

Efektywne metody wychładzania zwałowiska pogórniczego – symulacja komputerowa – Badania eksperymentalne wymiany masy i energii w ośrodku porowatym

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, JERZY GORGON, STANISŁAW MILLAK, ROBERT NOWAK

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

Streszczenie

Mechanizm wymiany masy i energii pomiędzy porowatym medium a otoczeniem w dalszym ciągu nie jest do końca opisany. Szereg zjawisk przepływowych towarzyszących procesowi wymiany masy pomiędzy materiałem porowatym a otoczeniem szczególnie w przypadku niestandardowej orientacji przestrzennej materiału porowatego względem przepływającej strugi powietrza stanowi szerokie pole do eksploracji.

W klasycznym rozumieniu zagadnienia, który najczęściej ma zastosowanie w przepływach technicznych materiał porowaty stanowi ośrodek, przez który pod zadaniem ciśnieniem przepływa płyn. W tego typu zagadnieniu ośrodek porowaty posiada cechy użytkowe, stanowiąc część projektowanej, bądź regulowanej instalacji przepływowej (zagadnienia filtracji, spalanie wewnętrzne itp.).

W przypadku omawianym w artykule porowatość stanowi element o cechach mających negatywny wpływ na efektywność wymiany masy i energii pomiędzy obszarem porowatym a otoczeniem. Przeprowadzone dotychczas analizy numeryczne, oraz badania eksperymentalne (Skotniczny, 2008; Skotniczny i in., 2009) wskazują na rozbieżność wyników symulacji oraz eksperymentu w zakresie uzyskiwanych rozkładów temperatur wewnątrz złoża porowatego.

W artykule skoncentrowano się na zjawisku powierzchniowej penetracji złoża przepływającą stycznie do niego strugą powietrza. Celem prac opisanych w artykule jest próba pośredniego opisu zjawiska występowania niezerowej prędkości przepływu powietrza na granicy materiał porowaty-struga powietrza (prędkość poślizgu), który może mieć wpływ na mechanizm wymiany energii pomiędzy materiałem porowatym a omywającą go strugą powietrza.

Słowa kluczowe: medium porowate, wymiana masy i energii, termoanemometria

1. Wstęp

W przeprowadzanych w minionych latach eksperymentach mających na celu przybliżenie zjawiska wymiany energii pomiędzy złożem porowatym a omywającą go stycznie strugą powietrza (Skotniczny, 2008; Skotniczny i in., 2009) dostrzegalne były różnice w rozkładzie temperatur pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych a wynikami symulacji numerycznych. Początkowo uznawano, że wynikłe różnice wiążą się z niejednorodnymi warunkami eksperymentu numerycznego oraz laboratoryjnego. Do potwierdzenia tej hipotezy należałoby wykonać eksperyment dotyczący aspektu wymiany masy w kompleksie złoża porowate – omywająca go struga.

Istnieją jednakże, dwie przesłanki do traktowania zauważonego zjawiska w aspekcie szerszym niż tylko niedokładność pomiarów spowodowana na przykład niejednorodnością pola temperatur w otoczeniu stanowiska:

- Wymiana ciepła pomiędzy założonym złożem porowatym a omywającą go strugą powietrza może być inna niż przedstawiona w komercyjnym solverze FLUENT ze względu na złożony mechanizm wymiany energii na stykach powierzchni tworzących złoża kulek.
- W równaniach opisujących ruch płynu porowatość przedstawiona jest jako człon źródłowy opisany równaniem Forcheimera (Fluent User Manual, 2002). W rzeczywistości mechanizm wymiany masy

może być bardziej złożony, szczególnie w wierzchnich warstwach złoza porowatego, gdzie występuje tak zwana „prędkość poślizgu”.

Szczególnie drugie spostrzeżenie warto jest sprawdzić.

Równanie Darcy (1856) w postaci

$$u = -\frac{1}{\mu} K \nabla p \quad (1)$$

W świetle badań minionych kilkudziesięciu lat nie opisuje w pełni złożonego charakteru przepływu płynu przez medium porowate. Liczne modyfikacje i rozszerzenia stosowności równania (1) na przestrzeni lat zaowocowały bardziej lub mniej dokładnymi rozwiązaniami zagadnienia (np. równanie Dupni-Forchheimer, zaimplementowane w solverze FLUENT).

Podstawowym problemem przy opisie przepływu płynu przez materiał porowaty o skończonych wymiarach jest konieczność „złączenia” pola prędkości przepływu odbywającego się wewnątrz materiału z przepływem strugi swobodnej omywającej materiał porowaty. W przypadku omywania nieprzepuszczalnej ściany strugą płynu wymagana jest ciągłość rozkładów prędkości oraz naprężeń stycznych w pobliżu ściany, co w przypadku przepływu strugi płynu w pobliżu materiału porowatego nie jest możliwe z uwagi na zbyt niski rząd równania Darcy w stosunku do równania Naviera-Stokesa.

W literaturze przedmiotu można spotkać głównie dwa obejścia tego problemu. Pierwsze z nich, zaproponowane przez Beaversa i Josepha (Beavers i Joseph, 1967) polega na opisanu przepływu wewnątrz materiału porowatego klasycznym równaniem Darcy, natomiast warunek brzegowy, oprócz wyżej wymienionych rozszerzyli o wyrażenie (2)

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\alpha}{k^2} (u - u_D) \quad (2)$$

gdzie:

- u – lokalna prędkość styczna,
- u_D – prędkość styczna wyznaczona na podstawie równania Darcy,
- α – współczynnik poślizgu zależny od lokalnej geometrii materiału porowatego.

W opisywanym podejściu kluczową rolę odgrywa współczynnik poślizgu i jak wynika z badań prowadzonych między innymi przez Saffmana (Saffman, 1971) dowolne określenie powierzchni nominalnej ($y = 0$) owocuje dużą rozbieżnością w wartościach α , sięgającą od 1.3, 4 a nawet 7.

Drugim sposobem opisywanym w literaturze jest zastąpienie równania Darcy wyrażeniem wyższego rzędu. Zostało to zaproponowane przez Brinkmana (Brinkman 1947). Wówczas postać wyrażenia opisującego przepływ płynu przez materiał porowaty przyjmuje postać (3)

$$-\nabla p + \mu^* \nabla^2 u - \frac{\mu}{k} u = 0 \quad (3)$$

Pierwsze dwa człony wyrażenia (3) opisują lokalną dywergencję tensora naprężeń lepkich, w skład którego wchodzi lepkość efektywna (μ^*), a trzeci człon opisuje rozkład oporu frakcji stałej materiału porowatego.

Relatywnie najmniej badań eksperymentalnych zostało przeprowadzonych w celu weryfikacji równania Brinkmana. Głównym problemem jest wyznaczenie wartości μ^* . Jednym z przybliżeń jest założenie, że lepkość efektywna jest równa lepkości a więc postać równania (3) przedstawia się następująco (4)

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 u - \frac{\mu}{k} u = 0 \quad (4)$$

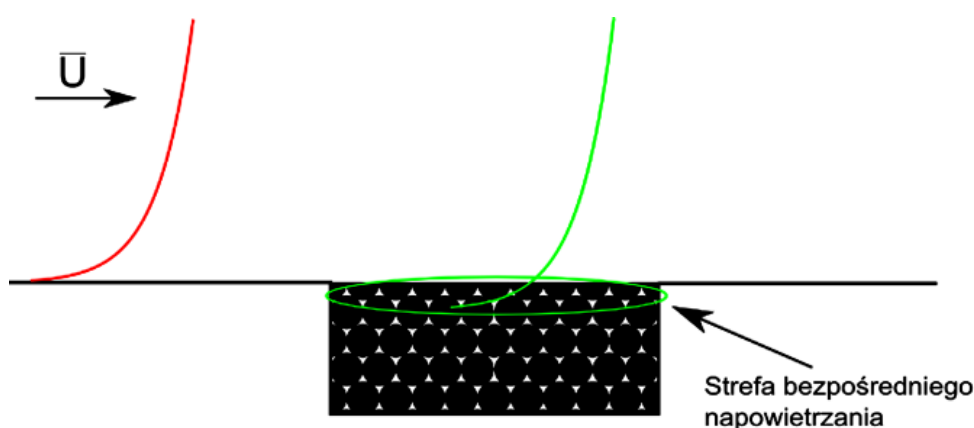
Jednak, jak wynika z eksperymentów Howerla (1974) taka postać równania ma zastosowanie tylko do materiałów porowatych o strukturze homogenicznej z regularnie rozłożoną fazą stałą. Przydatność równania Brinkmana jak wynika z prac eksperymentalnych oraz teoretycznych (Beavers, Sparrow, Larson, Higdon) jest bardzo ograniczona.

Również wprowadzenie do obliczeń prędkości poślizgu ma znaczenie tylko wtedy, gdy złożę porowate zbudowane jest z elementów regularnych (walce, kule itp.) o ekstremalnie niskiej koncentracji (Larson i Higdon, 1985), gdzie rozmiar porów jest rzędu średnic fazy stałej.

