Badania modelowe powolnych przepływów w przewodach za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej oraz modelowania matematycznego

MAREK GAWOR, MARIUSZ R. SŁAWOMIRSKI, JACEK SOBCZYK, MARTA TICHORUK

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

Streszczenie

Wykonano pomiary profili prędkości przepływu powietrza w przewodach o ściankach wykonanych z przeźroczystego materiału (model). Ze względu na zastosowaną technikę pomiarową (cyfrowa anemometria obrazowa) przewody miały prostokątne przekroje. Przepływy były wymuszane za pomocą tunelu aerodynamicznego z dodatkowymi elementami kształtującymi płaski profil prędkości na wejściu do modelu. Analizie zostały poddane w szczególności okolice zakrzywień ("kolana") i rozgałęzień przewodów. W przyjętym zakresie prędkości (do 0.2 m/s) nie zaobserwowano jakichkolwiek objawów niestateczności ruchu płynu prowadzących do powstawania turbulencji. Rezultaty doświadczalne porównano z wynikami symulacyjnych obliczeń numerycznych opartych na rozwiązywaniu równania Naviera-Stokesa, otrzymując zadziwiającą zgodność. Wyniki pomiarów i symulacji komputerowych mogą być przydatne podczas analizy rozpływu gazów w kopalnianej sieci wentylacyjnej, a także ewentualnie przepływów w układzie krwionośnym i oddechowym.

Slowa kluczowe: laminarne przepływy gazu, cyfrowa anemometria obrazowa, tunel aerodynamiczny, przepływ powietrza przez kanały krzywoliniowe, symulacje numeryczne przepływu gazu ściśliwego, oderwanie warstwy granicznej

1. Wstęp

Artykuł prezentuje wybrane aspekty procesu opracowywania warsztatu badawczego umożliwiającego pomiary metodą cyfrowej analizy obrazowej przepływu powietrza przez kanały o złożonym kształcie. Docelowo planuje się prowadzenie analiz przepływu przez kanały symulujące wyrobiska górnicze. Pomiary takie będą służyły do walidacji obliczeń numerycznych prowadzonych w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN (Dziurzyński i in., 2010). Analityczny opis zjawisk aerodynamicznych i mechanicznych występujących podczas przepływu gazu przez kanały o skomplikowanych kształtach, a w szczególności w wyrobiskach kopalnianych, jest zagadnieniem złożonym (Jacob i in., 2002) i wymaga stosowania zaawansowanego aparatu matematycznego. Wiąże się to z rozwiązywaniem nieliniowych równań mechaniki płynów przy skomplikowanych warunkach brzegowo-początkowych, zmieniających się warunkach przepływu (np. poprzez ruch kombajnu urabiającego). Dlatego w wielu przypadkach wykorzystuje się rozwiązania przybliżone uzyskiwane metodami numerycznymi. W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych konieczne jest wykonywanie eksperymentów z wykorzystaniem dedykowanych technik pomiarowych (Kowalewski i in. 2002). Eksperymenty dostarczają również danych materiałowych, parametrów do równań konstytutywnych, koniecznych do rozwiązywania konkretnych zagadnień teoretycznych oraz w obliczeniach numerycznych.

Należy nadmienić, że przy przepływach w kanałach z rozgałęzieniami i zmianą przekroju poprzecznego mamy do czynienia ze zjawiskami: przepływu recyrkulacyjnego, oderwania warstwy granicznej oraz występowania struktur wirowych. Zjawiska te prowadzą do złożonego rozkładu ciśnienia, a więc do oddziaływań na urządzenia umieszczone w wyrobiskach kopalnianych.

2. Sposób wykonania zdjęć i ich analizy

W celu analizy przepływu gazu, metodami obrazowej anemometrii optycznej konieczne jest wykonanie co najmniej dwóch zdjęć w znanym odstępie czasu. Wykorzystano do tego celu kamerę cyfrową firmy ARCO oraz laser MAGNUM z generatorem noża świetlnego. Kamera sterowana była przez program MAR-CO (Gawor, 2008a). Analizy zdjęć i obliczania składowych prędkości wykonywano za pomocą programu o nazwie PIV (Gawor, 2005). Oba pakiety zostały opracowane i napisane przez zespół Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN (Gawor, 2008b).

