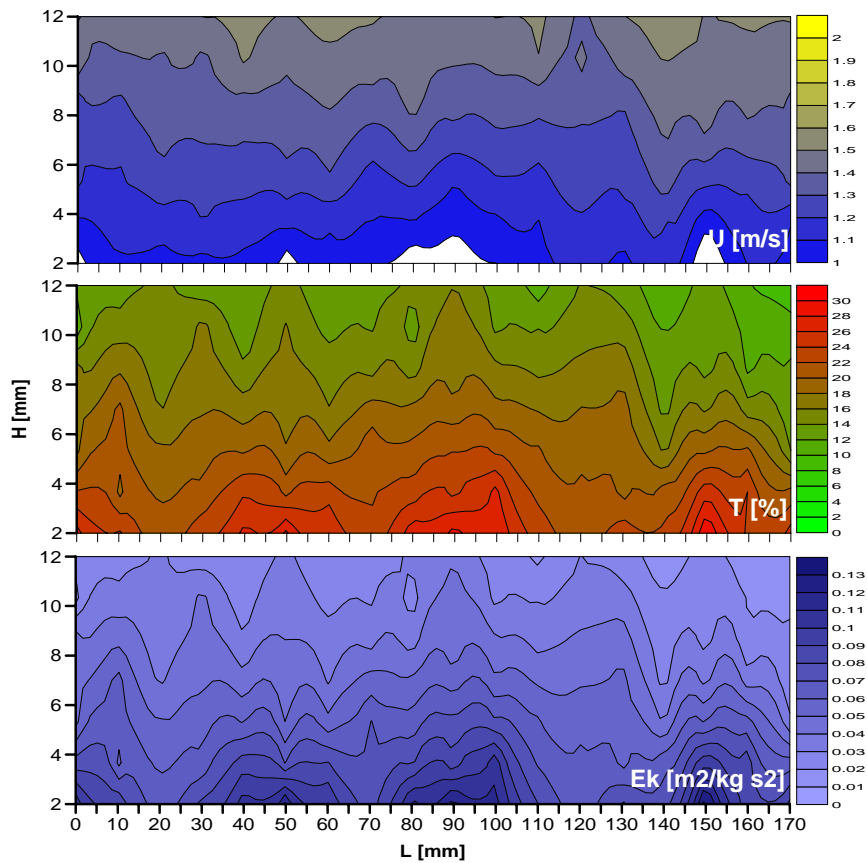
Rys. 10d. Izopowierzchnie prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 40



Rys. 10e. Izopowierznice prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 60

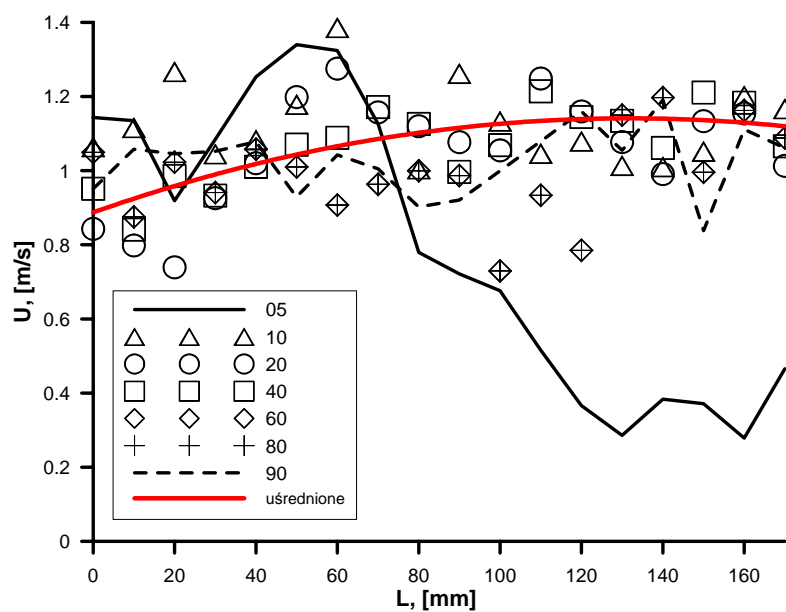


Rys. 10f. Izopowierznice prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 80



Rys. 10g. Izopowierzchnie prędkości, turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w przekroju 90

Opisywane wysokie wartości wielkości turbulentnych wprowadzają dużo niejasności w obrazie przepływu powietrza nad złożem. Rozpatrując poprzeczny rozkład prędkości w przekrojach pomiarowych (rys. 11) można zauważyć dużą przypadkowość w wartościach zmierzonych w odległości 2 mm nad złożem.