W związku z niejednoznacznością istniejących danych literaturowych konieczne było rozpoczęcie cyklu badań eksperymentalnych, zestawienie ich z danymi numerycznymi co powinno ułatwić ocenę wpływu rozkładu prędkości nad złożem porowatym w aspekcie intensyfikacji wymiany masy pomiędzy złożem a omywającą go strugą płynu (powietrza)

2. Idea eksperymentu

Przeprowadzony eksperyment miał na celu wyznaczenie rozkładu wektora prędkości nad złożem porowatym w konfiguracji geometrycznej opisanej w poprzednim artykule (Skotniczny i in., 2009) (rys. 1). Przy braku możliwości pomiaru rozkładów prędkości wewnątrz złoża jedynie metoda porównawcza może dać jakiegokolwiek rezultaty.



Rys. 1. Napowietrzanie warstwy wierzchniej złoża porowatego

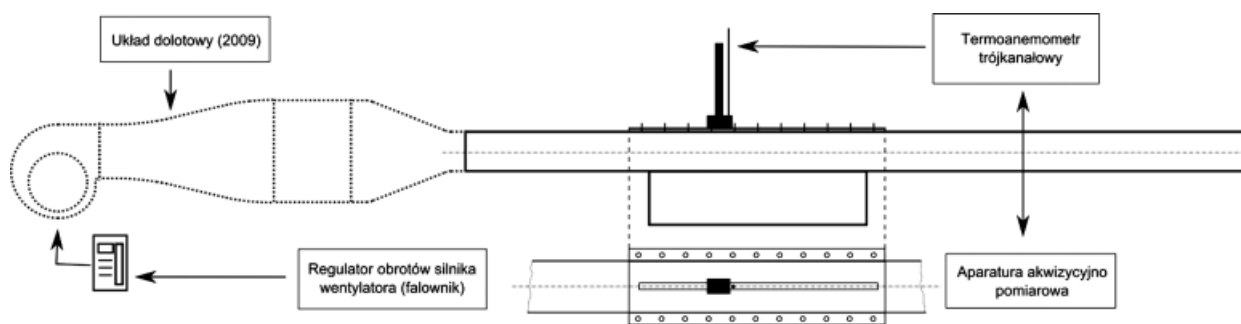
Uzyskane z pomiarów profile prędkości następnie zostały porównane z profilami uzyskanymi z obliczeń numerycznych. Zgodność rozkładów prędkości numerycznych i eksperymentalnych gwarantowałaby słuszność zastosowanego w obliczeniach modelu matematycznego przepływu, a co jest z tym związane dokładne określenie warunków przepływowych powietrza wewnątrz złoża porowatego.

3. Stanowisko badawcze

Do przeprowadzenia omawianego eksperymentu konieczna była modyfikacja paru elementów istniejącego już stanowiska pomiarowego (rys. 1). Przede wszystkim z uwagi na konieczność sondowania przekrojów nad złożem porowatym konieczne było dorobienie suportu umożliwiającego przesuw czujnika pomiarowego w płaszczyźnie osi tunelu nad złożem (rys. 2b) Widok czujnika w przestrzeni pomiarowej zaprezentowano na rys. 5.

Ponadto, mając na uwadze doświadczenie z poprzednich pomiarów konieczna była modyfikacja układu zasilania silnika wentylatora bębnowego. W poprzedniej wersji stanowiska zmiana prędkości obrotowej wirnika wentylatora realizowana była poprzez zmianę napięcia zasilania silnika (autotransformator). Rozwiązanie to nie było dobre z uwagi na brak stabilności napięcia w sieci, a więc również obrotów wirnika. Obecnie został zastosowany inwerter częstotliwości (falownik) dla odbiorników jednofazowych (rys. 2a).

Zastosowanie falownika umożliwiło precyzyjne zadawanie prędkości strugi powietrza w przekroju wlotowym komory pomiarowej. Na rys. 3 zaprezentowano zmianę wartości prędkości strugi powietrza w przekroju wlotowym w funkcji częstotliwości pracy inwertera. Jak widać, zmiana prędkości w zakresie częstotliwości 20-50 Hz jest liniowa. Prędkości poniżej 20 Hz nie były brane pod uwagę z powodu dużych wibracji silnika wentylatora.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

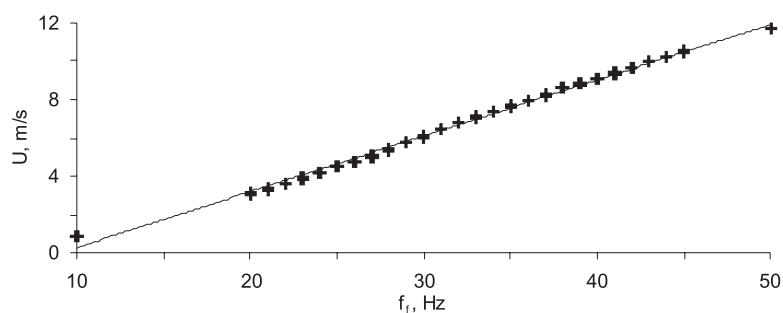


a)



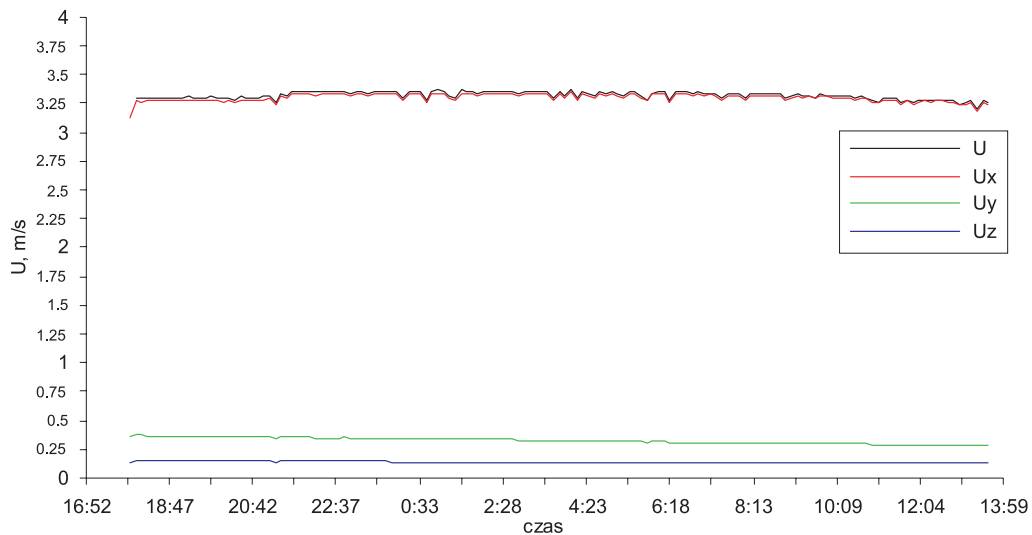
b)

Rys. 2. a) Falownik b) suport sondy pomiarowej



Rys. 3. Zmiana prędkości przepływu strugi powietrza w funkcji częstotliwości falownika

Dziewiętnastogodzinne pomiary, sprawdzające jakość napędu oraz stabilność strugi powietrza potwierdzają słuszność podjętych kroków. Wyniki rejestracji prędkości w przekroju wlotowym do komory pomiarowej zaprezentowano na rys. 4.



Rys. 4. Zmiana wartości prędkości strugi powietrza w przekroju wlotowym do komory pomiarowej

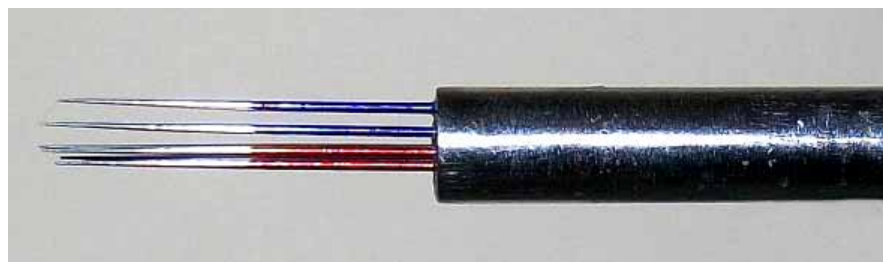


Rys. 5. Sonda w przestrzeni pomiarowej

4. Czujniki termooanemometryczne trójwłókowe – zmiana układu odniesienia

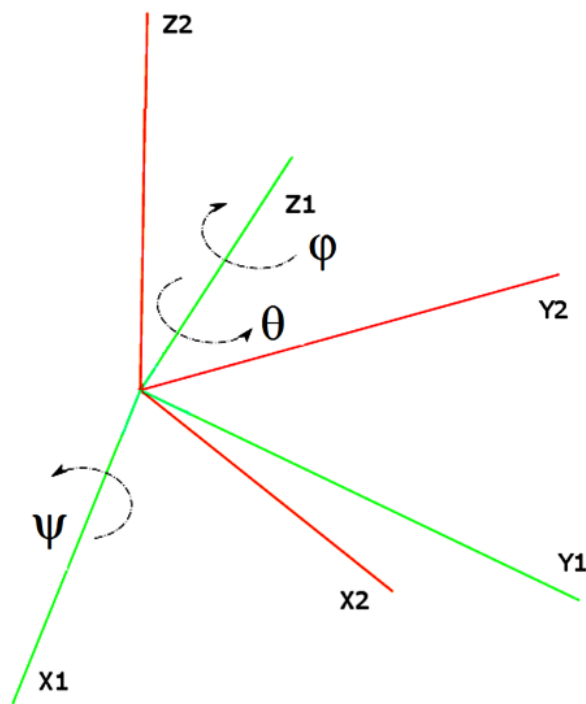
Do przeprowadzenia omawianych w artykule pomiarów wykorzystano czujnik termooanemometryczny trójwłókowy (rys. 6) wraz z termooanemometrem trójkanałowym ATU2001, produkcji IMG-PAN.