Głównym zadaniem pierwszego pakietu było ustawianie parametrów kamery, wykonanie i akwizycja zdjęć. Adjustacja lasera polegała na ustawieniu jego mocy (typowo: na minimum podczas konfigurowania nowego eksperymentu i na maksimum podczas właściwych pomiarów) oraz na wyborze położenia ogniska noża świetlnego. Sterowanie pracą kamery można podzielić na dwa etapy. Pierwszy manualny, związany jest z wyborem obiektywu, ilości pierścieni dystansowych, przysłony oraz regulacją ostrości obrazu w płaszczyźnie noża świetlnego. Drugi dotyczy sterowania pracą kamery za pomocą interfejsu programu, który pozwala wybrać m.in. – ilość zdjęć, czas ekspozycji, czas odstępu pomiędzy zdjęciami, czas błysku oświetlenia, wzmocnienie sygnału matrycy, opóźnienie pierwszego zdjęcia i wiele innych. Konieczne było indywidualne ustawienie tych parametrów dla każdego eksperymentu. Dodatkowo, po każdorazowej zmianie konfiguracji przestrzennej kamera-laser lub/i regulacji obiektywu konieczne było wykonanie zdjęcia obiektu o znanych wymiarach w celu określenia skali odwzorowania przestrzennego (ilość pikseli na zdjęciu przypadającą na jednostkę długości obiektu).

Drugi pakiet umożliwiał wykonanie analizy ruchu powietrza przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej. Pierwszą operacją było rozdzielenie podwójnego zdjęcia, otrzymanego z kamery, na dwa pojedyncze. W obydwu pakietach operacja ta wykonywana jest automatycznie. Zaimplementowano w nich również funkcje "animacji zdjęć". Polega ona na cyklicznym wyświetlaniu na ekranie monitora pierwszego i drugiego zdjęcia. Funkcja ta jest bardzo przydatna w celu szybkiego określenia poprawności wykonanych zdjęć, bez czasochłonnej analizy szczegółowej. Można w ten sposób ocenić, czy prawidłowo został ustawiony: czas pomiędzy zdjęciami, czas błysku diody, wzmocnienie kamery, itp. Programy zostały napisane tak, aby można było wykonać całą serię zdjęć, a następnie w sposób automatyczny je analizować. Podczas analizy zdjęć wykorzystano techniki przetwarzania obrazu (Tadeusiewicz, Korochoda, 1997).

3. Tunel aerodynamiczny

Stanowisko pomiarowe zostało zaprojektowane i zbudowane tak, aby spełnić w zadowalającym stopniu wymogi wynikające ze sposobu wykonywania zdjęć służących do obliczania wektorów przepływu (PIV) oraz sposobu prowadzenia obliczeń numerycznych. Chodzi tu zarówno o warunki początkowe: ukształtowanie profilu prędkości na wlocie do formy oraz warunki brzegowe np.: kształt i rozmiary formy, zapewnienie swobodnego wypływu powietrza z formy, itp. Stanowisko tunelu aerodynamicznego zostało wykonane w całości w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN. Konieczność jego budowy wyniknęła z wymagań metody pomiarowej, jaką jest cyfrowa anemometria obrazowa. Ze względu na konieczność stosowania posiewu o znacznym stężeniu wykorzystanie do badań jednego z dostępnych w IMG PAN tuneli otwartych byłoby nieekonomiczne (możliwość zniszczenia tunelu) oraz wiązałoby się z wytworzeniem znacznego poziomu zapylenia w pomieszczeniu.

Dokładny opis tunelu aerodynamicznego przedstawiono w osobnym artykule (Gawor i in., 2011a), a jego wygląd przystosowany do pomiarów w zamkniętych kanałach na fotografii 1. W celu podłączenia wlotu formy do przepływu do konfuzora wstawiono lemniskator o średnicy wlotowej 200 mm (fot. 2) i wylotowej 43 mm (fot. 3). Forma mocowana była do wylotu lemniskatora przy pomocy lateksowego walca. Wlot do formy był wsunięty do wylotu lemniskatora na głębokość ok. 3 mm. Widok zamontowanej formy przedstawiono na fotografii 4.

