

## Badanie własności aerodynamicznych samochodu Polonez

(Instrukcję opracowano na podstawie książki J. Piechny „Podstawy aerodynamiki pojazdów”, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000)

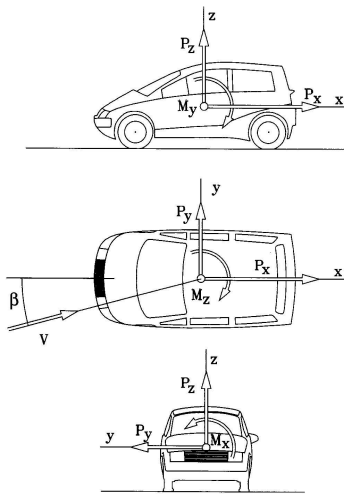
### Cele ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi informacjami na temat aerodynamiki samochodu, pomiar rozkładu ciśnień na modelu samochodu Polonez oraz porównaniu tych wyników z wynikami symulacji numerycznej.

### Wiadomości podstawowe

#### Siły i momenty działające na pojazd

W wyniku wzajemnego oddziaływania pomiędzy samochodem a ośrodkiem, w którym się on porusza, na pojazd działa wypadkowa siła aerodynamiczna oraz moment. Przyjmując układ współrzędnych związany z pojazdem i skierowany tak, że oś  $x$  jest skierowana przeciwnie do kierunku ruchu, oś  $y$  prostopadła do osi  $x$  a oś  $z$  pionowo do góry, otrzymamy składowe siły i momenty przedstawione na rys. 1.



Rys. 1 Siły i momenty działające na pojazd

Składowa siła aerodynamiczna wzdłuż osi  $x$  nazywana jest siłą oporu aerodynamicznego ( $P_x$ ), składowa wzdłuż osi  $z$  siłą nośną ( $P_z$ ) a składowa wzdłuż osi  $y$  siłą boczną ( $P_y$ ). Jeśli siła nośna ma wartość ujemną, wtedy nazywa się ją często siłą docisku. Moment względem osi  $y$  nazywa się momentem pochylającym ( $M_y$ ), względem osi  $x$  momentem przechylającym ( $M_x$ ), a względem osi  $z$  momentem odchylającym ( $M_z$ ).

#### Opór aerodynamiczny, współczynnik oporu

Siła oporu przeciwdziałająca ruchowi pojazdu pochodzi częściowo od oporu toczenia kół, a częściowo od oporu aerodynamicznego. Opory toczenia

przeważają przy prędkościach poniżej 65-80 km/h, powyżej dominuje opór aerodynamiczny. Bezwymiarową wielkością służącą do porównań dla różnych kształtów samochodów jest tzw. współczynnik oporu, definiowany jako

$$C_x = \frac{P_x}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

gdzie:

$P_x$  – siła oporu,

$\rho$  – gęstość powietrza,

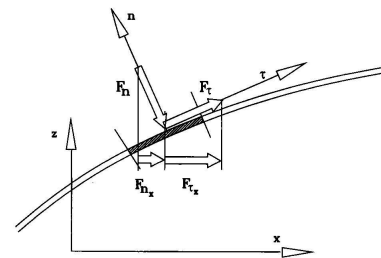
$V$  – prędkość,

$A$  – powierzchnia odniesienia.

W aerodynamice samochodów jako powierzchnię odniesienia  $A$  przyjmuje się z reguły tzw. powierzchnię czołową, czyli największą powierzchnię w płaszczyźnie  $yz$ . Współczynnik oporu  $C_x$  zależy głównie od kształtu samochodu, ale także od innych czynników jak liczba podobieństwa Reynoldsa czy poziom turbulencji powietrza.

W przepływie płaskim siła oporu aerodynamicznego zależy od rozkładu ciśnień na powierzchni opływającej bryły (tzw. **opór ciśnieniowy**) oraz sił tarcia (**opór tarcia powierzchniowego**).

Ogólnie siłę  $F$  działającą na elementarną powierzchnię można podzielić na siłę od ciśnienia ( $F_n$ ), prostopadłą do tej powierzchni i siłę od naprężeń ścinających ( $F_\tau$ ) działającą wzdłuż niej. Ich rzuty na kierunek  $x$  wynoszą odpowiednio  $F_{nx}$  i  $F_{\tau x}$  (rys. 2).