Rys. 11. Rozkład prędkości u w poprzek komory pomiarowej nad złożem

Na rys. 11 zamieszczono poprzeczny rozkład wartości prędkości u w kolejnych przekrojach pomiarowych. Poszczególne profile charakteryzują się bardzo przypadkowym rozkładem wartości prędkości, który może być opisany uśrednioną funkcją wielomianową w postaci:

$$Y = 0.89 + 0.0039x - 1.46 \times 10^{-5}x^2$$

Na rys. 11 krzywa ta zaznaczona jako ‘uśrednienie’.

Występowanie silnego gradientu du/dy można zaobserwować tylko w przekroju 05, co jednakże jest spowodowane wpływem warunków wlotowych.

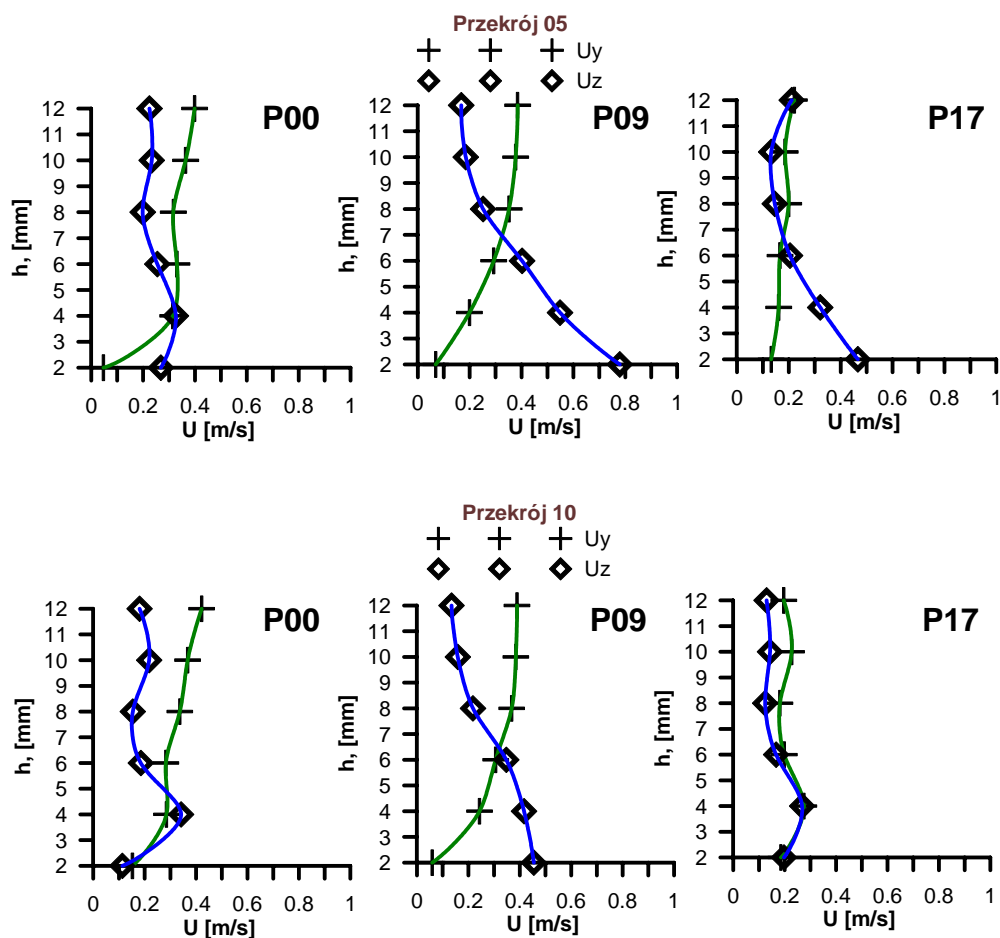
Powyższe spostrzeżenie jest istotne w aspekcie hipotezy Jones’a (por. Skotniczny, 2010) zgodnie z którą:

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\alpha}{\sqrt{k}}(u - u_b)$$