Jako posiew wybrano lekki węglan magnezu (60% Mg(HCO₃)₂ + 40% MgO), o gęstości usypowej ~0.2 kg/dm³. Konstrukcja generatora posiewu została przedstawiona w osobnym artykule (Gawor i in., 2011a). Przestrzeń pomiarowa, w której umieszczano formy miała przybliżone wymiary rzędu x = 200 mm, y = 200 mm, z = 200 mm. Obok tunelu umieszczono stolik, na którym zamontowany był specjalny statyw, do którego przytwierdzono laser i kamerę (fot. 1). Cała konstrukcja pozwalała na dowolne względne ustawienie obu urządzeń tak, aby wybrać odpowiedni fragment modelu w celu jego oświetlenia i sfotografowania.



Fot. 1. Tunel aerodynamiczny przystosowany do wywoływania przepływów w zamkniętych kanałach



Fot. 2. Widok lemniskatora od strony wlotu



Fot. 3. Widok lemniskatora od strony wylotu; miejsce montowania formy



Fot. 4. Widok zamocowanej formy w tunelu

4. Formy z kanałami przepływowymi

Technika PIV (cyfrowa anemometria obrazowa) poza koniecznością stosowania posiewu (znacznika, który umożliwia analizowanie prędkości przepływu płynu) wymaga również optycznej dostępności przestrzeni pomiarowej. Materiały, które są w powszechnym użyciu (a więc są stosunkowo tanie oraz dostępne) i jednocześnie umożliwiają wykonanie elementów o określonym kształcie, przy zachowaniu bardzo dobrej lub doskonałej przeźroczystości to przede wszystkim: szkło, poliwęglany i pleksi. Okazało się jednak, że kształt i wymagana precyzja wykonania oraz konieczność zachowania właściwości optycznych dyskwalifikują pierwsze dwa materiały.

Wiele czasu wymagało znalezienie wykonawcy modeli form wlewowych, który podjąłby się ich wykonania z pleksi, gdyż było to zlecenie nietypowe i jednorazowe. Najpierw wykonano model jednej formy metodą frezowania, klejenia i polerowania. W przypadku prostego kształtu kanału przepływowego (bez rozgałęzień i zaokrągleń) możliwe było wykonanie formy techniką znacznie prostszą. Jednak ze względu na konieczność badania modeli o bardziej skomplikowanych kształtach sprawdzono, czy metoda ta pozwoli na fotografowanie przepływu płynów w takich modelach. Do dalszych badań wykonywano formy metodą klejenia ścian kanałów. Po przeprowadzeniu trzech serii eksperymentów do projektów kolejnych form postanowiono wprowadzić poprawkę w postaci przedłużenia wlotów i wylotów (fot. 5). Chodzi o to, by umożliwić zmianę kształtu przekroju poprzecznego – z okrągłego (układ zasilania) na kwadratowy (przekrój formy o boku 17 mm). Dlatego istotny był sposób doprowadzenia powietrza do kanału przepływowego – połączenie elastyczne przy pomocy lateksowego walca.



Fot. 5. Zdjęcia form z widocznymi kanałami przepływowymi – z lewej forma typu "Z", z prawej typu 'widły'

Ze względu na ograniczenia związane z rozdzielczością kamery (660 × 500 pikseli) konieczne było analizowanie przepływów dla poszczególnych fragmentów pleksiglasowych form z osobna. Zastosowane kadrowanie (miejsca rejestrowania zdjęć) dla wybranego układu pokazano na rysunkach 3-5.

5. Profile prędkości forma typu "Z"

Poniżej przedstawiona zostanie analiza profili prędkości na wlocie do formy w odległościach 51, 66 i 75 mm od wlotu do formy. Miejsca wyznaczonych profili przedstawiono na rysunku 1. Są to miejsca ukształtowanego profilu prędkości oraz wlotu do zakrzywionego kanału ("kolano 1"). Eksperymenty wykonano przy obrotach wentylatora wynoszących 160 obr/min. Maksymalna prędkość w osi tunelu wynosiła 53 cm/s. Prostokąt w kolorze szarym oznacza obszar zamocowania elastycznego przewodu łączącego model z tunelem.