Rys. 2 Siły działające na elementarną powierzchnię

W przypadku opływu trójwymiarowego (a takim jest zawsze opływ pojazdu) pojawia się dodatkowa siła oporu (tzw. **opór indukowany**), wynikająca z istnienia za pojazdem trójwymiarowych struktur wirowych (tzw. wiry krawędziowe). Modyfikują one rozkład ciśnień wokół rzeczywistego pojazdu w stosunku do modelu płaskiego. Ogólnie zatem siła oporu

$$P_x = P_c + P_t + P_i$$

gdzie:

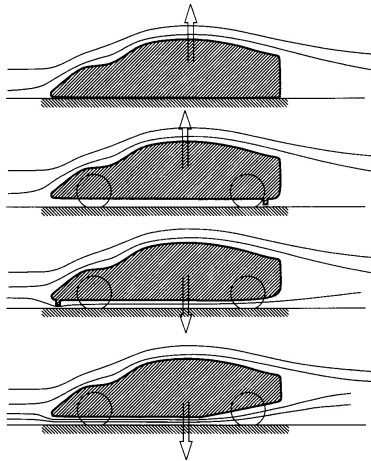
$P_c$  – opór ciśnieniowy,  $P_t$  – opór tarcia,  $P_i$  – opór indukowany.

### Siła nośna

Podczas ruchu pojazdu strugi powietrza opływające go od góry zwiększają swoją prędkość w stosunku do prędkości napływu. Zgodnie zatem z równaniem Bernoulliego

$$\frac{\rho V^2}{2} + p = const$$

ciśnienie powietrza maleje. Efektem tego jest powstanie siły aerodynamicznej skierowanej do góry, czyli siły nośnej, unoszącej pojazd. Z kolei powietrze przepływające pod samochodem, w zależności od warunków przepływu, może tę siłę wzmacniać, albo wywoływać siłę w przeciwnym kierunku (do-cisk). Wypadkowa siła nośna może być zatem, w zależności od konstrukcji pojazdu, skierowana do góry albo do dołu, jak to pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Siła nośna w zależności od kształtu nadwozia

Współczynnik siły nośnej jest definiowany jako

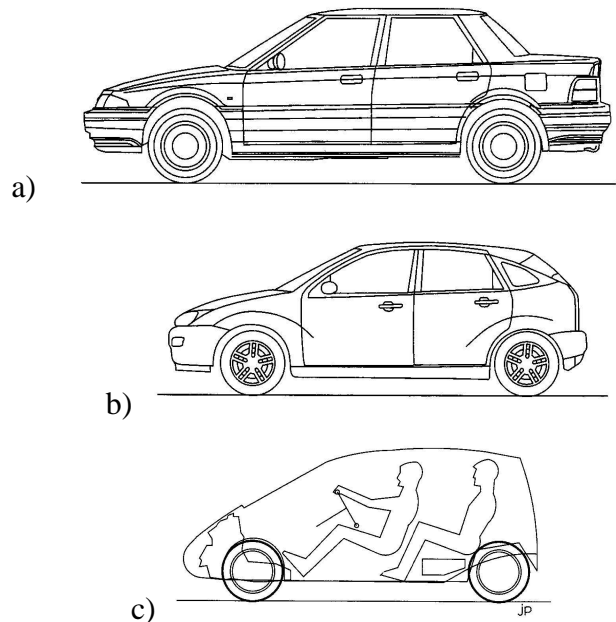
$$C_z = \frac{P_z}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

gdzie:  $P_z$  – siła oporu,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $V$  – prędkość,  $A$  – powierzchnia odniesienia.

W tym miejscu należy przypomnieć, że na samochód, oprócz siły nośnej wynikającej z opływu, działa jeszcze siła od ciężaru pojazdu wraz z pasażerami (skierowana do dołu).

### Aerodynamika samochodów osobowych

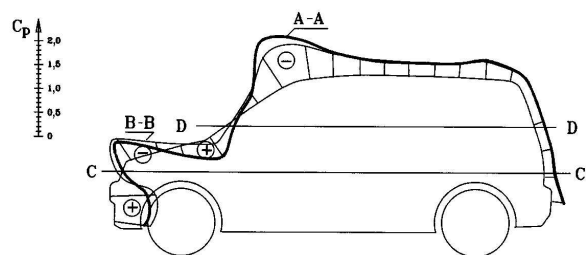
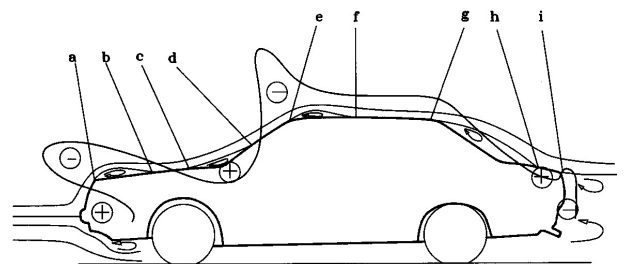
Nadwozia samochodów osobowych, z punktu widzenia geometrii, można podzielić na trzy podstawowe grupy: nadwozia trójbryłowe (rys. 4a), dwubryłowe (rys. 4b) i jednobryłowe (rys. 4c).

