

Pomiary opływu wybranych modeli metodą cyfrowej anemometrii obrazowej

MAREK GAWOR, KATARZYNA MNICH-MEDOŃ, JACEK SOB CZYK

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

Streszczenie

W publikacji zaprezentowano wyniki pilotażowych badań opływów wybranych modeli (trzy samochody, lokomotywa, pręt, pasek blachy). Przeprowadzono je z użyciem nowo zbudowanego powietrznego tunelu aerodynamicznego. Uzyskane wyniki wskazują na wysoką użyteczność zastosowanej metody pomiarowej – cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV) – w tego typu badaniach. Wyznaczone i zaprezentowane pola prędkości przepływającego wokół modeli powietrza ujawniają wiele niuansów tego przepływu, zarówno w dziedzinie położenia, jak i czasu.

Należy podkreślić, że jakość tych wyników jest w pełni satysfakcjonująca. Jest to tym bardziej istotne, że po raz pierwszy w historii IMG PAN metodę PIV zastosowano w pomiarach przepływów gazów. Co więcej, dokonano tego z wykorzystaniem autorskiego stanowiska pomiarowego i oprogramowania.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, opływ modeli, tunel aerodynamiczny

1. Wstęp

System cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV), wykorzystywany głównie w laboratoriach, można stosować tylko w przypadku przezroczystych ścianek tunelu umożliwiających wykonanie zdjęć oraz oświetlenie badanego modelu. Oświetlenie badanego modelu dokonywane było wąską płaszczyzną świetlną (tzw. nożem świetlnym). W ten sposób otrzymano obrazy cząstek wskaźnikowych (znaczników) poruszających się w przepływie. Cyfrowa rejestracja pary kolejnych obrazów i ich korelacja prowadzi do wyznaczenia średnich przemieszczeń w wybranym obszarze przepływu. Wykorzystując korelację kolejnych obrazów przemieszczających się w przepływie cząstek rozpraszających światło uzyskano niezbędną informację o prędkości przepływu. Dzięki temu na podstawie dwóch zdjęć wykonanych w znanym odstępie czasu można wyznaczyć wielkość, kierunek i zwrot prędkości przepływu dla całego badanego przekroju. Umożliwia to otrzymanie całkowitego płaskiego pola prędkości (Gawor, 2008).

2. Wprowadzenie

Eksperymenty polegały na zbadaniu profili prędkości powietrza wokół obiektów (modeli) umieszczonych w przestrzeni pomiarowej tunelu. Pomiary takie umożliwiają określenie niektórych charakterystyk aerodynamicznych rzeczywistych obiektów (poprzez uwzględnienie skali – liczby kryterialne, metody podobieństwa). Metodą tą można określić np. współczynnik oporu aerodynamicznego badanych modeli. W doświadczeniach obiektami były modele samochodów, które umieszczono w przepływie i badano, jak zaburzają one pole prędkości przepływu. Zdjęcia wykorzystanych modeli samochodów przedstawiono na fotografii 1.



Fot. 1. Zdjęcia badanych modeli samochodzików (od lewej :”samochodzik”, „kabriolet”, „formuła F2”)

3. Opływ modeli

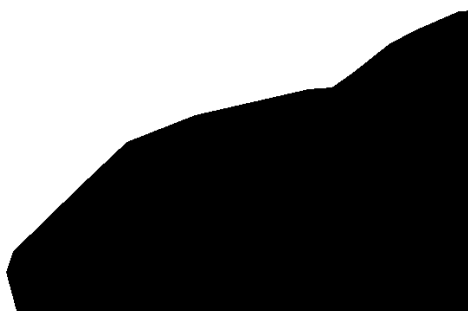
3.1. Kabriolet

Pierwszym badanym modelem był kabriolet (Fot. 2 – długość modelu ok. 7 cm). Do analizy zdjęć wybrano maskę o rozmiarze 64×64 piksele. Krok przesuwu wynosił 16×16 pikseli. Analiza pola prędkości odbywała się w płaszczyźnie XY. Napływ powietrza na model następował wzdłuż osi tunelu. Prędkość napływu powietrza na model wynosiła 100 cm/s. Jeśli chodzi o wielkość rysowanego wektora prędkości to został on dobrany tak, aby najlepiej odzwierciedlał pole prędkości (dla pokazania struktur przy mniejszych prędkościach skala rysowanych wektorów była powiększana). Dla uzyskania lepszej prezentacji wyników model umownie podzielono na kilka części (wykonywano zdjęcia różnych fragmentów modelu). W ten sposób uzyskano dokładniejsze obrazy badanych obszarów, a tym samym również dokładniejsze dane prędkości przepływu (Tadeusiewicz i Korohoda 1997). Analizie podlegała: przednia maska kabrioletu, szyba, „dach – wnętrze”, spojler oraz bagażnik.



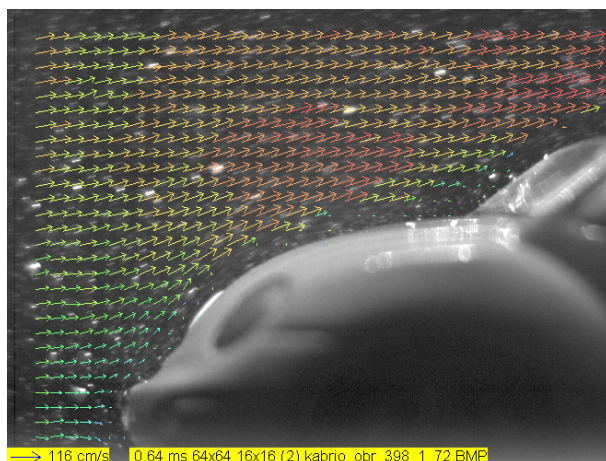
Fot. 2. Wygląd kabrioletu

Stosowana metoda pomiarowa (jako metoda statystyczna) może powodować wyznaczanie wektorów prędkości w miejscach, gdzie prędkość przepływu jest zerowa np. w obszarze obrysu modelu (obszaru tego nie może oświetlać światło lasera, więc wyznaczone tam wektory prędkości są nieprawidłowe). Aby wyeliminować tak wyznaczone wektory prędkości, utworzono dla kolejnych fotografowanych części modelu „obszar” odwzorowujący jego zarys (Rys. 1). Takie obszary zostały wyrysowane ręcznie w programie „PIV” (program został napisany przez autorów artykułu) za pomocą funkcji „rysuj wielokąt”.