Konstrukcja czujnika umożliwiała pomiar wektora prędkości przepływającego powietrza w układzie współrzędnych związanych z osią sondy (przekątna sześcianu). W omawianych pomiarach wymagany był pomiar wektora w układzie współrzędnych związanych z osią tunelu pomiarowego. W związku z tym ko-



Rys. 6. Sonda termooanemometryczna trójwłókowa

nieczne było zastosowanie transformacji układu współrzędnych $X_1Y_1Z_1$ do układu współrzędnych $X_2Y_2Z_2$ (rys. 7). Najefektywniejszą metodą było zastosowanie przekształcenia polegającego na wykonaniu trzech obrotów wokół odpowiednich osi układu odniesienia. Metoda ta znana jest pod nazwą Kątów Eulera. Jest to układ trzech kątów, za pomocą których można jednoznacznie określić wzajemną orientację dwu kartezjańskich układów współrzędnych o jednakowej skrętności w trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej.



Rys. 7. Zmiana układu współrzędnych

Potrzebna transformacja została uzyskana dla kątów $\varphi = -45^\circ$, $\psi = 35.4^\circ$ oraz $\theta = 90^\circ$. Macierz całkowitego obrotu układu X_1, Y_1, Z_1 do układu X_2, Y_2, Z_2 przedstawia się następująco (5):

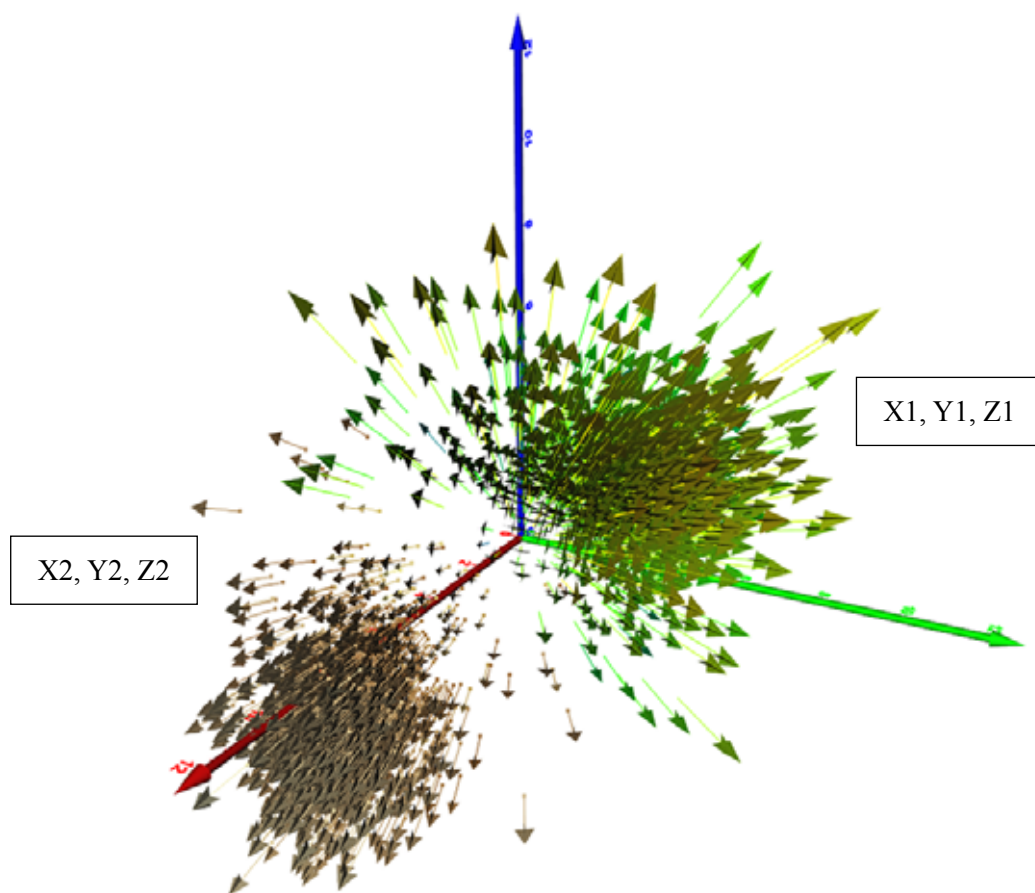
$$\begin{pmatrix} \cos(\psi) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) & \cos(\psi) \cdot \sin(\varphi) + \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) & \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) & -\sin(\psi) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) & -\cos(\psi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) & \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Wartość elementów powyższej macierzy dla znanych wartościach kątów obrotów wynosi (6)

$$A_5 = \begin{pmatrix} 0.576 & 0.576 & 0.579 \\ 0.41 & 0.41 & -0.815 \\ -0.707 & 0.707 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Po wykonaniu stosownych obliczeń, zbiór wektorów prędkości z pojedynczej realizacji pomiarowej został przedstawiony w nowym układzie współrzędnych. Jest to zilustrowane na rys. 8.

Proces przeliczający orientację dwóch układów współrzędnych został zaimplementowany w postaci odrębnej procedury w programie pomiarowym.

Rys. 8. Transformacja wektorów z układu X_1, Y_1, Z_1 do X_2, Y_2, Z_2

5. Aplikacja pomiarowa, aplikacja do obróbki danych eksperymentalnych

Poprzednio akwizycja danych eksperymentalnych wykonywana była w oparciu o kartę przetwornikową, szesnasto bitową NI-USB6009 (Skotniczny i in., 2009). Po analizie danych okazało się, że karta podczas pracy wprowadza dodatkowe zakłócenia w rejestrowanych przebiegach czasowych. Stąd też zdecydowano się na wymianę dotychczasowo stosowanego przetwornika na również szesnasto bitowy MC-USB-1608FS. Ten krok niestety pociągnął za sobą konieczność stworzenia nowego systemu pomiarowego. Program pomiarowy został napisany w środowisku RAD Delphi 2006, z wykorzystaniem załączonych przez producenta modułu pomiarowego bibliotek dynamicznych (DLL)

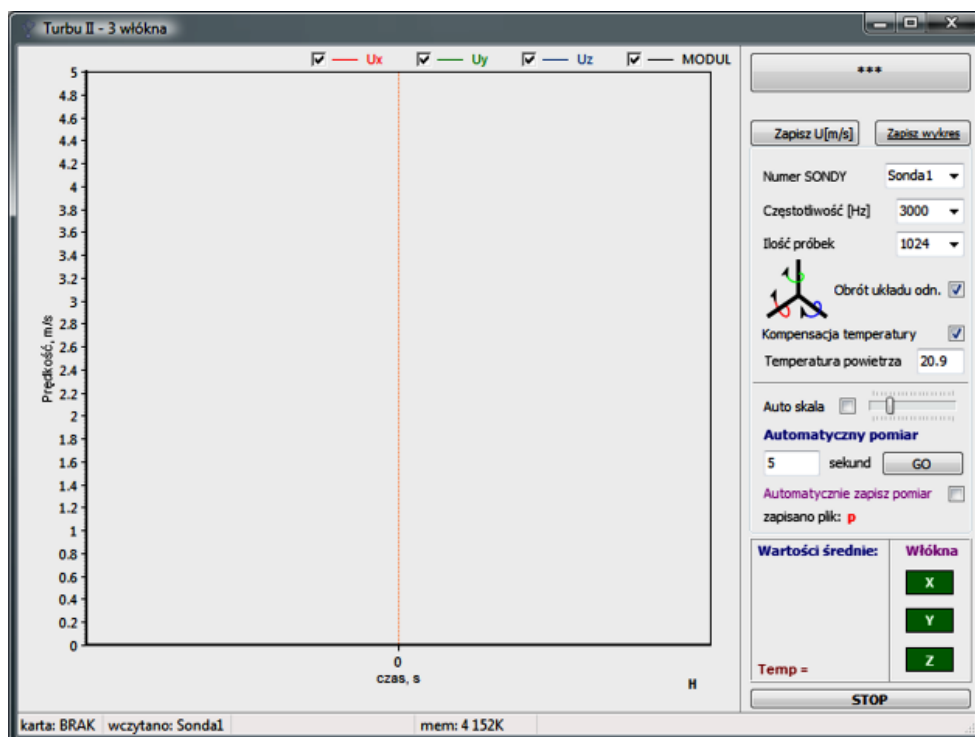
W obecnej wersji program umożliwia pomiar składowych wektora prędkości (u , v , w), wyznaczanie intensywności turbulencji (podłużnej – T_u , poprzecznych T_v , T_w).

Pomiar można wykonywać w układzie współrzędnych związanym z osią sondy, lub z osią tunelu pomiarowego.