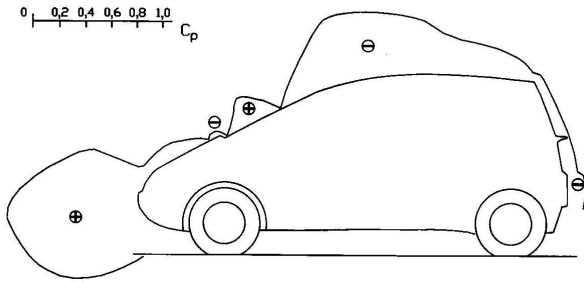


Rys. 4 Rodzaje nadwozi z punktu widzenia geometrii

W nadwoziu trójbryłowym w bryle pierwszej mieści się silnik i układ przeniesienia napędu, bryłę drugą stanowi kabina pasażerska a bryłę trzecią – bagażnik. W nadwoziu dwubryłowym największe zmiany widzimy z tyłu pojazdu. Bagażnik uległ zmniejszeniu i jest połączony z kabiną pasażerską. Z kolei nadwozie jednobryłowe powstało jako spełniające wymogi najmniejszej objętości.

W zależności od typu geometrii zmianie ulegają rozkłady ciśnień na nadwoziu. Typowe rozkłady w płaszczyźnie symetrii XZ przedstawiono na rys. 5 (znak „+” oznacza, że ciśnienie w danym miejscu jest większe od tzw. ciśnienia w strumieniu napływającym, znak „-”, że mniejsze).





Rys. 5 Rozkłady ciśnień w płaszczyźnie symetrii w zależności od rodzaju nadwozia

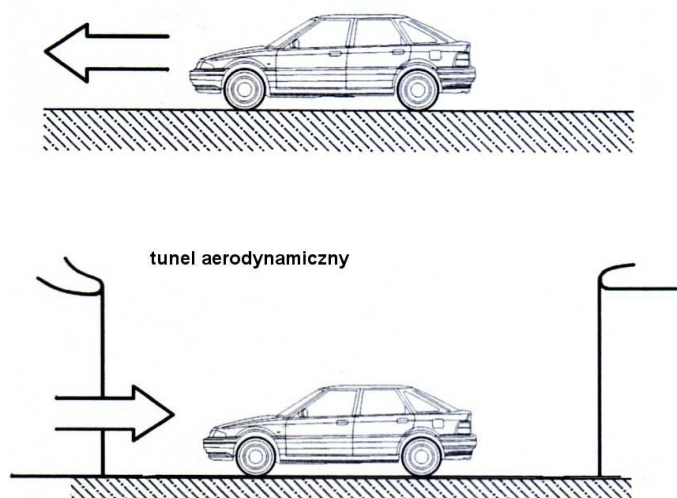
Rozkłady ciśnień najlepiej jest przedstawiać w formie bezwymiarowej. Użyteczną wielkością jest tu tzw. **współczynnik ciśnienia**, definiowany jako

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}$$

gdzie:  $p$  – lokalne ciśnienie na powierzchni nadwozia,  $p_\infty$  - ciśnienie w „nieskończoności” (daleko przed pojazdem) - w przypadku badań w tunelu aerodynamicznym jest to prędkość strumienia napływającego,  $\rho$  - gęstość powietrza,  $V$  – prędkość pojazdu w nieruchomym ośrodku (w przypadku badań w tunelu aerodynamicznym jest to prędkość strumienia napływającego)

## Badania tunelowe

Umieszczenie modelu pojazdu w tunelu aerodynamicznym powoduje, że strumień powietrza napływający na model ma nieco inny rozkład prędkości niż w przypadku ruchu samochodu po nieruchomej jezdni (rys. 6).