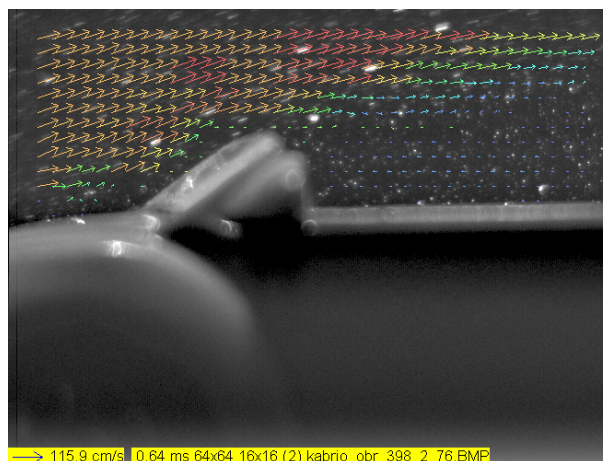


Rys. 1. Zarys modelu przedstawiający przednią maskę „kabrioletu”

Zdjęcia 1 i 2 pokazują napływ powietrza kolejno na przednią maskę oraz szybę samochodziku. Na dole każdego prezentowanego zdjęcia podano: czas pomiędzy zdjęciami (0.64 ms), wielkość maski (64×64), skok maski (16×16), wielkość skalującą wektory (2) i nazwę pliku ze zdjęciami („kabrio_obr_398_1_72.BMP”).



Zdj. 1. Napływ powietrza na maskę kabrioletu



Zdj. 2. Napływ powietrza na przednią szybę kabrioletu

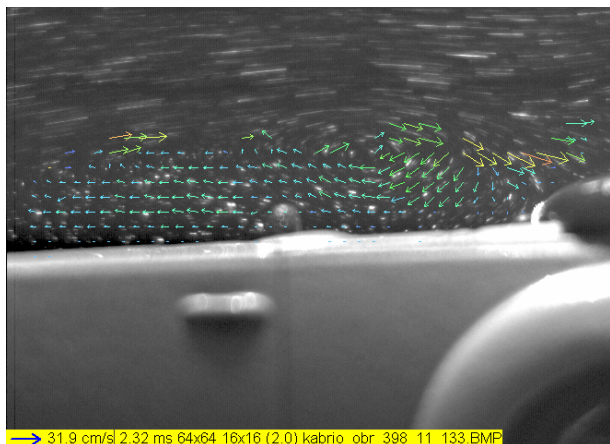
Na prezentowanych zdjęciach wektory prędkości układają się wzdłuż maski i szyby „samochodziku” wiernie odwzorowując jego kontur. Długości wektorów odzwierciedlają rozkłady prędkości w stosunku do pierwotnego jednorodnego napływu powietrza. W bezpośredniej bliskości modelu obserwujemy zaburzony ruch powietrza, natomiast im dalej od modelu tym sąsiednie wektory prędkości stają się względem siebie coraz bardziej równoległe, a więc przepływ jest bardziej jednorodny.

Analizując kolejne dwa zdjęcia (Zdj. 3 i 4), można zaobserwować jak wygląda przepływ powietrza nad częścią „wewnętrzną” kabrioletu i za jego bagażnikiem. Dla części „wewnętrznej” kabrioletu został wyznaczony obrys modelu (Rys. 2), który powoduje usuwanie wektorów prędkości zarówno z „autka” jak również te, które znajdują się powyżej interesującego nas przepływu. Zdjęcie wykonano z dużym odstępem czasu 2.32 ms. Taki odstęp czasu pomiędzy zdjęciami miał umożliwić analizę prędkości powietrza we wnętrzu kabrioletu oraz za spojlerem. Tak dobrany odstęp czasu pomiędzy zdjęciami spowodował, że w obszarze gdzie prędkość przepływu jest duża otrzymano „śladowy” obraz przepływu. W obszarze tym (górny fragment zdjęć) wyznaczenie wektorów na podstawie funkcji korelacji (PIV) jest błędne.

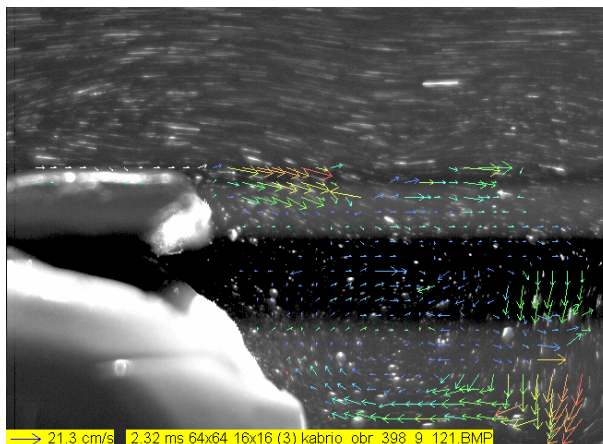
Na zdjęciu 3 napływ powietrza na model odbywa się ze strony lewej na prawą. We wnętrzu kabrioletu występuje odwrócenie przepływu (w przestrzeni pomiędzy szybą, a spojlerem obserwujemy przepływ w przeciwną stronę niż napływ powietrza). Dodatkowo zauważyć można wir, który powstał pomiędzy spojlerem a „siedzeniami dla kierowcy i pasażera”, znajdującymi się w środkowej części zdjęcia. Wir jest