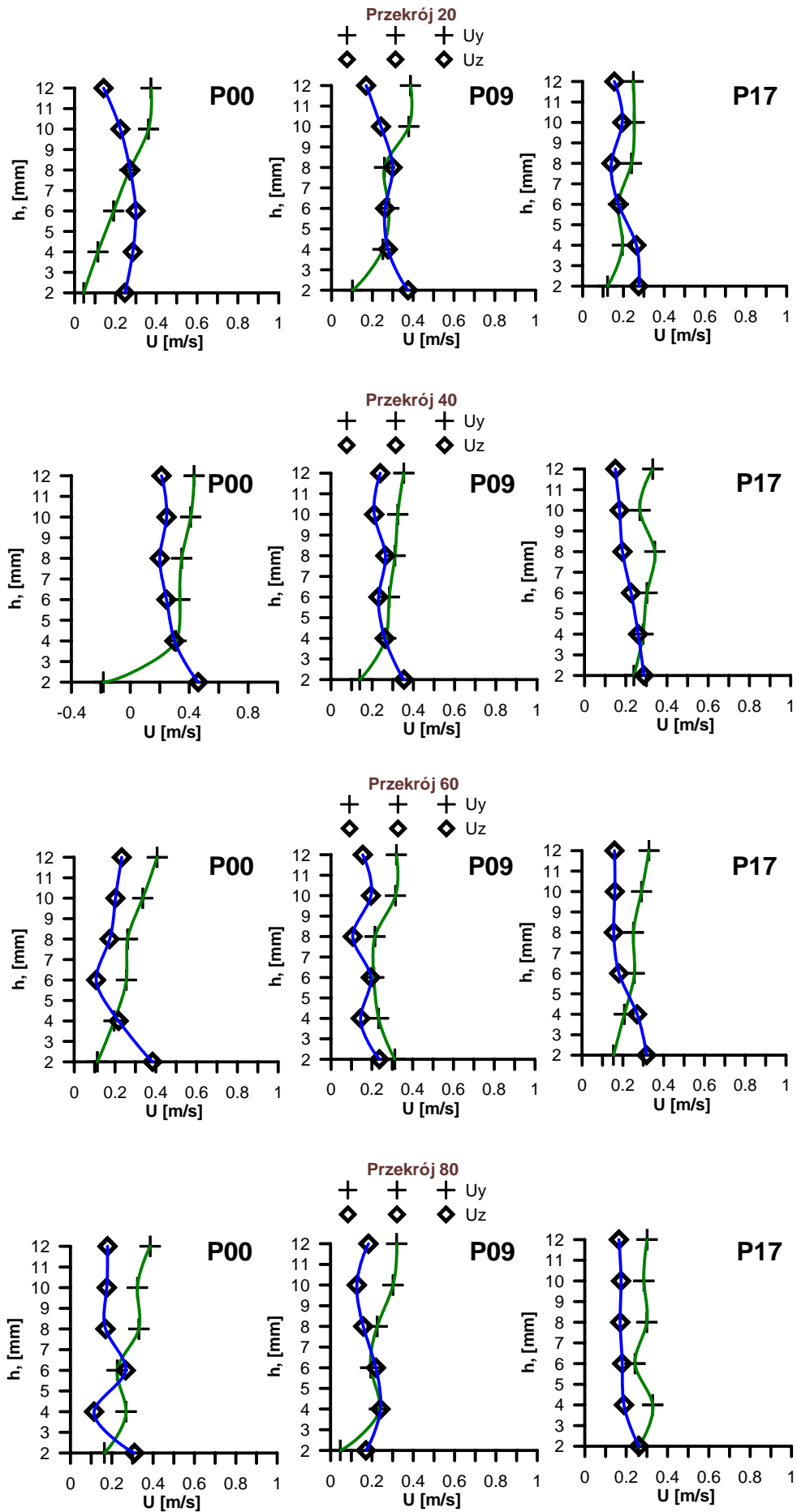
gdzie u_x i u_y składowe wektora prędkości \mathbf{u} odpowiednio podłużna i poprzeczna. W celu weryfikacji przydatności hipotezy Jones’a należało zbadać rozkłady prędkości poprzecznych u_y , oraz dodatkowo u_z . Wartość prędkości u_x była porównywalna z prędkością U z uwagi na silnie anizotropowy przepływ w komorze pomiarowej.