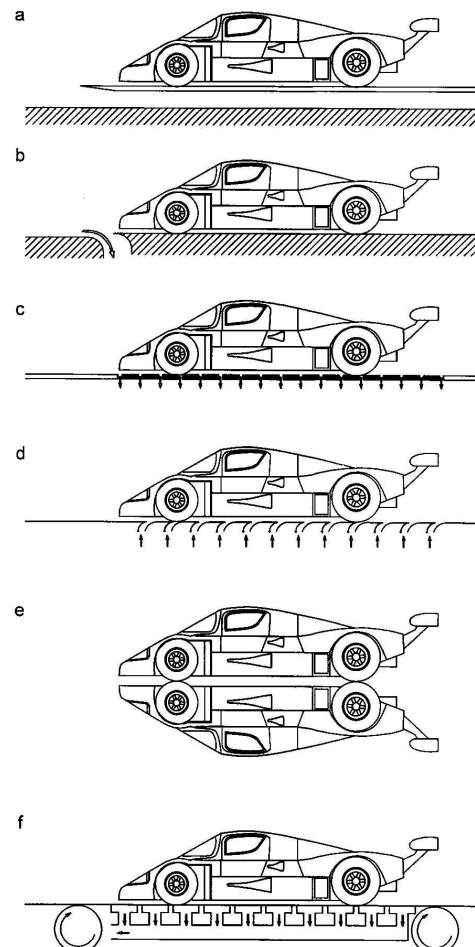


Rys. 6 Różnice w opływie dla ruchu rzeczywistego i w tunelu aerodynamicznym

Na ścianie dolnej tunelu tworzy się warstwa przyścienna, która w przypadku dużych tuneli może mieć grubość dochodzącą do 0.1 m, a więc znaczącą

np. w porównaniu z prześwitem pod samochodem. Dlatego też w przypadku badań tunelowych stosuje się różne sposoby eliminowania „efektu podłoża”. Należą do nich (rys. 7):

- umieszczenie modelu na specjalnej płycie o ostrej krawędzi w celu „odcięcia” warstwy przyściennej. „Nowa” warstwa przyścienna, rozpoczynająca się od ostrza jest już dużo cieńsza.
- odsysanie warstwy przyściennej przed modelem.
- odsysanie warstwy przyściennej pod całą powierzchnią modelu
- nadmuchiwanie powietrza pod model w celu uzupełnienia masy i energii w warstwie przyściennej
- zastosowanie dwóch identycznych modeli w celu wykorzystania symetrii opływu,
- zastosowanie ruchomej taśmy symulującej ziemię. Taśma musi poruszać się z prędkością równą prędkości napływającego strumienia powietrza. W przypadku jej zastosowania pojawiają się problemy z zamocowaniem modelu do układu wagowego (mocowanie może być tylko z tyłu lub z góry), co zmienia charakter opływu modelu. Dodatkowe trudności pojawiają się w przypadku napływu skośnego.



Rys. 7 Sposoby eliminowania efektu podłoża

## Wizualizacje opływu

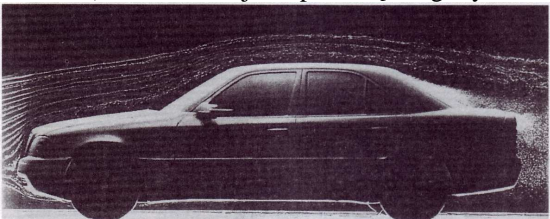
Oprócz badań rozkładów ciśnień oraz pomiarów wagowych istotną rolę w badaniach aerodynamiki pojazdów odgrywają różnego rodzaju wizualizacje. Są one szczególnie ważne na etapie projektowania. Pozwalają określić charakter przepływu w warstwie przyściennej, punkty oderwania, charakter przepływów powrotnych i wiele innych cech opływu.

Metody wizualizacji w tunelach (rys. 8):

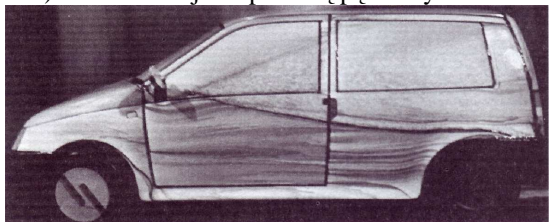
- wizualizacja za pomocą strugi dymu (wizualizacja przestrzenna).
- wizualizacja za pomocą pęcherzyków wodoru (wizualizacja przestrzenna).
- wizualizacja olejowa. Polega ona na pokrywaniu powierzchni badanego obiektu ciekłym barwnikiem (jest to mieszanina oleju z farbą).
- wizualizacja tzw. wskaźnikami kierunku (może służyć do wizualizacji kierunku przepływu na powierzchni lub w przestrzeni ponad lub za modelem)