Rys. 2. Zarys modelu i nieanalizowanego obszaru w górnej części zdjęć



Zdj. 3. Ruch powietrza we wnętrzu kabrioletu



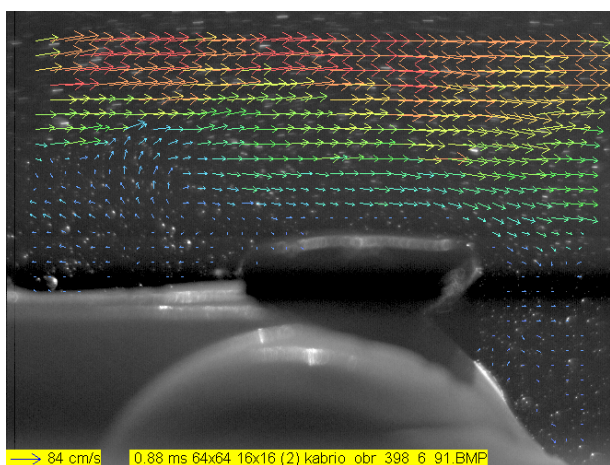
Zdj. 4. Ruch powietrza za spojlerem kabrioletu

efektem zaburzenia przepływu powietrza poprzez spojler, co daje w rezultacie odwrócenie kierunku przepływu w całej przestrzeni „wewnętrznej”.

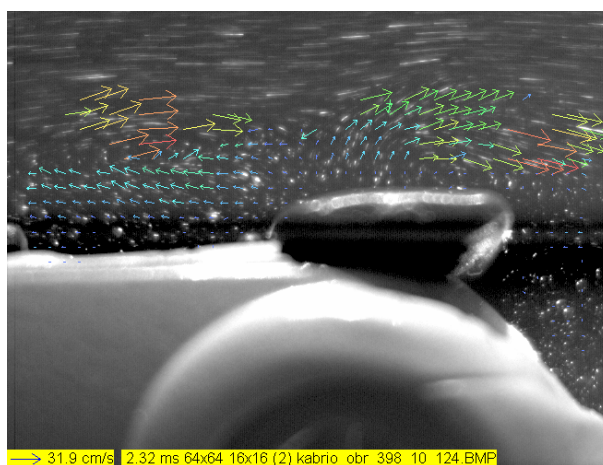
Analizując zdjęcie 4 widać, że w dalszej części za bagażnikiem modelu, przepływ również ma strukturę wirową. Wir ten jest wynikiem opływu powietrza nad spojlerem, którego przepływ „ugina się” zaraz za bagażnikiem modelu nie znajdując dalszych przeszkód. W celu lepszego uwidocznienia wiru, do prezentacji użyto wektorów o wartości skali równej 3.

Przyglądając się dokładniej spojlerowi (Zdj. 5), jako ostatniej części „kabrioletu”, można zauważyć, że to on jest przyczyną zaburzeń przepływu. Na zdjęciu 5 widać, że znacznie powyżej modelu kabrioletu przepływ jest jednorodny, a składowe wektora prędkości przebiegają równoległe do osi tunelu. Na tym zdjęciu widzimy, że w przestrzeni od siedzeń pasażerskich do bagażnika za struktury wirowe odpowiedzialny jest spojler, bo na nim powietrze zmienia kierunek ruchu powodując fluktuacje i powstawanie struktur wirowych. Te zawirowania na kolejnych zdjęciach mogą się od siebie różnić wielkością lub kształtem, jak również lekkim przesunięciem w analizowanym obszarze. Ma to związek z czasem naświetlania podczas wykonywania poszczególnych zdjęć.

Wniosek jest jednak taki, że to spojler odpowiada za zaburzenia w przepływie i powstawanie struktur wirowych co widać na zdjęciach 5 i 6. Na zdjęciach tych da się również zauważyć kolejny efekt związany z czasem naświetlania danego zdjęcia. Zdjęcie 5 było naświetlane w odstępnie czasu $\Delta t = 0.88$ ms. Umożliwiło to wyznaczenie pola prędkości przepływu nad kabrioletem. Na zdjęciu 6 czas pomiędzy zdjęciami został wydłużony do wartości $\Delta t = 2,32$ ms. Z tego powodu znaczniki na tym zdjęciu przyjmują postać jasnych smug stanowiących obraz pola przepływu (przy tak długim czasie naświetlania w obszarze tym, za pomocą metody korelacyjnej, nie można wyznaczyć wektorów prędkości).



Zdj. 5. Przepływ powietrza nad tylną częścią bagażnika kabrioletu (I)



Zdj. 6. Przepływ powietrza nad tylną częścią bagażnika kabrioletu (II)

3.2. Formuła F2

Kolejnym modelem był samochodzik o nazwie formuła F2 (Fot. 3 – długość modelu ok. 6.5 cm). W celu lepszego zbadania opływu powietrza wokół modelu wykonano zdjęcia w sześciu ujęciach: maska, szyba, szyba i dach, dach, za dachem i za spojlerem (Zdj. 7-12). Również dla tego modelu do analizy wybrano maskę o rozmiarze 64×64, a krok przesuwu wynosił 16×16 pikseli. Wartość skali wektora prędkości na przedstawionych zdjęciach wynosiła 2 (z wyjątkiem zdjęcia za spojlerem, gdzie wartość skali wynosiła 3 – Zdj. 12).