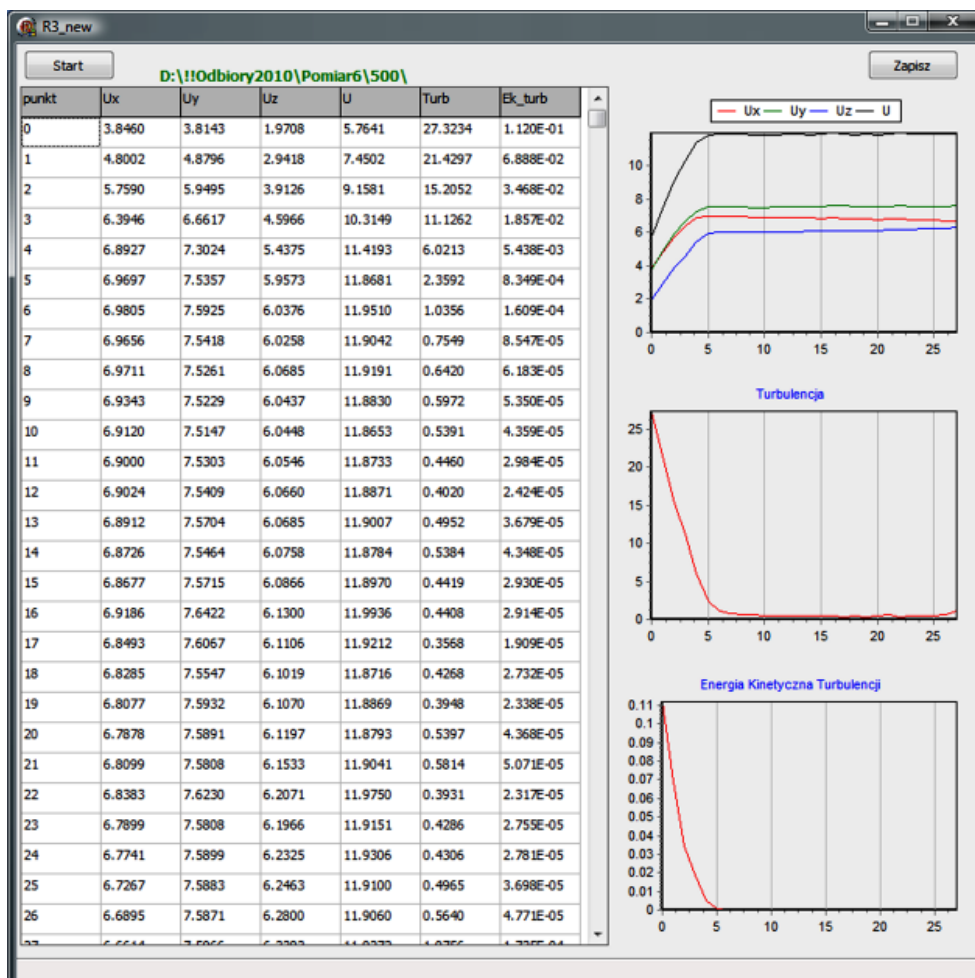
Główny formularz programu został przedstawiony na rys. 9 Ze względu na ograniczenia sprzętowe (po stronie karty pomiarowej) program umożliwia pomiar z maksymalną częstotliwością próbkowania $f_p = 3000$ Hz, na 4 kanały, oraz odpowiadającą jej całkowitą liczbą obserwacji w pojedynczej realizacji pomiarowej wynoszącą 8196.

Ponadto, w programie zastosowano procedurę pomiaru z automatycznym zapisem danych pomiarowych. Jest to szczególnie przydatne podczas prowadzenia eksperymentów długoterminowych.

Do dalszej obróbki zarejestrowanych sygnałów pomiarowych służy program R3_new (rys. 10). W obecnej wersji program umożliwia obliczenie wartości średnich składowych wektora prędkości, intensywności turbulencji, zgodnie ze wzorem (7), raz energii kinetycznej turbulencji E_k (8). Dzięki modularnej strukturze programu możliwa jest późniejsza implementacja dodatkowych funkcji, takich jak wyznaczenie wartości składowych tensora naprężeń turbulentnych.



Rys. 9. Główny formularz programu pomiarowego Turbu II



Rys. 10. Formularz programu obliczeniowego R3_new

$$T = \sqrt{\frac{1}{3}(T_u^2 + T_v^2 + T_w^2)} \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad (8)$$

Program zapisuje obliczone dane w wygodnej do dalszej obróbki, lub wizualizacji postaci plików tekstowych.

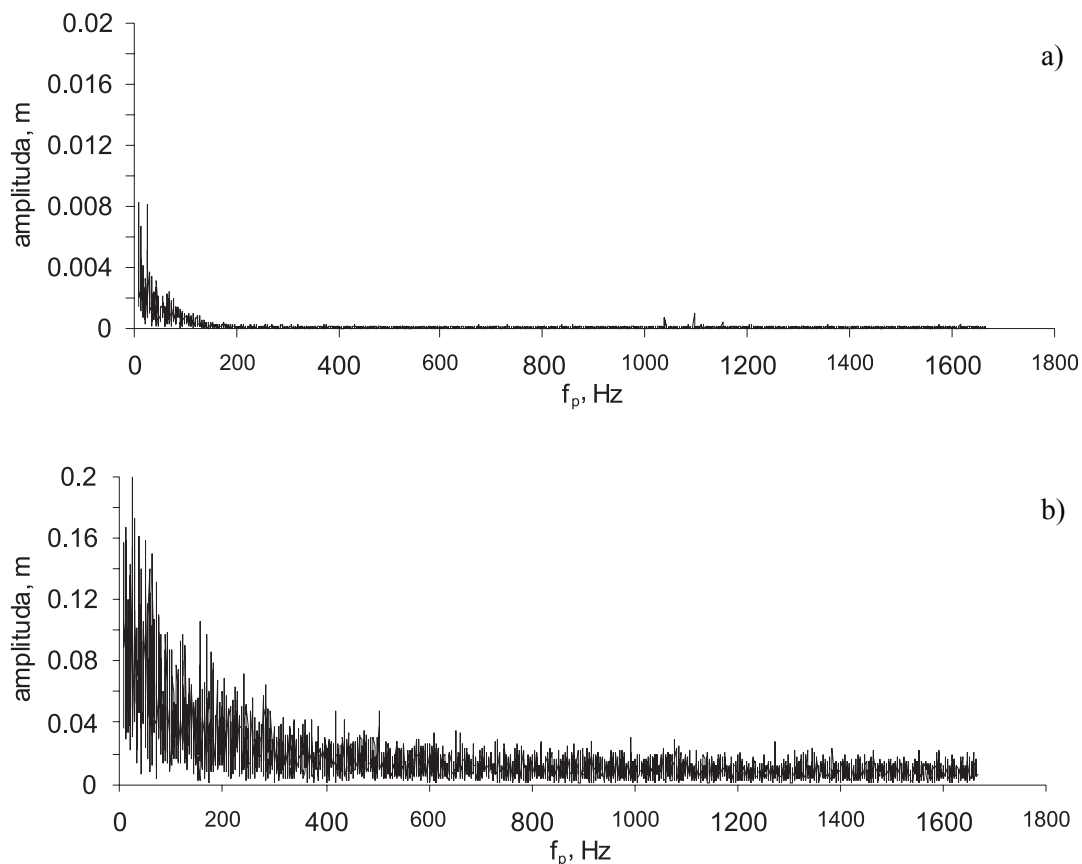
6. Eksperyment

Ponieważ pomiar rozkładów prędkości wewnątrz złoża porowatego jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, a przy zastosowaniu termooanemometru trójwłóknowego wręcz niemożliwym dlatego zdecydowano się na pomiar pośredni prędkości nad złożem.

Spodziewany rozkład prędkości nad złożem porowatym utworzonym z kulek ballotyny powinien charakteryzować się występowaniem silnej turbulencji, głównie z powodu stanu powierzchni (nierówności rzędu średnicy kulki – około 5 mm), w związku z tym należało wstępnie określić minimalną częstotliwość próbkowania podczas pomiaru

W tym celu zrealizowano dwa przykładowe pomiary dla maksymalnej wartości prędkości przepływu strugi powietrza w sekcji pomiarowej tunelu. Wyniki eksperymentu w postaci widm amplitudowo-częstotliwościowych zmierzonych sygnałów zamieszczono na rys. 11.

Jak łatwo można zauważyć, struktury turbulentne występujące w osi tunelu pomiarowego (rys. 11 a) charakteryzują się niską amplitudą i zawierają się w paśmie częstotliwości do około 200 Hz. Z kolei struktury turbulentne generowane przez nierówności powierzchni złoża porowatego posiadają znacznie większe

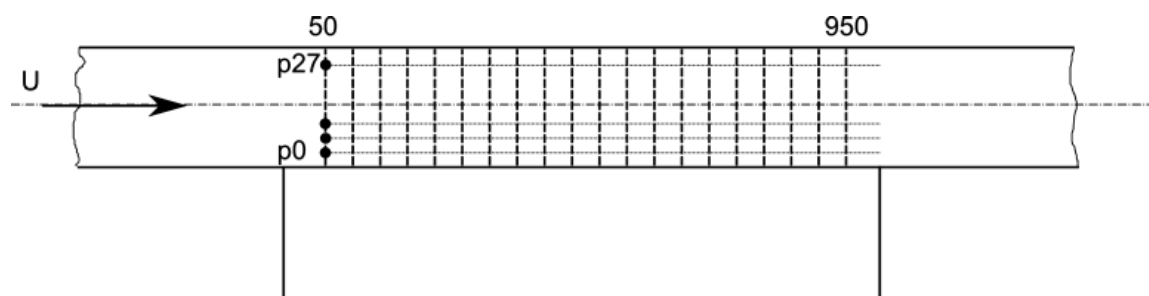


Rys. 11. Widma amplitudowo-częstotliwościowe próbek: a) w przepływie swobodnym w połowie długości komory, b) w odległości około 5 mm od złoża porowatego

amplitudy drgań (prawie rząd wielkości większe niż struktury występujące w osi tunelu) i szerszy zakres częstotliwościowy – do około 500 Hz.