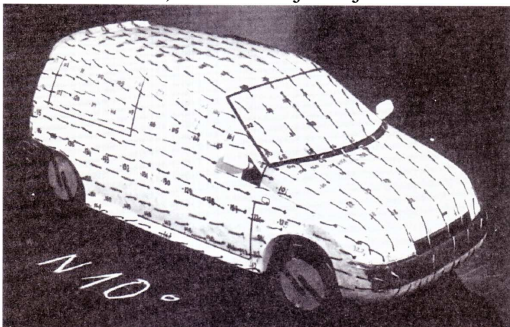
a) wizualizacja za pomocą strugi dymu



b) wizualizacja za pomocą pęcherzyków wodoru



c) wizualizacja olejowa



d) wizualizacja tzw. wskaźnikami kierunku

Rys. 8 Metody wizualizacji

## Stanowisko pomiarowe

Badania aerodynamiki samochodu Polonez obejmują:

- miar rozkładu ciśnień na powierzchni modelu samochodu o wymiarach (długość  $\times$  szerokość  $\times$  wysokość) =
- wizualizację opływu nadwozia metodą wizualizacji olejowej oraz wizualizację wskaźnikami kierunku. Ponadto przeprowadzona będzie wizualizacja pogładowa innych typów nadwozi metodą linii wysnutej w tunelu dymnym.

Każde z tych badań wykonywane jest na innym stanowisku pomiarowym. Badania rozkładu ciśnień wykonywane są w tunelu pionowym o średnicy przestrzeni pomiarowej  $\Phi=500$  mm

## Wykonanie ćwiczenia

### Pomiar rozkładu ciśnień:

- zamocować model samochodu na stanowisku pomiarowym
- dokonać podłączenia rurek ciśnieniowych do baterii manometru wodnego
- uruchomić tunel i ustalić prędkości przepływu powietrza na założonym poziomie
- dokonać pomiaru ciśnień we wszystkich otworkach
- zmienić kąt ustawienia modelu według wskazówek prowadzącego
- dokonać powtórnego pomiaru ciśnień we wszystkich otworkach dla nowego ustawienia
- wyłączyć tunel.

### Wizualizacja opływu metodą olejową:

- zamocować model samochodu na stanowisku pomiarowym
- pokryć powierzchnię modelu farbą do wizualizacji
- uruchomić tunel i ustalić prędkości przepływu powietrza na założonym poziomie
- odczekać, aż na powierzchni modelu wykształci się prawidłowy obraz, po czym sфотографować wynik
- wyłączyć tunel a następnie wyczyścić jego powierzchnię do powtórnego badania
- zmienić kąt ustawienia modelu według wskazówek prowadzącego
- powtórzyć punkty 2, 3 i 4.
- wyłączyć tunel

### Wizualizacja opływu metodą wskaźników kierunku:

- przygotować model do badań przyklejając do jego powierzchni odpowiednią ilość wskaźników kierunku
- zamocować model samochodu na stanowisku pomiarowym

3. uruchomić tunel i ustalić prędkości przepływu powietrza na założonym poziomie
4. sfotografować obraz wskaźników kierunku w interesujących miejscach
5. zmienić kąt ustawienia modelu według wskazówek prowadzącego
6. powtórnie sfotografować obraz wskaźników kierunku w interesujących miejscach
7. wyłączyć tunel

#### **Wizualizacja w tunelu dymnym:**

1. wybrać modele samochodów do wizualizacji
2. umieścić wybrany model w przestrzeni pomiarowej tunelu
3. włączyć przepływ
4. obejrzeć układ linii wysnutych i ew. sfotografować go
5. powtórzyć punkty 2, 3 i 4 dla innych modeli
6. wyłączyć tunel.

#### **Wykonanie sprawozdania**

W części dotyczącej pomiarów rozkładu ciśnień sprawozdanie powinno zawierać:

- schemat stanowiska pomiarowego
- rysunek badanego modelu z zaznaczonymi punktami pomiarowymi
- wyniki pomiarów ciśnień
- rozkłady ciśnień na powierzchni modelu
- wnioski

W części dotyczącej wizualizacji opływu sprawozdanie powinno zawierać:

- schemat stanowiska pomiarowego
- zdjęcia z przeprowadzonych wizualizacji z omówieniem
- wnioski