

Ćw. 6 Pomiary oporu aerodynamicznego

1. Cel ćwiczenia

Cele ćwiczenia są następujące:

1. Pomiar oporu profilu kołowego metodą badania rozkładu ciśnienia na jego powierzchni.
2. Wzorcowanie metody straty pędu w śladzie aerodynamicznym.
3. Wykorzystanie metody straty pędu w śladzie aerodynamicznym do określenia wpływu szorstkości powierzchni walca na jego opór.

2. Podstawy teoretyczne

Siła aerodynamiczna jest wypadkową elementarnych sił wywołanych na powierzchni ciała stałego przez opływający je płyn. Rzut siły aerodynamicznej na kierunek prędkości nazywamy oporem aerodynamicznym.

W przepływie płaskim opór aerodynamiczny składa się z:

-oporu ciśnieniowego, zwanego też oporem kształtu (rzut sił normalnych na kierunek \vec{v}_∞)

$$P_{xc} = \iint_s p \vec{n} \cos(-\vec{n}, \vec{v}_\infty) d s, \quad (1)$$

gdzie \vec{n} - normalna zewnętrzna elementu łuku $d s$ (patrz rys. 3),

-oporu tarcia (rzut sił stycznych na kierunek \vec{v}_∞)

$$P_{xt} = \iint_s \vec{\tau} \cos(\vec{s}, \vec{v}_\infty) d s, \quad (2)$$

gdzie przez $(\vec{s}, \vec{v}_\infty)$ rozumiemy kąt między styczną do profilu, mającą ten sam zwrot co $\vec{\tau}$, a kierunkiem prędkości \vec{v}_∞ .

Ich suma jest oporem profilowym

$$P_x = P_{xc} + P_{xt}. \quad (3)$$

Wzajemny udział oporu ciśnieniowego i oporu tarcia w oporze profilowym zależy od kształtu ciała, jego ustawienia względem kierunku przepływu i charakteru przepływu w warstwie przyściennej. I tak np. dla płaskiej płytki ustawionej prostopadle do kierunku prędkości, opór ciśnieniowy stanowi całość oporu aerodynamicznego, zaś dla tej samej płytki ustawionej równolegle, opór ciśnieniowy jest równy zero, a opór profilowy jest równy oporowi tarcia. Dla innych kształtów np. walec lub kula $P_{xc} \ll P_{xt}$, dla profilu

lotniczego ustawionego pod niewielkim kątem natarcia $P_{xc} \gg P_{xt}$. Czasami opór całkowity może być nawet nieco mniejszy od oporu ciśnieniowego, gdyż część konturu opływana jest w kierunku przeciwnym do działania wypadkowej siły P_x .

Ogólnie przyjmujemy, że kształty „opływowe” to te, dla których opór tarcia stanowi główną część oporu aerodynamicznego, zaś kształty „nieopływowe” to te, dla których opór tarcia jest pomijalnie mały w porównaniu z oporem ciśnieniowym.

Siły aerodynamiczne, a więc i opór można mierzyć następującymi metodami:

- 1) korzystając z zasady zachowania pędu,
- 2) wykorzystując pomiar rozkładu ciśnień i naprężeń stycznych na powierzchni opływającego ciała,
- 3) wagowo (bezpośredni pomiar siły),.

Metoda 3) omówiona jest szczegółowo w ćwiczeniu „Pomiary wagowe sił aerodynamicznych”. W niniejszym ćwiczeniu poznamy metody 1) i 2) i wykorzystamy je do wyznaczenia współczynników oporu aerodynamicznego profilu kołowego gładkiego i szorstkiego.

2.1. Metoda 1

W odniesieniu do jednostki czasu zmiana pędu płynu jest równa sumie sił działających na płyn objęty powierzchnią kontrolną δ

$$\iint_\delta \rho V_n \vec{V} d \delta = \Sigma \vec{P}. \quad (4)$$

Jako siły działające na płyn rozumiemy siły powierzchniowe na powierzchni δ (styczne i normalne) oraz siły oddziaływania ciał stałych znajdujących się wewnątrz przestrzeni kontrolnej (pomijamy siły grawitacyjne).