W odległościach równych 51 mm (rys. 2a) i 66 mm (rys. 2b) od wlotu do formy ukształtowany jest paraboliczny profil prędkości. Do danych eksperymentalnych dotyczących modułu prędkości dopasowano metodą najmniejszych kwadratów parabolę (ciągła krzywa oznaczona gwiazdką). Widać dobrą zgodność

dopasowanej paraboli do wyników eksperymentu. Ilościowo można to przedstawić wyliczając współczynnik korelacji W_k oraz błąd dopasowania B_d . Dla odległości 51 mm współczynniki te wynoszą $W_k = 0.88$, a $B_d = 5.35$ cm/s. Natomiast dla odległości 66 mm współczynniki wynoszą $W_k = 0.95$, a $B_d = 3.58$ cm/s. Przedstawione wyniki świadczą o tym, że w odległości 66 mm od wlotu ukształtowany profil prędkości jest zbliżony do paraboli. Z rysunku 2b można wnioskować, że składowa prędkości w kierunku y, tj. v_y w odległości 66 mm jest w przybliżeniu zerowa; średnia wartość wynosi 0.8 cm/s.

W odległości 75 mm (rys. 2c) od wlotu do formy zaznacza się zmiana kierunku wektora prędkości, związana z wpływem powietrza do "kolana 1" formy. Średnia wartość modułu prędkości wynosi 45 cm/s, a średnia wartość składowej v_y wynosi 3.3 cm/s. Świadczy to o zmianie kierunku wektora przepływu związanego z wpływem powietrza do "kolana 1".



Rys. 1. Położenie zdjęcia i miejsca analizowanych profili prędkości

Ze względu na obliczenia numeryczne, które wymagają zerowania prędkości na ścianach kanału dopasowano do danych eksperymentalnych parabolę przechodzącą przez trzy punkty – zerowanie prędkości na ścianach kanału oraz maksymalną wartość prędkości wynikającą z dopasowania paraboli metodą najmniejszych kwadratów. Na rysunku 2 dla odległości od wlotu wynoszącej 51 i 66 mm przedstawiono, za pomocą przerywanych krzywych oznaczonych kwadratem, dopasowane parabole. Należy zauważyć, że parabole, dopasowane metodą najmniejszych kwadratów i metodą trzech punktów, są bardzo podobne.

6. Prędkości przepływu dla różnych prędkości – forma typu "Z"

Pomiary przepływu powietrza przez formę typu "Z" wykonano dla prędkościach wlotowych $v_1 = 53$ cm/s, $v_2 = 100$ cm/s, $v_3 = 200$ cm/s. Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawione są fotografie formy z wy-znaczonymi wektorami prędkości (strzałki na rysunkach obrazują wektory prędkości).

W pierwszej fazie przepływu powietrza (przed "pierwszym kolanem") rozkład wektorów prędkości jest jednorodny w całym przekroju formy. Wektory ułożone są równolegle względem siebie i zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza – wzdłuż osi x. W drugiej fazie ("pierwsze kolano") rozkład wektorów prędkości ulega zmianie. Przepływ przez "kolano" powoduje powstanie strefy wolniejszego przepływu w części większego zakrzywienia formy i szybszego w części mniejszego zakrzywienia. Dla prędkości napływu 200 cm/s prędkość przepływu w "pierwszym kolanie" wzrasta do 263 cm/s.

Prędkości powietrza zdecydowanie większe niż prędkość na wlocie do formy są zbyt duże, aby na podstawie ruchu znaczników wyznaczyć pole prędkości. Wykonując zdjęcia z dłuższym czasem naświetlania otrzymujemy zdjęcia "śladowe", na których powstają smugi cząstek (rys. 6), a nie punkty, które są niezbędne do prawidłowego wyznaczenia wektorów prędkości metodami korelacyjnymi. Dlatego na fotografiach występują puste obszary przy przepływie przez "pierwsze kolano". Maksymalna prędkość w dolnym kolanie wynosi 303 cm/s.



Rys. 2. Profile prędkości na części wlotowej do formy



Rys. 3. Przepływ powierza przez formę typu "Z" przy maksymalnej prędkości na wlocie wynoszącej 53 cm/s









Rys. 6. Zdjęcia śladowe "górnego i dolnego kolana" przy przepływie powietrza przez formę typu "Z" – prędkość na wlocie 200 cm/s

W trzeciej fazie przepływu, wylot z formy, obserwujemy stabilizację strumienia przepływu. W miarę oddalania się od "drugiego kolan" zanika strefa szybszego i wolniejszego przepływu. Im dalej od zagięcia formy, tym wektory prędkości układają się w sposób bardziej uporządkowany. Profil rozkładu prędkości, w osi kanału, ma nadal kształt paraboli. Pojawia się lekka asymetria, będąca wynikiem przepływu medium przez załamanie formy.