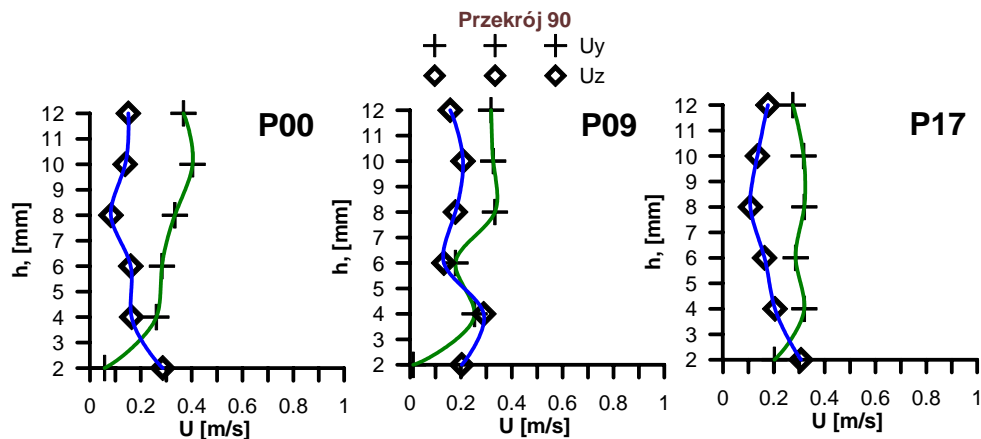
Na rys. 12 zamieszczono wykresy zmienności prędkości u_x i u_z w wybranych punktach pomiarowych dla przekrojów 05 – 90. Pojawiające się w opisach wykresów punkty pomiarowe oznaczają:

- P00 – skrajny prawy – patrząc od strony wlotu,
- P17 – skrajny lewy, natomiast
- P09 – punkt leżący w osi tunelu.



Rys. 12. Rozkład składowych u_y i u_z nad złożem porowatym w wybranych punktach pomiarowych

Rys. 12 cd. Rozkład składowych u_y i u_z nad złożem porowatym w wybranych punktach pomiarowych



Rys. 12 cd. Rozkład składowych u_y i u_z nad złożem porowatym w wybranych punktach pomiarowych

Rozkład wartości składowych wektora prędkości zamieszczonych na rys. 12 wskazuje, że powyżej $h = 12$ mm należy się spodziewać stałych wartości zarówno składowych w kierunku Y jak i Z. Spostrzeżenie to koresponduje z zależnością zaobserwowaną w rozkładzie wartości turbulentnych T i E_k zamieszczonych na rys. 10. Powyżej 10 mm od złoża obserwowany jest wyraźny spadek wartości zarówno intensywności turbulencji jak i jej energii kinetycznej.

Z kolei nad złożem wartości składowych wektora prędkości notują wyraźną zwyżkę, co jest związane z chropowatością powierzchni.

Istotną informacją jest jednak to, że z uwagi na brak możliwości wykonania pomiaru umożliwiającego poznanie zwrotu składowej wektora, przedstawione na rys. 12 wykresy mogą być przyczyną błędnej interpretacji charakteru przepływu w omawianym obszarze. Dodatkowo, należy zwrócić uwagę na wartości mierzone za pomocą termooanemometru trójwłóknowego. Zmierzone wartości składowych nad złożem rzadko przekraczały wartość 0.6 m/s, oscylując najczęściej w granicach 0.4 m/s. Z teorii pomiarów termooanemometrycznych wynika, że dla przepływów charakteryzujących się niskimi wartościami składowych wektora prędkości należy stosować zmodyfikowane charakterystyki wyznaczające prędkość efektywną dla poszczególnych włókien.

6. Dyskusja uzyskanych wyników

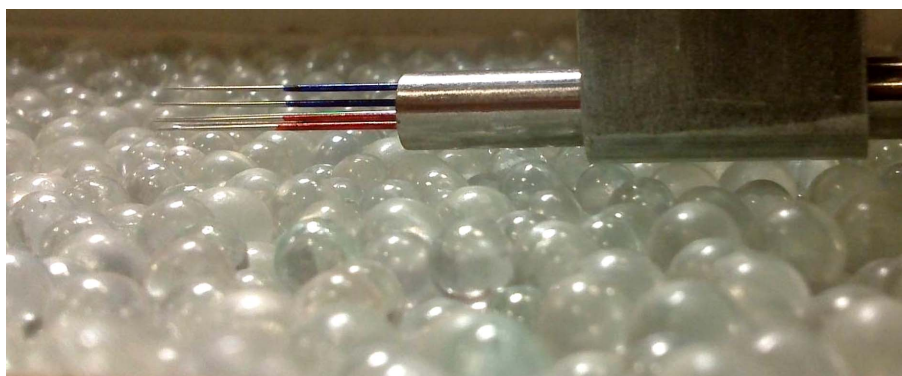
Obserwowane zjawisko deformacji warstwy przyściennej polegające na zniszczeniu subwarstwy lepkiej oraz mocnemu ściśnięciu warstwy odpowiadającej logarytmicznemu profilowi wektora prędkości pojawia się na przykład podczas przepływu płynu w przewodzie o rozszerzających się ścianach (dyfuzor). Jest szczególnie mocno widoczna w obszarze tzw. separacji warstwy przyściennej.