Wypadkowa sił powierzchniowych normalnych (ciśnieniowych) wynosi:

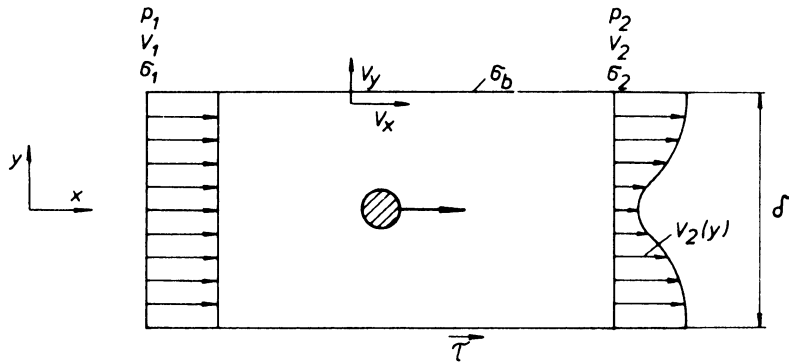
$$\vec{P}_c = - \iint_\sigma p \vec{n} d \sigma, \quad (5)$$

(znak minus, gdyż za dodatni przyjmujemy kierunek normalnej zewnętrznej do powierzchni δ).

Wypadkowa sił stycznych wynosi natomiast:

$$\vec{P}_t = \iint_\delta \vec{\tau} d \sigma. \quad (5)$$

Wypadkowa sił stycznych wynosi natomiast:



Rys.1 Przestrzeń kontrolna dla bilansu pędu

Dla powierzchni kontrolnej jak na rys.1 (powierzchnie boczne równoległe do kierunku przepływu) zasadę zachowania ilości ruchu (pędu) w kierunku przepływu można zapisać:

$$\begin{aligned} - \iint_{\sigma_1} \rho V_1^2 d\sigma + \iint_{\sigma_b} \rho V_y V_x d\sigma + \iint_{\sigma_2} \rho V_2^2 d\sigma = \\ = \iint_{\sigma_1} p_1 d\sigma + \iint_{\sigma_b} \tau d\sigma - \iint_{\sigma_2} p_2 d\sigma - P_x, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$\rho V_y d\sigma$ - elementarny wydatek masowy przez element powierzchni bocznej $d\sigma_b$,

V_x - składowa prędkości w kierunku x ,

V_2 - prędkość w śladzie aerodynamicznym (zależna od y).

Jeśli przez P_x oznaczmy siłę oddziaływania płynu na ciało (czyli opór), to wypadkowa siła oddziaływania ciała stałego znajdującego się w przestrzeni kontrolnej wynosi $-P_x$.

Z równania ciągłości wynika, że:

$$- \iint_{\sigma_1} \rho V_1 d\sigma + \iint_{\sigma_b} \rho V_y d\sigma + \iint_{\sigma_2} \rho V_2 d\sigma = 0. \quad (8)$$

Wobec $\sigma_1 = \sigma_2$ na podstawie (8) mamy

$$\iint_{\sigma_b} \rho V_y d\sigma = \iint_{\sigma_1 = \sigma_2} \rho (V_1 - V_2) d\sigma. \quad (9)$$

Zauważmy, że gdy $\delta \rightarrow \infty$ to $V_x \rightarrow V_1$, a wtedy

$$\iint_{\sigma_b} \rho V_x V_y d\sigma \rightarrow V_1 \iint_{\sigma_b} \rho V_y d\sigma = \iint_{\sigma_2} \rho V_1 (V_1 - V_2) d\sigma. \quad (10)$$

Siły styczne $\left(\iint_{\sigma_b} \tau d\sigma \right)$ na powierzchniach bocznych, w przypadku gdy

ich odległość (δ) jest dużo większa od szerokości śladu aerodynamicznego, można zaniedbać. Uwzględniając ten warunek oraz zależność (10), równanie (7) otrzymuje po przekształceniach postać:

$$P_x = \iint_{\delta} (p_1 - p_2) d\sigma + \iint_{\sigma} \rho V_2 (V_1 - V_2) d\sigma. \quad (11)$$

Dla przepływu płaskiego opór modelu o jednostkowej długości wyniesie

$$P_x = \int_{\delta} (p_1 - p_2) dy + \int_{\delta} \rho V_2 (V_1 - V_2) dy. \quad (12)$$

Zauważmy, że mierząc opór modelu w otwartej przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego mamy $p_1 = p_2 = p_a$. Jeśli tylko przekroje 1 i 2 są wystarczająco odległe od modelu. W takim przypadku pierwszy człon prawej strony równania (12) jest równy 0. Te same warunki są spełnione, gdy pomiaru oporu dokonujemy podczas lotu samolotu.