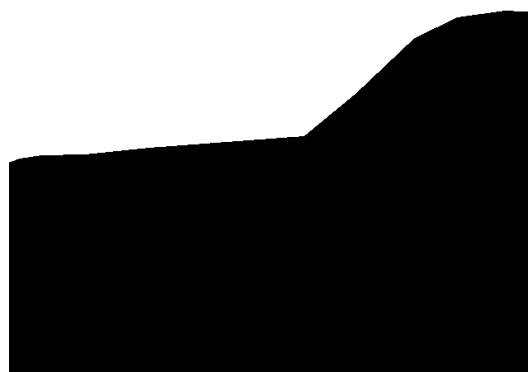


Fot. 3 Analizowany model formuły F2

Na rysunkach 3 i 4 zamieszczono kolejno zarysy (obszary bez przepływu) dla przednich części modelu. Pola prędkości przedstawiono na zdjęciach 7 i 8. Analiza przepływu powietrza w przedniej części modelu pokazuje napływ kolejno na przednią maskę (Zdj. 7) oraz szybę samochodziku (Zdj. 8). Tak jak w poprzednich modelach wektory prędkości rozkładają się równomiernie wzdłuż linii maski i szyby modelu. Przepływ powietrza w górnej części jest jednorodny. W części dachowej modelu (Zdj. 9 i 10) można obserwować jednorodny ruch przepływu co świadczy o niezaburzonym przez model przepływie.

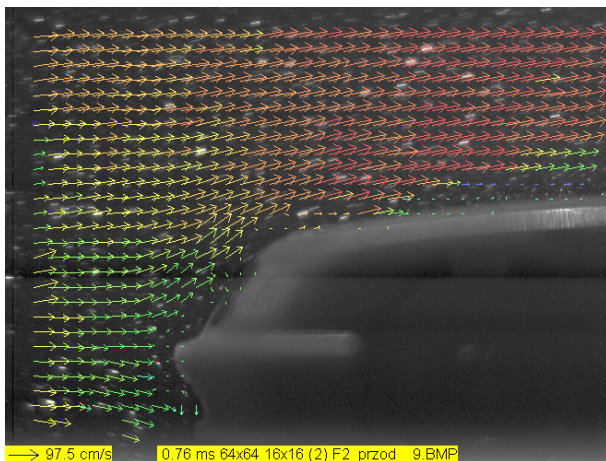


Rys 3. Zarysy maski modelu dla formuły F2

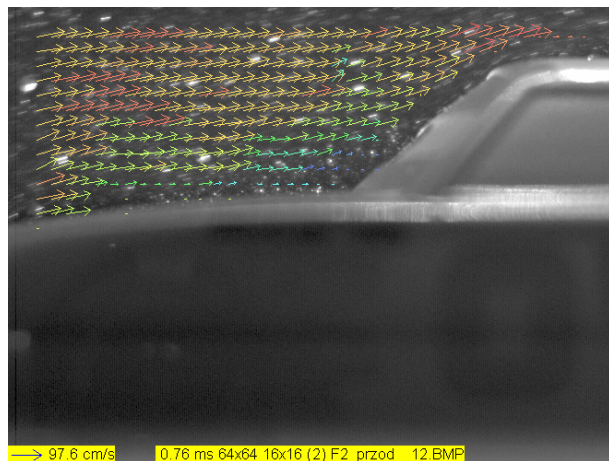


Rys 4. Zarysy przedniej szyby modelu formuły F2

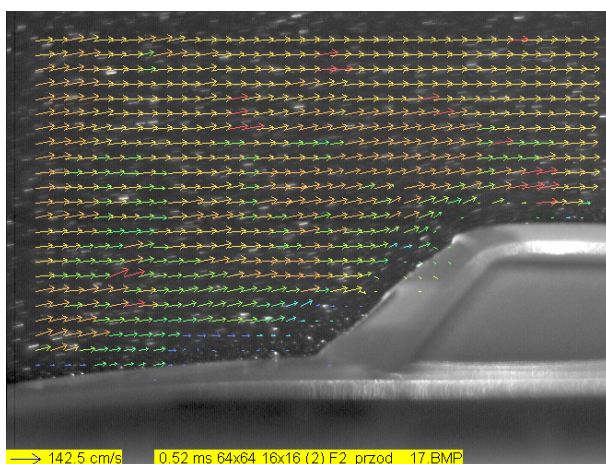
Analizując końcową część modelu – nad bagażnikiem, przed spojlerem (Zdj. 11), można zauważyć odwrócenie przepływu o 180 stopni. Wynika to z oderwania się strugi powietrza od tylnej części dachu oraz pobliskiej przeszkody w postaci spojlera. Przy opisie zdjęcia samego bagażnika (Zdj. 12) modelu formuła F2, można zauważyć podobny efekt odwrócenia przepływu i powstawania zawirowania za modelem. W części bagażnika i spojlera istnieją fluktuacje prędkości wtłaczanego powietrza i powstają gradienty prędkości w kierunku osi OY (Zdj. 12). Składowe wektorów prędkości układają się prawie pionowo ku górze wzdłuż linii bagażnika. Nie zaobserwowano wiru za modelem, który prawdopodobnie położony jest poza kadrem zdjęcia.



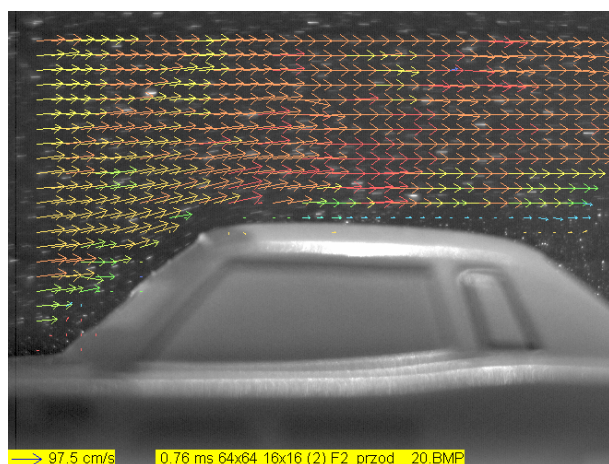
Zdj. 7: Rozkład wektorów prędkości na masce samochodu formuła F2