Z powyższej analizy wynika konieczność dobrania odpowiedniej prędkości wlotowej, aby móc rejestrować cząstki w całym obszarze przepływu. Ponadto warto podkreślić, że profile prędkości przepływu, wyznaczone eksperymentalnie metodą PIV oraz symulacje komputerowe przeprowadzone w programie Fluent 6.2, wykazują dużą zgodność i są komplementarne.

7. Numeryczna symulacja przepływu w układzie typu "Z"

Obliczenia numeryczne stanowiące podstawę symulacji komputerowej zrealizowane zostały dla przepływów odbywających się w warunkach analogicznych do tych, dla których przeprowadzono pomiary doświadczalne. Zastosowano symulator komputerowy FLUENT v. 6.2. Przeprowadza on obliczenia symulacyjne w oparciu o rozwiązanie systemu złożonego z równania Naviera-Stokesa:

$$\rho(x_{l},t)\left[\frac{\partial u_{i}(x_{l},t)}{\partial t}+u_{j}(x_{k},t)\frac{\partial u_{i}(x_{l},t)}{\partial x_{j}}\right]=\frac{\partial P(x_{l},t)}{\partial x_{i}}+\frac{\partial Q(x_{l},t)}{\partial x_{j}}+\frac{\partial Q(x_{l},t)}{\partial x_{i}}-\frac{2}{3}\frac{\partial Q(x_{l},t)}{\partial x_{k}}\right]$$

oraz równania ciągłości przepływu:

$$\frac{\partial \rho(x_l,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho(x_l,t) \, u_j(x_l,t) \right\} = 0$$

gdzie: u_i jest wektorem prędkości płynu, x_i – wektorem położenia, P – ciśnieniem, ρ – gęstością płynu, μ – lepkością płynu, t – czasem.

Ze względu na stacjonarny charakter ruchu płynu równania powyższe upraszczają się do postaci:

$$\rho(x_{l},t) u_{j}(x_{l},t) \frac{\partial u_{i}(x_{l},t)}{\partial x_{j}} = \frac{\partial P(x_{l},t)}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left\{ \mu \left[\frac{\partial u_{i}(x_{l},t)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}(x_{l},t)}{\partial x_{i}} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_{k}(x_{l},t)}{\partial x_{k}} \right] \right\}$$
$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left\{ \rho(x_{l},t) u_{j}(x_{l},t) \right\} = 0$$

Na rysunku 7 pokazano formę typu "Z" oraz miejsca w których prowadzono obliczenia. Profil prędkości odpowiadający przekrojowi po wlotowej stronie układu pokazano na rysunku 8. Profil ten uzyskany został na podstawie danych pomiarowych (rys. 2a) i po niewielkiej korekcie, wykorzystany został jako warunek brzegowy do obliczeń "na wlocie" do formy.



Rys. 7. Widok formy typu "Z" z zaznaczonymi miejscami analizy profili







Wyniki symulacji odpowiadające podłużnemu przekrojowi formy "Z" pokazano na rysunku 10. W wersji kolorowej tego rysunku widoczne jest, że przepływ w części wlotowej formy "Z" jest niemal symetryczny. Asymetria pojawia się w pierwszym kolanie, gdy na skutek bezwładności zasadniczy strumień płynu zbliża się do ścianki kolana o mniejszej krzywiźnie. Następnie, w drugim kolanie, znowu na skutek bezwładności, strumień ten "prześlizguje się" w pobliżu ścianki o większej krzywiźnie, wpływając do końcowego, prostoliniowego i "wylotowego" odcinka formy "Z".

Symulacja komputerowa wykazała, że mimo geometrycznej symetrii profilu "Z" przepływ w jego części "wylotowej" jest asymetryczny w przeciwieństwie do części wlotowej. Widać to wyraźnie na pokazanym



Rys. 10. Rozkład prędkości dla przepływu w układzie typu "Z"

na rysunku 9 profilu prędkości odpowiadającemu przekrojowi w wylotowej części formy "Z". Asymetrię przepływu w kanale wylotowym pokazują wyraźnie izolinie prędkości przedstawione na rysunku 12.

Rysunek 11 pokazuje w szczegółach obrazy przepływu w pierwszym i w drugim kolanie. Widać tutaj wyraźnie asymetrię ruchu płynu spowodowaną jego bezwładnością.