Wykorzystując definicję współczynnika oporu $C_x = \frac{2 P_x}{\rho V_{\infty}^2}$ i przyjmując, że

$V_1 = V_{\infty}$ a $V_2 = V_{\text{śladu}}$ otrzymamy z zależności (12)

$$C_x = \frac{2}{V_{\infty}^2 S} \int_{\delta} V_2 (V_{\infty} - V_2) dy. \quad (13)$$

Dla profilu kołowego o jednostkowej długości, wobec $S = d l$ oraz uwzględniając definicję ciśnienia dynamicznego $q = \frac{\rho V_{\infty}^2}{2}$ otrzymamy najwygodniejszą (z punktu widzenia praktyki laboratoryjnej) postać wzoru na C_x

$$C_x = \frac{2}{d} \int_0^{\delta} \frac{\sqrt{q_2}}{\sqrt{q}} \left(1 - \frac{\sqrt{q_2}}{\sqrt{q}} \right) dy. \quad (14)$$

Ze wzoru (14) wynika, że wystarczy pomierzyć rozkład ciśnienia dynamicznego w jednym przekroju śladu aerodynamicznego aby określić C_x .

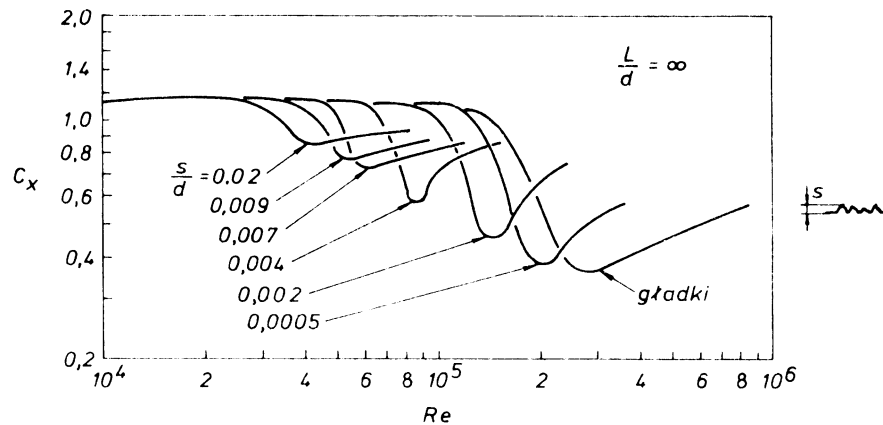
W praktyce nie wszystkie założenia, które zostały wykorzystane do wyprowadzenia zależności (13) (tzn. $\delta \rightarrow \infty$, $p_1 = p_2$, $V_1 = V_{\infty} = V_2$) mogą być dokładnie spełnione podczas doświadczenia, więc metoda wymaga

wzorcowania. Wzorcowania dokonujemy mierząc opór inną metodą lub wykorzystując dane katalogowe. Porównując otrzymany wynik możemy do wzoru (13) wprowadzić współczynnik poprawkowy K , który jest stały dla danych warunków pomiarowych.

$$K = C_{x \text{ wzorcowe}} / C_{x \text{ met. śladu}}$$

Jako warunki pomiarowe należy tu rozumieć: rodzaj tunelu, stosunek wymiarów modelu do wymiarów przestrzeni pomiarowej, miejsce ustawienia modelu w tunelu, odległość przekroju pomiarowego od modelu, zakres całkowania.

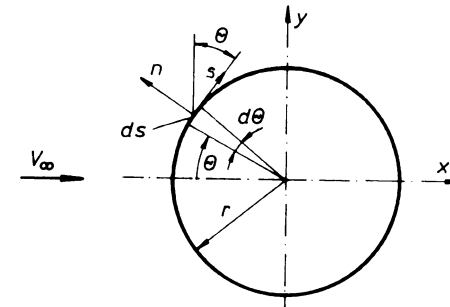
W ćwiczeniu jako modelu wzorcowego użyjemy gładkiego profilu kołowego, którego współczynnik oporu w zależności od liczby Re pokazano na rysunku 2.