Z zamieszczonych w niniejszym artykule danych wynika, że przebieg prędkości w obrębie spodziewanej subwarstwy logarytmicznego rozkładu wektora prędkości, szacowanej na wartość parametru y^+ z przedziału $10 > y^+ > 100$ jest silnie zaburzony. Może to wynikać ze struktury powierzchni rozdzielającej złożo porowate i strugę powietrza. Jak wynika z analiz teoretycznych zamieszczonych w części pierwszej artykułu, chropowatość powierzchni posiada istotny wpływ na wartość i rozkład wektora prędkości w pobliżu ściany. W omawianym przypadku, gdzie wartość chropowatości powierzchni wykracza poza granice spotykane w przepływach technicznych, nierównomierność rozkładu nierówności powierzchni wprowadza trudne do przewidzenia i co najważniejsze trudne do zmierzenia niestacjonarne struktury turbulentne. Wpływ jakości powierzchni na parametry przepływowe jest wówczas jeszcze silniejszy.

Zaobserwowana zmienność wartości u_y i u_z nad złożem pokazana na wykresach rys. 12 może wynikać z nakładających się na siebie dwóch czynników:

A. Duża chropowatość (nierówność) powierzchni rozdziału (Rys. 13)

Występowanie tej struktury geometrycznej powoduje generowanie gruboskalowych struktur turbulentnych o wartościach trudnych do oszacowania. Struktury powstałe z oderwania warstwy przyściennej następnie łączą się ze sobą w sposób addytywny tworząc dużą strukturę na kształt turbulentnej warstwy przyściennej.



Rys. 13. Powierzchnia złoża porowatego

B. Wymiana masy pomiędzy złożem a omywającą go strugą.

Posiłkując się wynikami wykonanej poprzednio analizy numerycznej można założyć, że w przekrojach rozmieszczonych w sąsiedztwie wlotu do komory pomiarowej (przekrój W) należy się spodziewać intensywnego ‘napowietrzania’ złoża; z kolei w przekrojach leżących w pobliżu wylotu komory pomiarowej należy oczekiwać zjawiska odwrotnego – to znaczy ‘odsysania’ powietrza zawartego w objętości złoża.

Symultaniczne występowanie zjawisk przepływowych pochodzących z wyżej wymienionych czynników istotnie utrudnia pomiar wielkości charakteryzujących turbulentną warstwę przyścienną.

Zaobserwowane w poprzednich badaniach (Skotniczny, 2010. 2011) różnice w wynikach symulacji numerycznych, które zgadzają się z eksperymentem do pewnego zakresu prędkości (około 3 m/s) wynikają z tego, że powyżej prędkości krytycznej dla danej geometrii następuje oderwanie warstwy przyściennej tworzącej się na powierzchni kulek a następnie propagacja tak utworzonej struktury turbulentnej wzdłuż osi przepływu. Tego typu zachowanie strugi powietrza nie jest uwzględnione w komercyjnym kodzie do obliczeń CFD.

7. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych trójwymiarowych rozkładów wektora prędkości, intensywności turbulencji oraz energii kinetycznej turbulencji w obrębie obszaru leżącego bezpośrednio nad powierzchnią złoża porowatego utworzonego z ballotyny o średnicy kulek $D = 5$ mm.