Natomiast na rysunku 13 pokazano izolinie wirowości prędkości płynu. Jasne punkty wskazują na miejsca o największej magnitudzie wirowości. W miejscach tych można byłoby się ewentualnie spodziewać oderwania warstwy granicznej i powstawania przepływu recyrkulacyjnego. Jednakże zbyt małe spowolnienie przepływu oraz gładkie ukształtowanie kolan uniemożliwiają powstawanie zjawiska oderwania. Wystąpiłoby ono z pewnością, gdyby średnia prędkość przepływu była kilkakrotnie większa, a spowolnienie przepływu w obszarze kolan wyraźne.



Rys. 11. Rozkład prędkości w formie typu "Z" - powiększone obszary 'kolan'



Rys. 12. Izolinie prędkości dla przepływu w układzie typu "Z"



Rys. 13. Izolinie magnitudy wirowości wektora prędkości dla przepływu w układzie typu "Z"

8. Numeryczna symulacja przepływu w formie typu 'widły'

Dla przepływów w układzie typu "widły", obliczenia numeryczne stanowiące podstawę symulacji komputerowej zrealizowane zostały w oparciu o symulator komputerowy FLUENT v. 6.2, podobnie jak w przypadku przepływu w układzie "Z" omówionym w rozdziale poprzednim.

Układ typu "widły" pokazano na rysunku 14, przy czym pojedynczy fragment "wideł" umieszczony z lewej strony rysunku stanowi kanał wlotowy. Profil prędkości odpowiadający przekrojowi w wlotowej stronie układu pokazano na rysunku 15. Widać wyraźnie, że profil ten ma charakter symetryczny i odpowiada on symetrii przepływu w kanale wlotowym.

Rezultaty symulacji komputerowej odpowiadające podłużnemu przekrojowi układu "widlastego" pokazanego na rysunku 14 przedstawione są na rysunkach 17, 18 i 19. Rysunek 17 pokazuje izolinie prędkości. Rysunek 18 przedstawia powiększony obraz przepływu w strefie rozgałęzienia.

Widoczne jest wyraźnie, że przepływ w kanale wlotowym układu "widlastego" jest symetryczny. Wyraźne zaburzenie przepływu pojawia się w punkcie rozgałęzienia "wideł". Następuje tutaj oderwanie warstwy granicznej oraz wytwarzają się w sposób symetryczny dla obydwu gałęzi wideł strefy przepływu recyrkulacyjnego. Widoczne jest ono dobrze na rysunku 18 przedstawiającym w powiększeniu obraz przepływu w punkcie bifurkacji.

Powstawanie oderwania związane jest tutaj z lokalnie silnie spowolnionym charakterem ruchu płynu (ang. *decelerating flow*). Bliższe wyjaśnienie związku zjawiska oderwania warstwy granicznej z deceleracją przepływu przedstawione jest szczegółowo w obszernej, anglojęzycznej książce jednego z autorów niniejszego opracowania (Slawomirski, 2013a), a także w artykule znajdującym się aktualnie w druku (Slawomirski, 2013b).



Rys. 14. Widok formy typu "widły" z zaznaczonymi miejscami analizy profili



Rys. 15. Profile prędkości na wlocie do formy; (na osi pionowej odłożono moduł prędkości w m/s)

Rys. 16. Profile prędkości na wylocie z formy; (na osi pionowej odłożono moduł prędkości w m/s)



Rys. 17. Izolinie prędkości dla przepływu w układzie typu "widły"



Rys. 18. Rozkład prędkości i izolinie dla przepływu w układzie typu "widły" – powiększenie obszaru rozgałęzienia (z lewej strony wektory prędkości, z prawej izolinie prędkości)



Rys. 19. Izolinie magnitudy wirowości wektora prędkości dla przepływu w układzie typu "widły"

Natomiast rozkład prędkości w punkcie stagnacji naprzeciw kanału wlotowego pozostaje regularny. Jest to zgodne z omówionym we wspomnianej wyżej książce klasycznym rozwiązaniem równań Prandtla podanym przez Hiemenza (1911) dla napływu na punkt stagnacji.

9. Podsumowanie

Porównując rysunki 3, 4, 5 oraz 10 i 12, a z drugiej strony 6 oraz 11 nietrudno zauważyć, że obliczenia numeryczne wykazują bardzo dobrą zgodność z pomiarami doświadczalnymi. Wskazuje to na poprawność zastosowanego modelu numerycznego oraz otrzymanych w jego wyniku obliczeń.