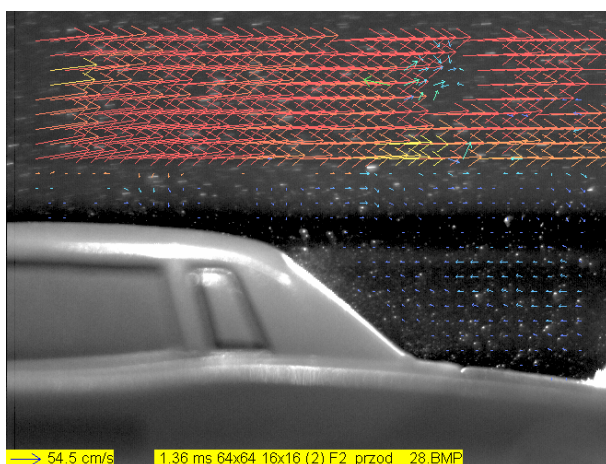
Zdj. 8: Rozkład wektorów prędkości na szybie samochodu formuła F2



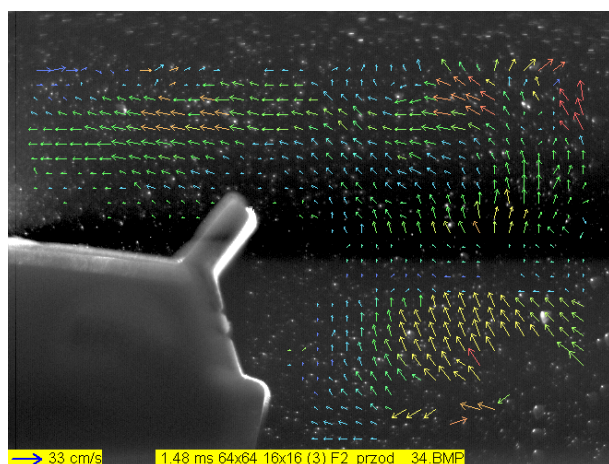
Zdj. 9: Rozkład wektorów prędkości na szybie i dachu samochodu formuła F2



Zdj. 10: Rozkład wektorów prędkości na dachu samochodu formuła F2



Zdj. 11: Przepływ za dachem samochodu formuła F2



Zdj. 12: Przepływ za spojlerem samochodu formuła F2

3.3. Samochodzik

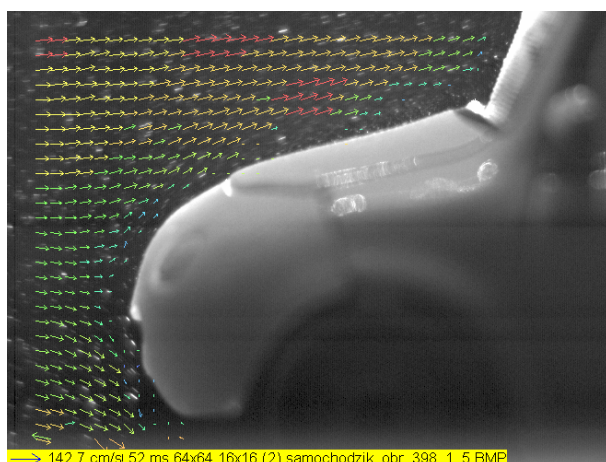
Ostatnim z analizowanych modeli aut jest „samochodzik” (Fot. 4 – długość modelu ok. 5,5 cm). Do analizy pola prędkości, jak w poprzednich przypadkach, wybrano maskę o rozmiarze 64×64 i kroku przesuwu 16×16 pikseli. Opisowi poddano kolejno: maskę przednią, szybę i dach autka oraz bagażnik (tylna część autka).



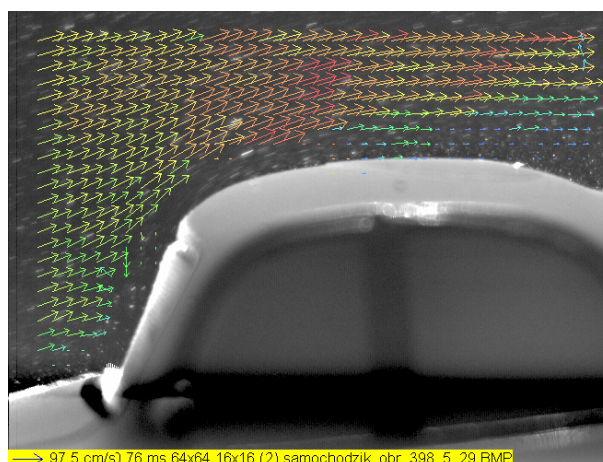
Fot. 4. Model „samochodziku”

Rozpatrując opływ przedniej części modelu (maski) (Zdj. 13) można zauważyć, że kierunki wektorów prędkości odzwierciedlają jego obrys. W środkowej części maski widać, że część strugi skierowana jest w dół, pod podwozie modelu. W górnej części modelu wektory prędkości układają się wzdłuż linii maski i szyby, ku jego górze. W części dachowej (Zdj. 14 i 15) można zauważyć bardzo łagodny opływ powietrza co świadczy o jednorodnym przepływie.

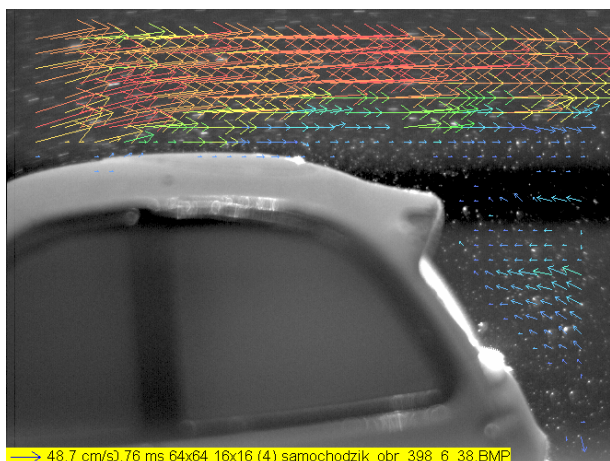
Analizując opływ tylnej części modelu zauważamy, że ciekawe zjawiska zachodzą za bagażnikiem samochodu. Oczywiście w tej części powietrze ze znacznikami nie natrafiając na przeszkodę, ugina się tworząc zapewne poza zdjęciem wir, którego ramię powoduje odwrócenie przepływu i dodatkowo ruch powietrza do góry. Taką sytuację obserwujemy na zdjęciu 16. Natomiast na dwóch kolejnych zdjęciach 17 i 18 można zauważyć tworzące się duże struktury wirowe, które zapoczątkowują turbulentną kaskadę. Przepływ jest mocno zaburzony i można powiedzieć, że gdyby obydwa zdjęcia obejmowały w badaniu większy obszar, dałoby się zauważyć ścieżkę wirową przypominającą ścieżkę wirów Karmana.