W obu przypadkach, zgodnie z twierdzeniem Shannona (*lit*), częstotliwość próbkowania wynosząca 3000 Hz jest wystarczająca do przeniesienia struktur turbulentnych występujących w omawianym przepływie.

Do pomiarów przestrzeni komory została podzielona na 20 przekrojów pomiarowych w których w osi symetrii komory wykonywane były rejestracje prędkości przepływającej strugi powietrza w 28 punktach pomiarowych. Rozkład punktów pomiarowych schematycznie został zaprezentowany na rys. 12.

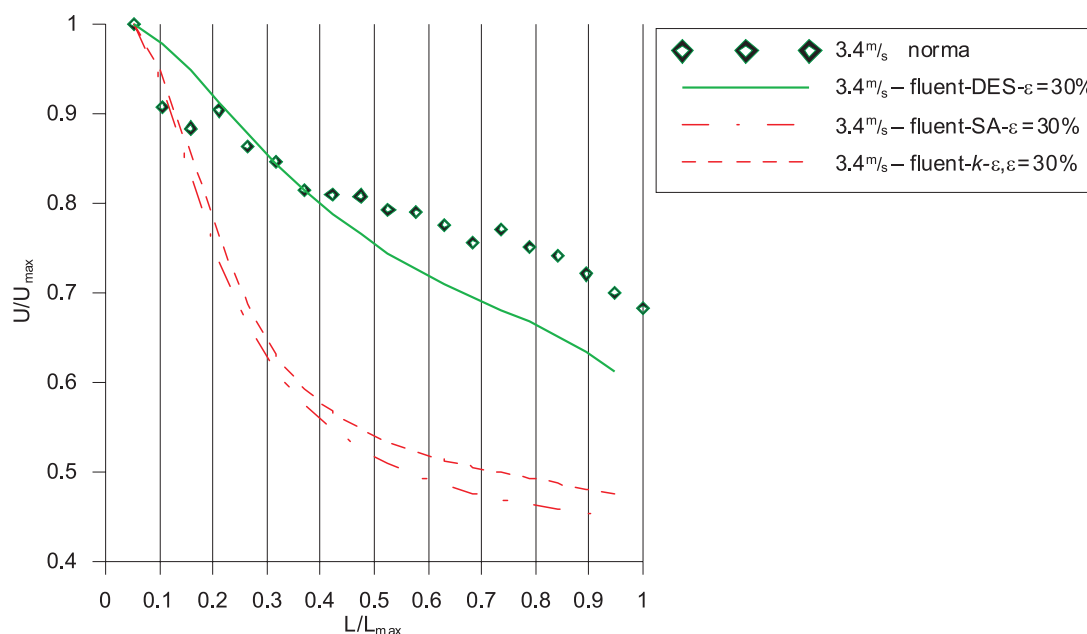


Rys. 12. Punkty pomiarowe w przestrzeni nad złożem porowatym

7. Porównanie profili eksperymentalnych z wynikami numerycznymi

Do obliczenia przepływu w omawianej geometrii został wykorzystany komercyjny pakiet programów CFD Ansys FLuent, v. 6.3.18. Budowa geometrii oraz dyskretyzacja domeny obliczeniowej została wykonana w programie Gambit, wchodzącym w skład pakietu.

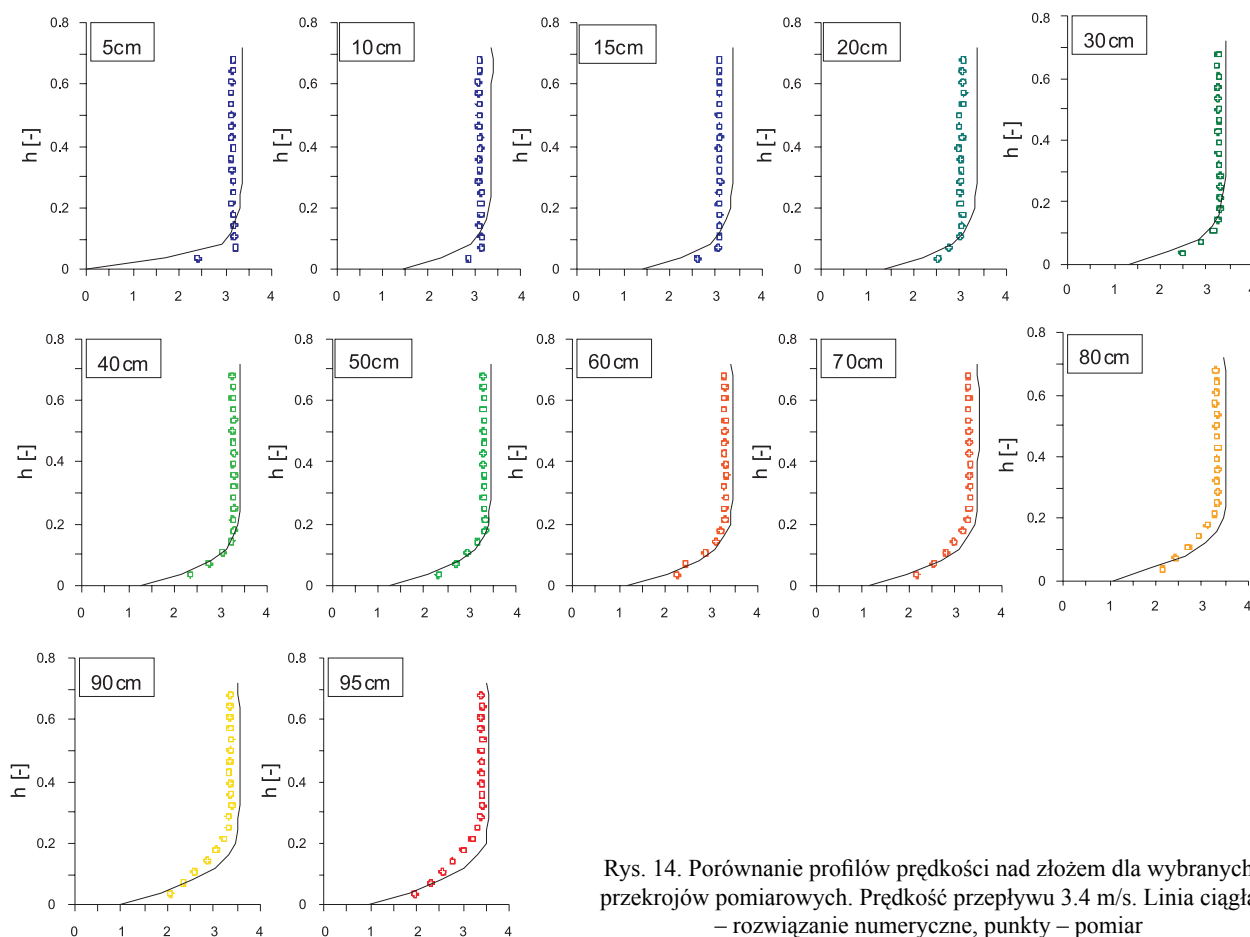
Do obliczeń wykorzystano siatkę typu QUAD z całkowitą liczbą elementów około 1,5 miliona. Ze względu na charakter przepływu strugi powietrza nad złożem porowatym konieczne było modelowanie przepływu turbulentnego. W początkowej fazie skorzystano z dwurównaniowego modelu $k-\varepsilon$. Jednak porównując przebieg spadku prędkości 5 mm nad złożem porowatym wyznaczony dla modelu $k-\varepsilon$ i dla danych eksperymentalnych, okazało się, że różnica w wartościach prędkości sugeruje mniej intensywne napowietrzanie złoża w przypadku obliczeń numerycznych (rys. 13). Podobnie jest dla modelu jednorównaniowego



Rys. 13. Spadek znormalizowanej prędkości wzdłuż złoża porowatego. Odległość od złoża 5 mm

SA. Bardziej zbieżne wartości w przebiegu spadku prędkości wzdłuż złoża obserwuje się dla hybrydowego modelu DES z modelowaniem obszaru przyściennego za pomocą modelu $k-\varepsilon$. Rozbieżności pomiędzy przebiegami eksperymentalnymi i numerycznymi obserwowane w odległości około 40% od wlotu mogą wynikać z niejednorodności powierzchni złoża porowatego.

Wykresy porównawcze dla wybranych przekrojów pomiarowych w komorze dla prędkości przepływającej strugi w przekroju wlotowym $U = 3.4$ m/s zaprezentowano na rys. 14.