Ze względu na dość niską wartość liczby Reynoldsa nie spodziewano się wystąpienia turbulencji przepływu. Zarówno przedstawione wyniki symulacji komputerowych jak i przeprowadzonych pomiarów doświadczalnych potwierdziły stateczność ruchu laminarnego w zakresie stosowanych prędkości. Żadne symptomy losowych poprzecznych ruchów płynu prowadzących do powstawania turbulencji nie zostały zaobserwowane.

Symulacje numeryczne wskazują, że dalszy przepływ w kanałach wylotowych "wideł" jest regularny. Występuje jednak pewna asymetria w stosunku do osi każdego z kanałów, widoczna zarówno na rysunku 17 jak i na asymetrycznym profilu prędkości w płaszczyźnie symetrii pokazanym na rysunku 16.

Obraz izolinii magnitud wirowości przepływu, pokazany na rysunku 19 otrzymany został w wyniku symulacji komputerowej. Widać wyraźnie, że oderwanie warstwy granicznej nie jest związane z maksymalną wartością magnitudy wirowości, lecz raczej z jej drastycznym skokiem, który ma miejsce w punkcie bifurkacji "wideł".

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN; Zadanie T1/ Z1.6/2012 Badania modelowe powolnych przepływów w przewodach za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej oraz modelowania matematycznego w 2012 roku.

Literatura

- Dziurzyński W., Krawczyk J., Pałka T., (2010): Weryfikacja procedur programu VentZroby w oparciu o numeryczną mechanikę płynów, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, **12**, 101-114.
- Gawor M., (2005): Zastosowanie kamery CCD do filmowania szybkich procesów z równoczesną rejestracją parametrów termodynamicznych zjawiska, w: V Warsztaty "Modelowanie przepływów wielofazowych w układach termochemicznych. Zaawansowane techniki pomiarowe, Stawiska k. Kościerzyny 02-04-2005, p.1-12.
- Gawor M., (2008): *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, **10**, 169-186.
- Gawor M., Gorgoń J., Sobczyk J., (2011): *Tunel aerodynamiczny przystosowany do badań metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, **13**, 257-266.
- Hiemenz K., (1911): *Die Grenzschicht an einen im den gleichförmigen Flüssigkeitström eigeyauchen geraden Kreiszylinder*, Dissertationen, Göttingen, reprinted in Dingl. Polytech. Jahrbuch, **326**, pp. 321 410.
- Hiller W. J., Kowalewski T.A., Tatarczyk T., (1996): *High speed imaging with a frame-transfer CCD*, International Congress on High-Speed-Photography, Victoria, Canada, 21-25 September 1992.
- Kowalewski T.A., Michałek T., Błoński S., (2002): *Model przepływu sektora komory spalania turbiny gazowej*, IPPT PAN, Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów, Warszawa. Badania realizowane w ramach projektu FLOXCOM 5PRE UE.
- Slawomirski M.R., (2013a): *The Separation of Laminar Boundary Layer*, manuscript of a textbook to be printed by Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Slawomirski M.R., (2013b): *Reversed flow formulation in separated boundary layer*, Archives of Mining Sciences, 58 (in print).

Tadeusiewicz R., Korohoda P., (1997): Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów, Kraków.

Investigations of fluid flows through tubes of various forms by means of the numerical image anemometry and numerical flow simulations

Abstract

The authors performed empirical research concerning air velocity profile for flows through tube systems made of transparent materias. Owing to the appointed measurement technique (numerical image anemometry) tube systems of rectangular cross-sections have been applied. Air flows were initiated by the aerodynemic tunnel. In order to obtain homegeneous stream extra forms were mounted at the entrance to tube systems. The elements of the tube systems of high curvature (e.g. 'knees') as well as braches of tube systems were the subject of detailed investigations. For the appointed flow velocities any symptms of flow instability and the development of turbulence have not been observed. The results of empirical measurements represented high compatibility with results obtained by means of the computer simulations based on solutions of the Navier-Stokes equation for comprebble flows. The results of empirical reseach and computer simulations may be applied for the analysis of air flows though mining ventillation systems and for analysis of fluid motions in human and animal respiratory and circulatory systems.

Keywords: laminar gas flows, numerical imane anemometry, aerodynamic tunel, air flows through curvilinear channels, compressible gas flow simulations, flow separation