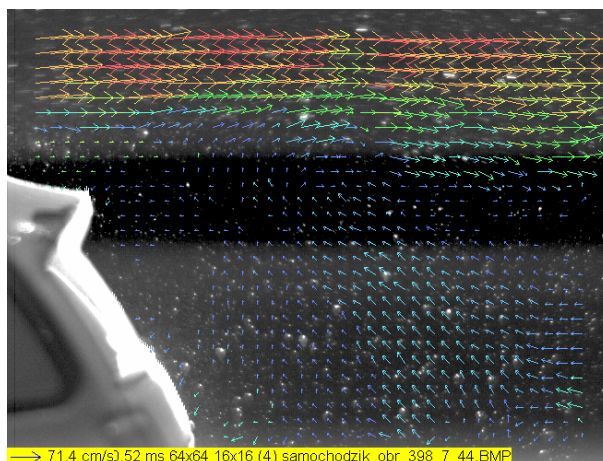
Zdj. 13. Rozkład wektorów przy masce modelu „samochodzik”



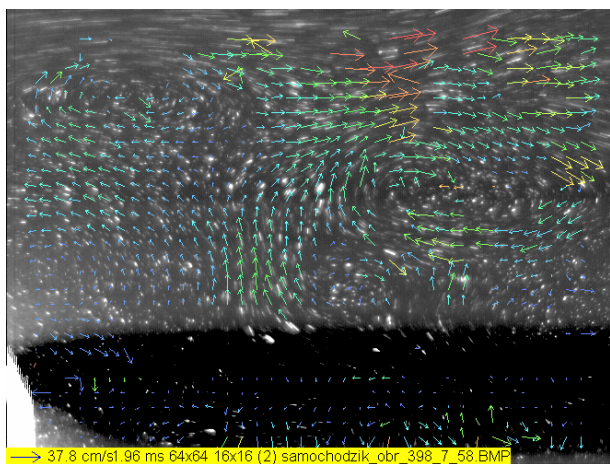
Zdj. 14. Rozkład wektorów wzdłuż dachu samochodu – przednia część



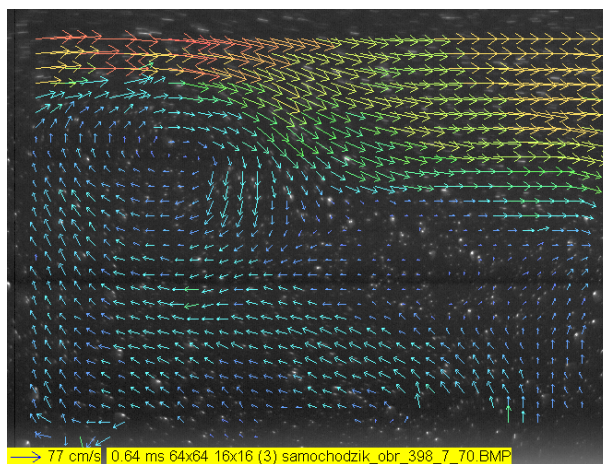
Zdj. 15. Rozkład wektorów wzdłuż dachu samochodu – tylna część



Zdj. 16. Odwrócenie przepływu za bagażnikiem „samochodzika”



Zdj. 17. Wiry powstały za bagażnikiem auta – widoczna tylna część modelu



Zdj. 18. Wiry powstały za bagażnikiem auta – model niewidoczny

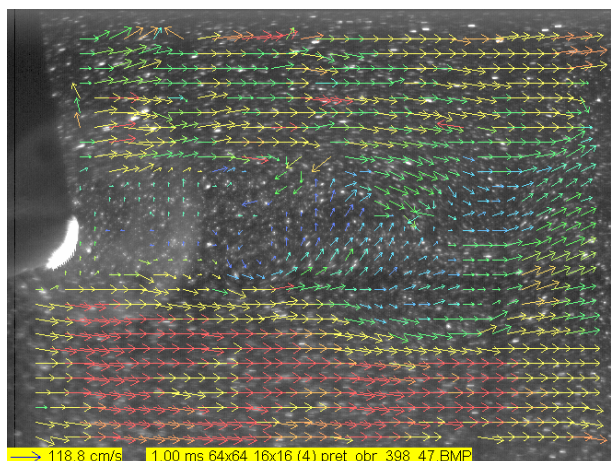
1.1. Walec

Kolejnym badanym modelem był walec o średnicy 10 mm. Walec umieszczono na szerokiej okrągłej podstawie, a jego oś skierowana była wzdłuż osi OZ (pionowo). Prędkość napływu powietrza na walec wynosiła 105 cm/s.