Rys. 14. Porównanie profili prędkości nad złożem dla wybranych przekrojów pomiarowych. Prędkość przepływu 3.4 m/s. Linia ciągła – rozwiązanie numeryczne, punkty – pomiar

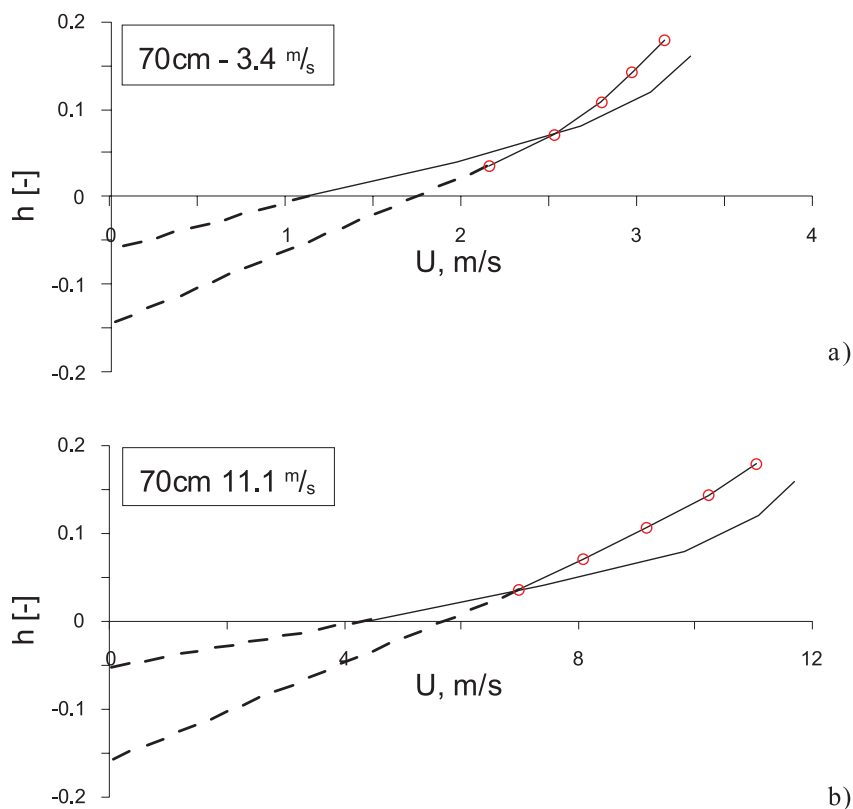
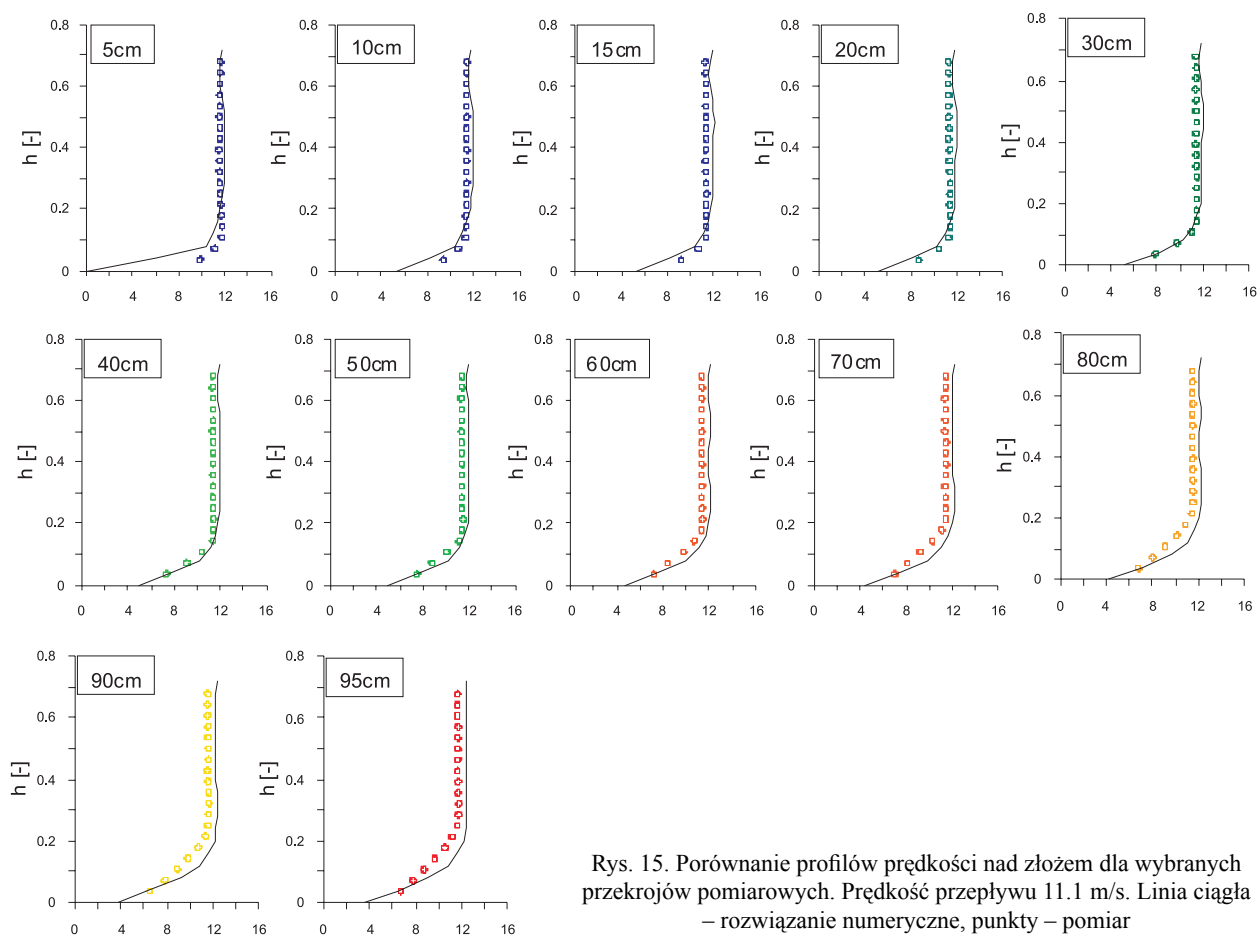
Rys. 15 zawiera wykresy porównawcze dla wybranych przekrojów pomiarowych w komorze dla prędkości przepływającej strugi w przekroju wlotowym $U = 11.1$ m/s.

Analizując rozkłady wektora prędkości nad złożem zamieszczone zarówno na rys. 14 jak i rys. 15 można zauważyć, że dla w pełni rozwiniętego przepływu (około 50 cm od wlotu) występuje stała różnica w rozkładach prędkości wyznaczonej z analizy numerycznej i eksperymentu. Na rys. 16 zamieszczono powiększony fragment profili prędkości dla przekroju oddalonego od przekroju wlotowego o 70 cm.

Zakładając hipotetycznie, że rozkład prędkości wewnątrz złoża porowatego jest liniowy (przerwane linie na rys. 16), można zauważyć, że w obu przypadkach głębokość efektywnego „napowietrzenia” materiału porowatego jest o około 10% większa w przypadku danych pomiarowych niż głębokość napowietrzenia uzyskana z obliczeń numerycznych. Oczywiście założenie liniowego rozkładu niekoniecznie musi być zgodne z prawdą, ale przy dowolnym przebiegu tłumienia prędkości stycznej przez ośrodek porowaty podobna różnica może mieć miejsce.

Na rys. 17 zamieszczono wykresy porównawcze zmiany intensywności turbulencji dla wybranych przekrojów dla prędkości przepływu powietrza $U = 3.4$ m/s.

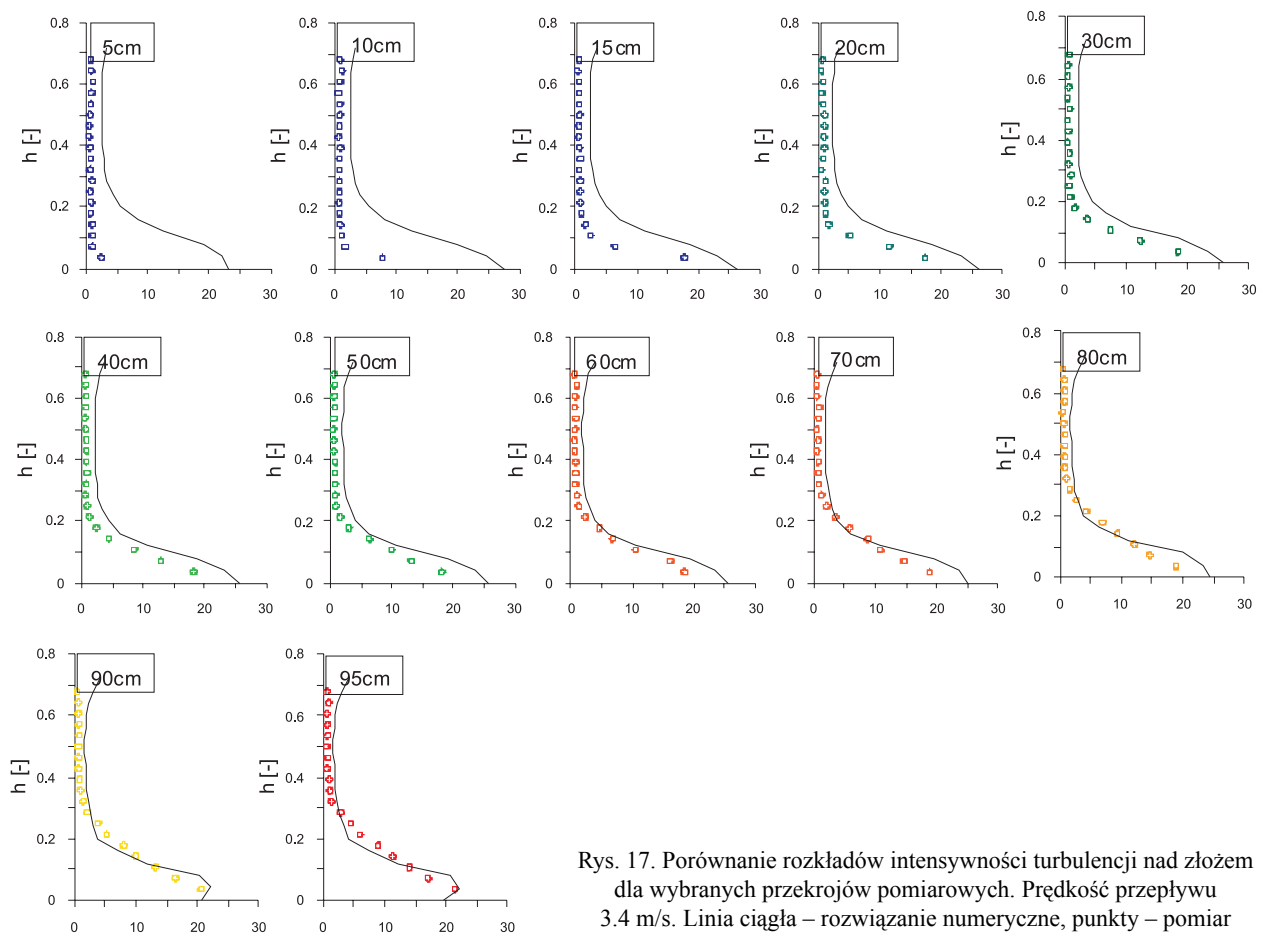
W tym przypadku można zaobserwować podwyższoną wartość intensywności turbulencji dla wyników numerycznych w obszarze zbliżonym do osi tunelu wynoszącą średnio około 5% w stosunku do wartości poniżej 1% dla wyników eksperymentu. Ponadto, w przebiegu zmienności intensywności turbulencji dla