Rys.2 Współczynnik oporu walca w funkcji chropowatości powierzchni i liczby Reynoldsa

2.2. Metoda 2

Jak wynika ze wzoru (1), warunkiem wyznaczenia oporu ciśnieniowego jest znajomość rozkładu ciśnienia na powierzchni ciała. Wobec braku metod teoretycznych, pozwalających wyznaczyć ciśnienie na powierzchni bryły o dowolnym kształcie opływanej płynem lepkiem, konieczne jest korzystanie z danych doświadczalnych. Wartość oporu otrzymujemy poprzez całkowanie graficzne lub numeryczne wzoru (1).



Rys. 3. Układ współrzędnych

W przypadku walca kołowego o jednostkowej długości z rys. 3 wynika, że $ds = r d\theta$,

$$\cos(-\vec{n}, \vec{V}) = \cos \theta.$$

Wzór (1) można przepisać w postaci:

$$P_{xc} = \int_0^{2\pi} p r \cos \theta d\theta. \quad (15)$$

Dzieląc siłę oporu ciśnieniowego przez ciśnienie dynamiczne $q = \frac{\rho V_\infty^2}{2}$ oraz powierzchnię odniesienia $S = d L$ otrzymamy bezwymiarowy współczynnik oporu ciśnieniowego

$$C_{xc} = \frac{P_{xc}}{q d L}. \quad (16)$$

Uwzględniając symetrię profilu oraz przechodząc do kąta mierzzonego w stopniach, otrzymamy

$$P_{xc} = \frac{\pi d L}{180} \int_0^{180} p \cos \theta d\theta,$$

gdzie d oznacza średnicę walca, a L jego długość.

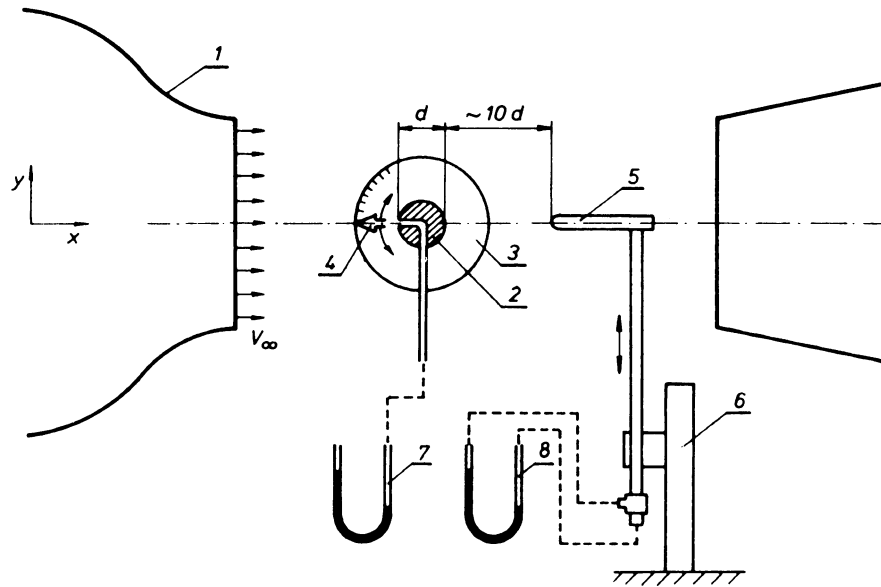
Dla walca o jednostkowej długości, korzystając z definicji (1) mamy

$$C_{xc} = \frac{\pi}{180 q} \int_0^{180} p \cos \theta d\theta \quad (17)$$

3. Stanowisko pomiarowe

Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4. W otwartej przestrzeni po-

miarowej tunelu aerodynamicznego 1 umieszczony jest badany model (walec kołowy) 2. Przez obracanie walca 2 wokół osi można uzyskać różne położenia otworka pomiarowego, które odczytuje się na skali 3 dzięki wskazówce 4 związanej z walcem. Ciśnienie w otworze pomiarowym (w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego) mierzy manometr 7. W odległości ok. 10 średnic za walcem umieszczona jest rurka Prandtla 5, której położenie ustalane jest posuwem 6. Różnica ciśnień mierzona jest manometrem 8.