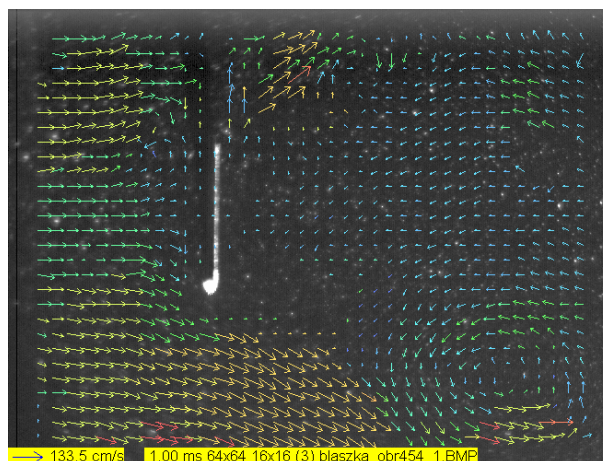
Zdjęcie 19 przedstawia wyznaczone składowe wektora prędkości nałożone na tło badanego obiektu. Na tym zdjęciu przedstawiono badany walec z odznaczającą się w głębi zdjęcia podstawą na której był umieszczony. Opływający walec powietrze, z niesionymi znacznikami, przedstawia obraz wektorów prędkości. Na zdjęciu widać jak tworzą się zawirowania i struktury turbulenty, które są przyczyną zaburzeń w przepływie. Widać również miejsce gdzie osadzony jest walec – jest to obszar w którym brak jest przepływu. W miarę oddalania się od wlotu tunelu, przepływ staje się mniej chaotyczny. Dlatego trudniej jest doszukać się w tym obszarze konkretnych struktur wirowych. (Gumowski, 2008).

1.2. Blaszka

Do tunelu wstawiono metalową blaszkę o szerokości 21,6 mm. Na zdjęciu 20 przedstawiono napływ powietrza na blaszkę. Powietrze opływa model tak, że w górnej części zdjęcia składowa prędkości wzdłuż osi OY jest dodatnia, a w dolnej ujemna. Na zdjęciu 20 w jego dolnej części, widoczny jest wir powstały przy opływie modelu. Za blaszką widoczne jest odwrócenie przepływu wzdłuż całej jej szerokości.



Zdj. 19. Rozkład pola prędkości wokół walca



Zdj. 20. Rozkład pola prędkości przy opływie blaszki

1.3. Lokomotywa

Kolejnym modelem jaki został badany w tunelu aerodynamicznym była lokomotywa (Fot. 5 – długość modelu ok. 9 cm). Do analizy pola prędkości, jak w poprzednich przypadkach, wybrano maskę o rozmiarze 64×64 i kroku przesuwu 16×16 pikseli. Model w celu dokładniejszej charakterystyki przepływu powietrza podzielono na trzy części: przód z kominem, część dachową, tył. Czas pomiędzy zdjęciami wynosił 1.96 ms a wielkość skalująca wektory (2).

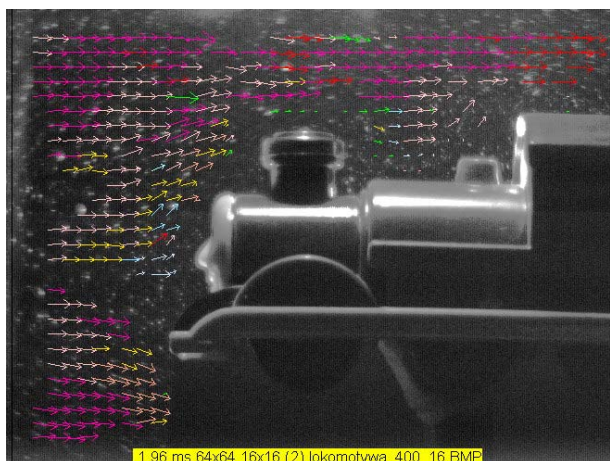


Fot. 5. Model lokomotywy

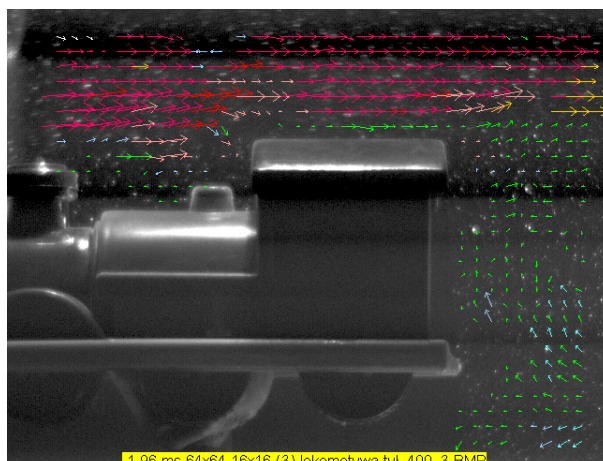
W części przedniej (Zdj. 21) można zauważyć, że napływ powietrza odbywa się od strony lewej do prawej. W przedniej części przepływu wektory prędkości rozkładają się równomiernie i równoległe do napływu powietrza. Natomiast w pobliżu modelu rozptył powietrza skierowany jest w górę nad komin i dół pod podwozie lokomotywy. Składowe wektorów prędkości, które wznoszą się w górę dość wiernie „odrysowują” komin i opadają w przestrzeń między kominem a kabiną motorniczego.

W części „dachowej” przepływ, jak widać na zdjęciu 22, jest jednorodny. Wektory prędkości położone są równoległe względem siebie i, jak można zauważyć, mają zbliżone wartości. W tej części modelu można zauważyć bardzo łagodny opływ, co świadczy o przepływie jednorodnym. Ciekawe zjawiska dzieją się z tyłu lokomotywy za kabiną motorniczego. Następuje tam odwrócenie przepływu i jego bardzo mocne spowolnienie.

Kolejne zdjęcie uzyskano przesuwając model bliżej wylotu powietrza z tunelu – powiększając widoczny obszar za lokomotywą. W ten sposób postanowiono sprawdzić co dzieje się nie tylko w bezpośredniej bliskości za lokomotywą ale również dalej – w przestrzeni znajdującej się w sąsiedztwie cienia aerodynamicznego modelu. Na zdjęciu 23 widoczne są wektory prędkości, które obrazują wir w centralnej części zdjęcia. Przepływ powietrza jest tu zaburzony i odwrócony.