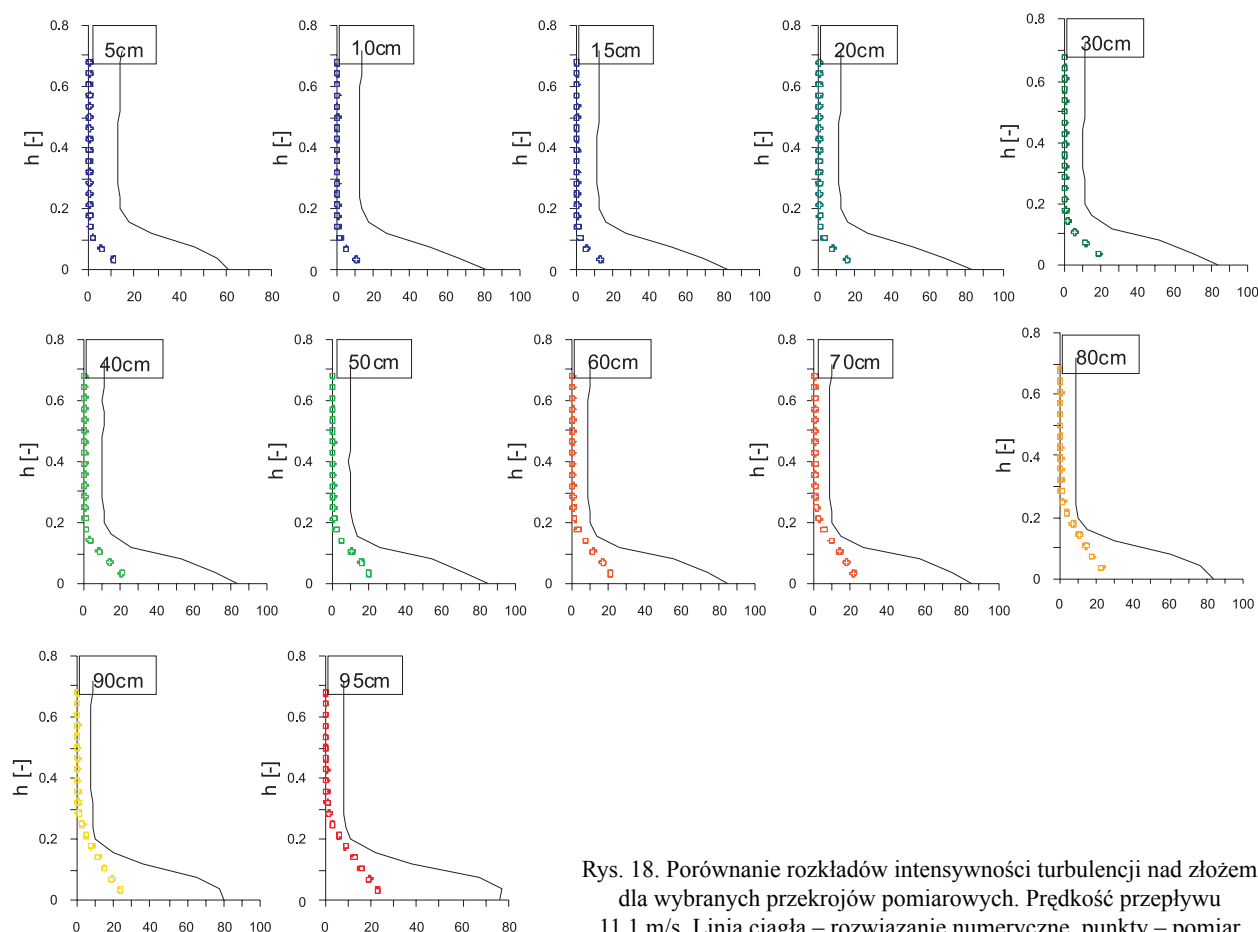
Rys. 16. Powiększony fragment profili dla $U = 3.4$ a) i 11.1 m/s b) dla przekroju 70 cm

danych eksperymentalnych widoczny jest wpływ tłumienia turbulencji w pobliżu złoża porowatego (szczególnie dobrze widoczny dla przekrojów od 40 cm).

Niepokojące zjawisko można zaobserwować porównując przebieg zmian intensywności turbulencji dla średniej prędkości w przekroju wlotowym $U = 11.1$ m/s (rys. 18). W omawianym przypadku wartości intensywności turbulencji są mocno zawyżone w stosunku do wartości pomiarowych. Różnica w rdzeniu potencjalnym wynosi około 20% a w pobliżu złoża porowatego sięga nawet 60%. Opisywana różnica jest trudna do wytłumaczenia. Zastosowany model turbulencji, warunki brzegowe (za wyjątkiem prędkości wlotowej) były takie same jak dla przypadku pierwszego ($U = 3.4$ m/s).



Rys. 17. Porównanie rozkładów intensywności turbulencji nad złożem dla wybranych przekrojów pomiarowych. Prędkość przepływu 3.4 m/s. Linia ciągła – rozwiązanie numeryczne, punkty – pomiar



Rys. 18. Porównanie rozkładów intensywności turbulencji nad złożem dla wybranych przekrojów pomiarowych. Prędkość przepływu 11.1 m/s. Linia ciągła – rozwiązanie numeryczne, punkty – pomiar

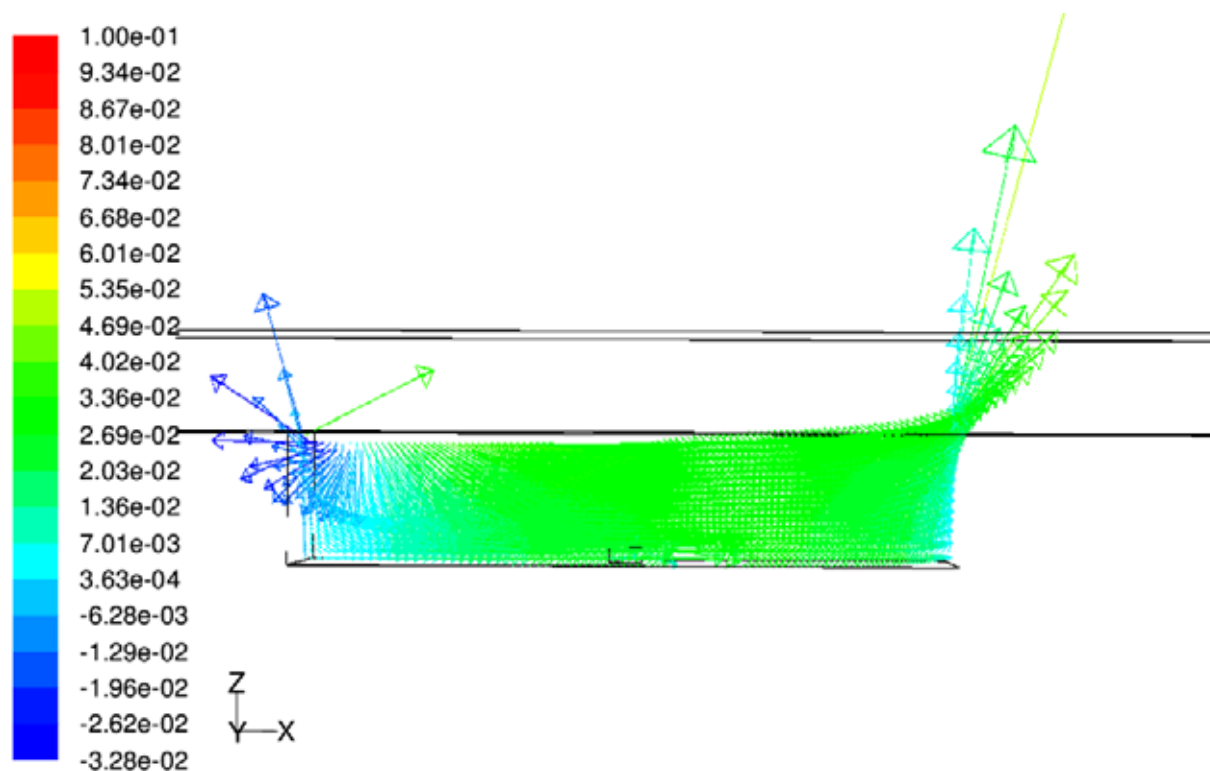
8. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych rozkładów prędkości i intensywności turbulencji nad złożem porowatym, omywanym stycznie strumieniem powietrza. Przedstawiono wyniki badań dla dwóch skrajnych prędkości przepływu powietrza w tunelu pomiarowym; $U = 3.4$ oraz 11.1 m/s. W przypadku prędkości $U = 3.4$ m/s profile prędkości i intensywności turbulencji wykazały dobrą zgodność z wynikami symulacji numerycznej. W przypadku prędkości maksymalnej, $U = 11.1$ m/s zgodność została zachowana tylko w przypadku profilów prędkości. Rozkłady intensywności turbulencji uzyskane z obliczeń numerycznych wskazywały na wyższe wartości, szczególnie w pobliżu złoża porowatego (różnice rzędu 60%).