Rys. 4 Stanowisko do wyznaczania oporu walca

4. Wykonanie ćwiczenia

Zmierzyć i zapisać w protokole pomiarowym:

- ciśnienie atmosferyczne p_a ,
- temperaturę otoczenia t °C,
- ciśnienie statyczne w przestrzeni pomiarowej $p_\infty = p_a + \Delta p_\infty$ gdzie:
 - Δp_∞ - ciśnienie wskazywane przez manometr podłączony do otworków p_{st} rurki Prandtla umieszczonej w przepływie o ciśnieniu dynamicznym q ,
- ciśnienie dynamiczne strumienia niezakłóconego $q = p_0 - p_\infty$ gdzie p_0 - ciśnienie spiętrzenia.

Część A

- Pomierzyć rozkład ciśnienia dynamicznego w śladzie za badanym profilem (zalecana wielkość $\Delta y = 5$ mm a zakres y nie mniej niż 140 mm).
- Obliczyć C_x ze wzoru

$$C_x = \frac{2}{d} \sum_{i=1}^n \frac{V_{sl}}{V_\infty} \left(1 - \frac{V_{sl}}{V_\infty} \right) dy$$

gdzie: $V_{sl} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}$, $V_i = \sqrt{\frac{2q_i}{\rho}}$, $\Delta y = y_{i+1} - y_i$

- wyznaczyć współczynnik korekcyjny K (kalibracji metody)

$$K = \frac{C_{xw}(\text{wzorcowe})}{C_{x(\text{met.}_\text{ladu})}}$$

gdzie C_{xw} - wartość wzorcowa odczytana z wykresu $C_x(Re)$

Re należy obliczyć następująco:

$$Re = \frac{V d}{\nu}, \quad V = \sqrt{\frac{2q}{\rho}}, \quad \rho = \frac{p_\infty}{R(273 + t)}$$

- Nasunąć na walec tulejkę z papieru ściernego o znanej ziarnistości i dokonać ponownych pomiarów rozkładu ciśnienia dynamicznego w śladzie za profilem (w tym samym miejscu i dla tego samego zakresu y jak przy kalibracji).
- Obliczyć współczynnik oporu walca szorstkiego z uwzględnieniem uprzednio wyznaczonego współczynnika kalibracji.
- Powtórzyć pomiary i obliczenia dla innych liczb Re .
- Nanieść otrzymane wyniki na wykres $C_x(Re)$ i podać uzasadnienie fizyczne obserwowanych zmian C_x .

Część B

- Sprawdzić położenie otworka pomiarowego. przy pracującym tunelu ustawić otworek w położeniu $\theta = \pm 10^\circ$. Jeśli manometr wskazuje to samo ciśnienie w obu położeniach walca, wzajemne położenie wskazówki i otworka jest prawidłowe. W przeciwnym razie należy odpowiednio skorygować położenie wskazówki.

2. Zmierzyć różnicę ciśnień Δp_i między ciśnieniem na powierzchni walca gładkiego a ciśnieniem atmosferycznym odpowiadające różnym położeniom θ_i otworka pomiarowego dla tych samych wartości q co w części A.

Uwaga. Przy $\theta_i \approx 30^\circ$ następuje zmiana znaku wielkości Δp_i , wskazywanej przez manometr. Jeśli do pomiarów używany jest manometr cieczowy to w chwili zmiany znaku Δp_i należy zmienić podłączenie manometru.

3. Wykonać wykres $p_i - p_\infty = \Delta p_i - \Delta p_\infty = f(\theta_i)$ odkładając wyznaczone wartości prostopadle od okręgu reprezentującego powierzchnię modelu.

4. Obliczyć C_{xc} wg wzoru

$$C_{xc} = \frac{\pi}{36q_\infty} \sum_{i=1}^{36} \frac{\Delta p_i \cos \Theta_i + \Delta p_{i+1} \cos \Theta_{i+1}}{2}$$

Należy zwrócić uwagę, że w celu obliczenia C_{xc} można posłużyć się tylko wartościami Δp_i (tj. wartościami mierzonymi bezpośrednio manometrem) gdyż:

$$\oint p_i = \oint (p_a + \Delta p_i) = \oint \Delta p_i.$$

5. Oszacować udział oporu tarcia w oporze profilowym walca kołowego poprzez porównanie wyników doświadczenia z wartościami z rys. 2.

$$C_{xt} = C_{xw} - C_{xc}.$$