W wyniku analizy danych eksperymentalnych jak również danych historycznych uzyskanych z pomiarów oraz analiz numerycznych z lat ubiegłych można sformułować następujące wnioski:

- Warstwa przyścienna tworząca się w sąsiedztwie płaszczyzny podziału złoża porowate – struga powietrza jest silnie zdeformowana. Kształt uzyskanych profilów prędkości, oraz niestacjonarne zjawiska turbulentne powstające w sąsiedztwie powierzchni podziału uniemożliwiają przeprowadzenie jednoznacznego opisu zjawisk przepływowych mających miejsce w obszarze przyściennym, a mającym wpływ na efektywność wymiany masy w kompleksie złoża porowate – omywająca go stycznie struga powietrza.
- Brak subwarstwy lepkiej spowodowany stanem powierzchni podziału uniemożliwia przedstawienie zmierzonej warstwy przyściennej w półlogarytmicznym układzie odniesienia w odniesieniu do parametrów u^+ , y^+ z powodu niemożliwości określenia naprężeń lepkich na ścianie τ_* .
- Warstwa przyścienna nie tworzy się bezpośrednio nad złożem porowatym począwszy od przekroju wlotowego komory pomiarowej, jest natomiast przeniesiona z całego tunelu dolotowego i nad złożem porowatym ulega degeneracji.
- Istnieje przypuszczenie, że przepływ powietrza w obszarze przyściennym jest superpozycją dwóch dominujących w tym obszarze zjawisk przepływowych – transportu struktur wirowych powstałych w procesie oderwania lokalnych warstw przyściennych od powierzchni kulek leżących na powierzchni złoża oraz wymiany masy pomiędzy strugą powietrza a złożem porowatym, która jest szczególnie intensywna w pobliżu przekrojów wlotowego i wylotowego z komory pomiarowej.
- Sonda termoanemometryczna trójwłóknowa z uwagi na swoje gabaryty może zakłócać przepływ w obrębie mierzonej warstwy przyściennej. Dodatkowo, z uwagi na relatywnie małe zmierzone wartości

składowych wektora prędkości należy wywzorcować sondę dla niższych wartości oraz zastosować inne postacie wzorów opisujących wymianę ciepła między włóknem a płynem.

- Oprócz chropowatości powierzchni na kształt warstwy przyściennej mogą mieć wpływ również warunki wlotowe do komory pomiarowej.

W świetle powyższych spostrzeżeń, które w pewnej mierze podważają przeprowadzone badania, należy przedsięwziąć dodatkowe kroki związane z konstrukcją stanowiska, prowadzenia sondy pomiarowej, jej orientacji przestrzennej oraz rodzaju prowadzonych badań. Przede wszystkim należy przeprowadzić pomiar warstwy przyściennej utworzonej nad powierzchnią wykonaną z pojedynczej warstwy kulek ballotyny ułożonych w układzie regularnym (kubicznym). Dzięki temu zabiegowi zostanie wyeliminowane zjawisko wymiany masy pomiędzy strugą powietrza a materiałem porowatym.

Praca została wykonana w roku 2012 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*, Journal of Fluid Mechanics.
- Elsner, J.W., (1988): *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa.
- Larson R.E., Higdon J.J.L., (1985): *Microscopic flow near the surface of two dimensional porous media. Part 1*, Journal of Fluid Mechanics, **166**, 449.
- Nield D., Bejan A., (2006): *Convection in Porous Media*, Springer Science + Business and Media.
- Skotniczny P., (2011): *Określenie prędkości poślizgu przy stycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczo-Przemysłowej PAN, **10**.
- Skotniczny P., et al., (2010): *Efektywne metody wychładzania zwałowiska pogórniczego – symulacja komputerowa – Badania eksperymentalne wymiany masy i energii w ośrodku porowatym*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczo-Przemysłowej PAN, **9**.
- 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. Cz. I: Turbulentna warstwa graniczna w sąsiedztwie ścianek chropowatych*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczo-Przemysłowej PAN, **13**.

Factors Affecting the Velocity Shift and the Deformation of the Boundary Layer for Steady Air Flows over Porous Bed

Part II: Experimental Research

Abstract

The second part of the paper presented here describes the results of experimental research concerning the behaviour of the boundary layer in the air stream moving tangentially with respect to rough, porous, and permeable bed. In particular, factors affecting the propagation of velocity vector, form of the boundary layer, turbulence intensity, and turbulence kinetic energy in the zone of logarithmic velocity profile within the boundary layer have been analysed. The authors have undertaken an attempt to evaluate the influence of certain measured parameters on the magnitude velocity shift u_f occurring at the interface between air stream and rough porous bed. The presented paper involves the results of experimental investigations performed in the years 2009-2011 as well as research realised in the year 2012.

Keywords: porous bed, flow adjacent rough walls, shift velocity