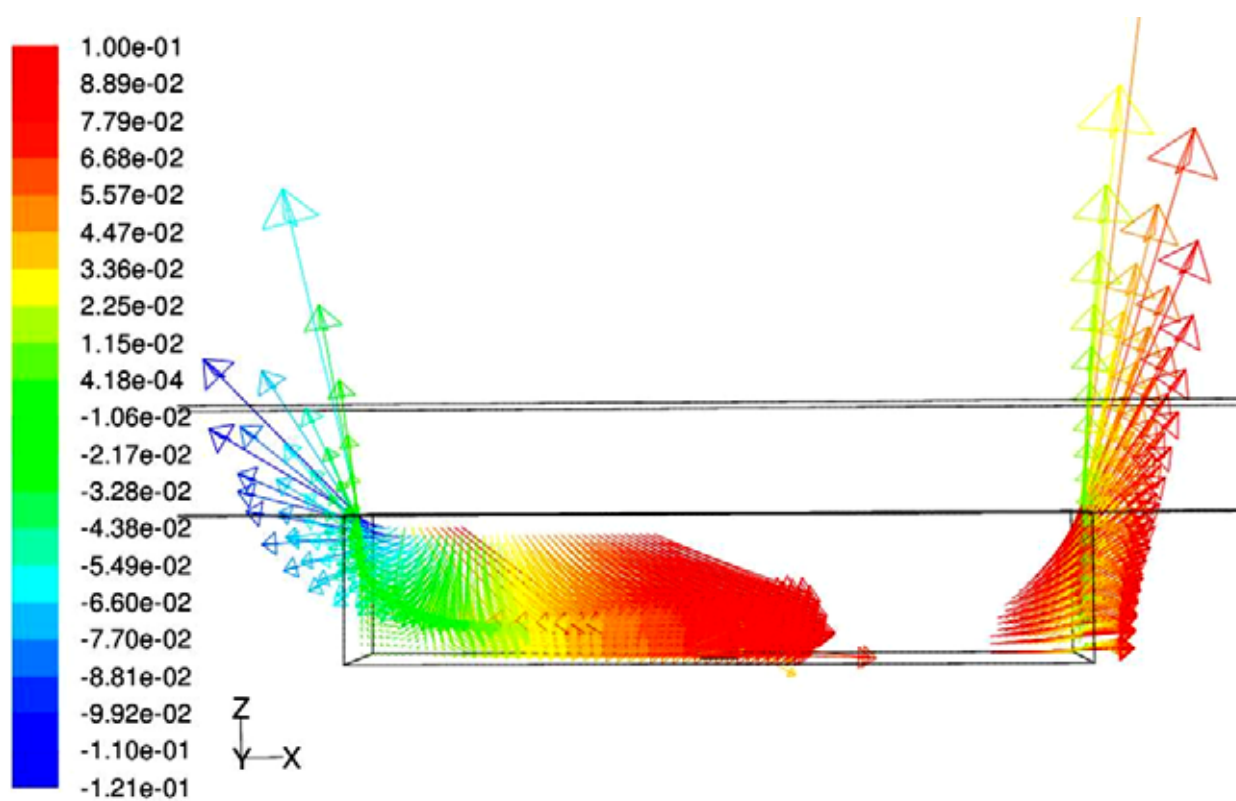
Ponadto, zauważono że rozkłady prędkości w pobliżu złoża wyznaczone z eksperymentu sugerują intensywniejsze i głębszą penetrację warstwy wierzchniej złoża, niż rozkłady uzyskane z obliczeń numerycznych (rys. 16).

Zawyżona wartość intensywności turbulencji może wynikać z różnic w mechanizmie powstawania zaburzeń. Sądząc po rozkładzie pól wektorowych dla wyników obliczeń numerycznych, zamieszczonych na rys. 19 i 20, na wartość intensywności turbulencji może mieć wpływ sposób wymiany masy pomiędzy złożem, a otoczeniem.

Analizując rozkłady wektorów prędkości w złożu porowatym, szczególnie w obszarze wlotowym do komory pomiarowej można zauważyć silną, lokalną penetrację złoża przepływającą strugą powietrza. Jest to podobne do klasycznego zagadnienia przepływu płynu w kanale z uskokiem. Występująca w takim przypadku przepływowym pełna recyrkulacja strugi płynu w omawianym przypadku jest stłumiona obecnością materiału porowatego. Jednak istniejąca w przepływie lokalna zmiana pędu strugi może dodatkowo turbulizować strugę powietrza przepływającą nad złożem. Zjawisko dla $U = 3.4$ m/s ma mniejszą intensywność niż dla $u = 11.1$ m/s – wynika to z wartości prędkości penetrowania złoża. W związku z tym można stwierdzić, że mechanizm powstawania turbulencji obecnej w rozwiązaniu numerycznym jest związany z wymianą masy w kompleksie złoża porowate – struga powietrza, a mechanizm turbulencji obserwowanej w pomiarach jest związany przede wszystkim z nierównością powierzchni styku złoża – struga powietrza.



Rys. 19. Wektory prędkości w płaszczyźnie osi komory pomiarowej dla prędkości $U = 3.4$ m/s. Wartości filtrowane



Rys. 20. Wektory prędkości w płaszczyźnie osi komory pomiarowej dla prędkości $U = 11.1$ m/s. Wartości filtrowane

Model złoża porowatego domyślnie zaimplementowany we Fluencie opiera się na równaniu Forchheimer. Oprócz tak sformułowanego członu źródłowego istnieje również alternatywna metoda opierająca się na rozkładzie prędkości wewnątrz materiału porowatego w postaci funkcji wykładniczej w postaci (Fluent User Guide):

$$S_i = -C_o |v|^{C_1} \quad (9)$$

gdzie stałe C_o i C_1 są stałymi empirycznymi.

Ten sposób przedstawiania transportu masy w złożu porowatym daje pewne szanse na właściwe przedstawienie procesu mając do dyspozycji dane eksperymentalne, na podstawie których można będzie określić wartości stałych obecnych w równaniu (9)

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Beavers G.S., Sparrow E.M. et al., 1974. *Boundary condition at Porous Surface which Bounds a Fluid Flow*, AIChE, vol. 20, No. 3.
- Brinkman H.C., 1947. *A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles*, App. Sci. Res., A1, 27.
- Fluent User Manual, 2002.
- Saffman P.G., 1971. *On the boundary condition at surface of a Porous medium*, Studies Appl. Math., 50.
- Skotniczny P., Cierniak W., Gorgoń J., Nowak R., 2009. *Eksperymentalna weryfikacja zjawiska wymiany masy i energii w medium porowatym*, Transactions IMG.
- Skotniczny P., 2008. *Model przepływu powietrza w ośrodku porowatym z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła*, Transactions IMG.
- 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, p. 449-472.
- Poradnik Matematyczny*
- Elsner J.W., 1988. *Turbulencja przepływów*. PWN.

Effective methods of cooling the caved-in areas- computer simulation. Experimental testing of mass and energy exchange in porous media

Abstract

The mechanism of mass and energy exchange between a porous medium and its ambience has not been fully recognised yet. A number of phenomena accompanying the mass exchange between a porous medium and its ambience still merit a rigorous research, particularly when the porous material has a non-standard configuration with respect to the flux of flowing air.

In classical approach, widely used to describe flows in engineering applications, the porous material is a medium through which a fluid should flow under the predetermined pressure. In such cases the porous medium has purely utilitarian features, being a part of a designed or controlled flow installation (filtration problems, internal combustion).

In the case outlined in the study porosity will negatively impact on efficiency of mass and energy exchange between the porous medium and its ambience. Numerical analyses to date and experimental tests (Skotniczny, 2008; Skotniczny et al., 2009) reveal a major discrepancy between simulated and experimental temperature distributions inside the porous deposit.

The study is concentrated on surface penetration of the deposit by an air stream flowing tangent to it. The purpose of the study is to attempt an indirect description of the phenomenon of non-zero airflow velocity at the porous medium- air flux interface (slippage velocity), which might affect the mechanism of energy exchange between the porous material and the flowing stream of air.

Keywords: porous medium, mass and energy exchange, hot-wire anemometry