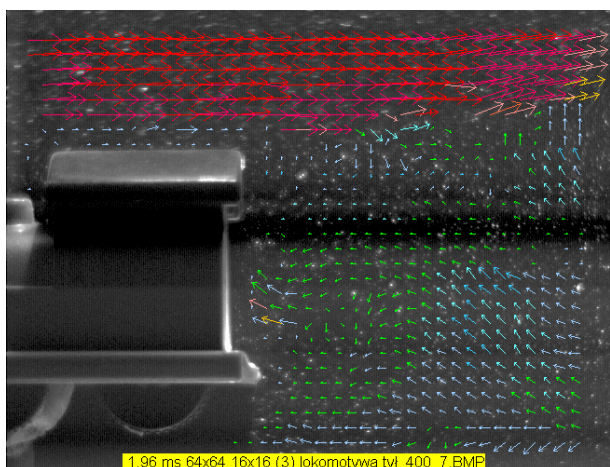


Zdj. 21. Opływ przedniej części lokomotywy

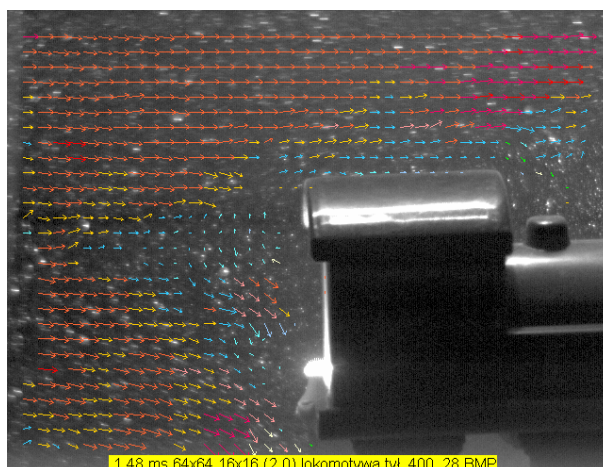


Zdj. 22. Opływ tylnej ściany lokomotywy

Ostatnie zdjęcie w tym opisie dotyczy opływu tylnej części lokomotywy. Model został odwrócony w tunelu o 180 stopni (Zdj. 24). W tym przypadku napływ powietrza wraz ze znacznikami następował na tylną część lokomotywy. Wektory prędkości rozkładają się tu równomiernie, mają również zbliżone wartości. W pobliżu nawietrznej ściany modelu przepływ zwalnia, aż do niemierzalnych wartości. W sąsiedztwie dachu przepływ jest jednorodny, a w okolicy „gwizdka” struga powietrza ugina się, dając niewielkie fluktuacje przepływu. Czas pomiędzy zdjęciami wynosił 1.48 ms, a wielkość skalująca wektory (2) (Suchecki, 2008).



Zdj. 23. Zaburzony przepływ za modelem



Zdj. 24. Napływ powietrza na tył lokomotywy

4. Podsumowanie

Wykonano badania polegające na analizie opływu wybranych modeli. Wykorzystano do tego celu nowo zbudowany powietrzny tunel aerodynamiczny (Gawor i in., 2011), przystosowany do pomiarów metodami optycznymi oraz zestaw do pomiarów metodą cyfrowej anemometrii obrazowej. Uzyskane wyniki wskazują na wysoką użyteczność zastosowanej metody w tego typu badaniach.

Mimo, że jakość uzyskiwanych wyników jest już satysfakcjonująca, to możliwa jest jej dalsza poprawa. Wynika to z faktu, iż wszystkie elementy stanowiska pomiarowego wraz z oprogramowaniem (do sterowania eksperymentem, do akwizycji i analizy danych) są wytworem pracowników Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN. Prace związane z tym zagadnieniem są nieustannie kontynuowane.

Celem przeprowadzonych badań było wypracowanie warsztatu badawczego, ponieważ po raz pierwszy w historii Instytutu Mechaniki Górotworu PAN metodę cyfrowej anemometrii obrazowej zastosowano do pomiarów przepływów gazów. Planuje się, że po niewielkich modernizacjach układu pomiarowego, możliwe będzie rozpoczęcie prac badawczych związanych np. z szeroko pojętą analizą przepływów w wyrobiskach górniczych, badaniami właściwości aerodynamicznych elementów konstrukcyjnych urządzeń takich jak anemometry skrzydełkowe, termoanemometry i inne.

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN pt. *Opracowanie metody nieinwazyjnego pomiaru powolnych przepływów gazów przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej* w 2011 roku, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Gawor M. (2008): *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 10, nr 1-4, s. 169-186, Kraków.
- Gawor M., Mnich-Medoń K., Sobczyk J. (2011): *Tunel aerodynamiczny przystosowany do badań metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 13, nr 1-4, s. 257-265, Kraków.
- Gumowski K. (2008): *Struktury wirowe w opływie kuli przy małych liczbach Reynoldsa*.
- Suchecki W. (2008): *Badanie opływu pęku rur w modelu krystalizatora chłodzonego metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Politechnika Warszawska.
- Tadeusiewicz R., Korohoda P. (1997): *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Kraków.

Measuring the flow-around of selected models by means of the digital particle image velocimetry method

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of flow-arounds of selected models (three cars, an engine, a rod, and a scrap of metal plate). The studies were carried out in a newly-built wind tunnel. The obtained results testify to a high usefulness of the applied measuring method, i.e. particle image velocimetry (PIV), in studies of such type. The determined and presented velocity fields of the air flowing round the models provide a substantial amount of detailed information as regards the flow, both in terms of distribution and time.

It needs to be emphasized that the quality of the obtained results is fully satisfactory – the more so that, in the whole history of the Strata Mechanics Research Institute, it has been the first application of the PIV method in the area of gas flow measurements. Additionally, this was accomplished with an original measuring station and software, developed at the Institute.

Key words: digital particle image velocimetry, model flow-around, wind tunnel