

OPŁYW WALCA KOŁOWEGO

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne określenie rozkładu ciśnienia na powierzchni walca kołowego oraz obliczenie jego współczynnika oporu.

Wyznaczenie rozkładu ciśnienia na powierzchni walca to jedna z metod określenia współczynnika c_x .

2. Wiadomości podstawowe

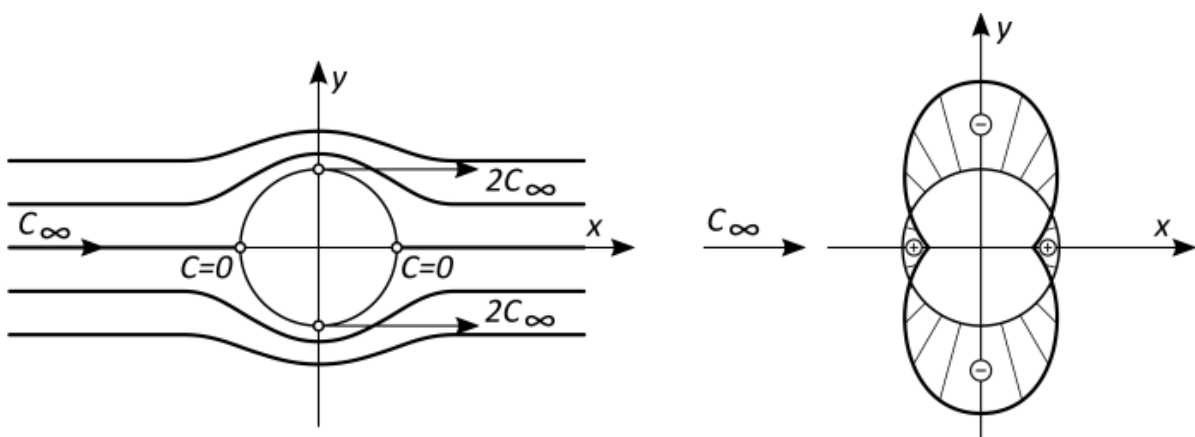
Optyw walca jest zagadnieniem, z którym często spotykamy się w praktyce. Odnosi się to na przykład do optywu wiatrem kominów przemysłowych, przewodów energetycznych, przęseł mostulub wszelkiego rodzaju słupów, podpór i masztów, rurowych wymienników ciepła itp. Oprócz tego, ze względu na bogactwo zjawisk jakie towarzyszą optywowi walca i problemy z tym związane, znajdująonezastosowanie w lotnictwie, w przemyśle samochodowym oraz wszędzie tam gdzie mamy do czynienia z optywem ciał stałych przez płyn.

Optyw walca kołowego można rozpatrywać jako optyw przy pomocy płynu doskonałego lub rzeczywistego. Zależności opisujące optyw walca płynem doskonałym (nielepkiem) są wyprowadzone na drodze analitycznej w oparciu o zasady kinematyki płynu doskonałego. W przypadku optywu płynem rzeczywistym bardzo często posługujemy się wizualizacją optywu przy pomocy dymu (w tunelach aerodynamicznych) lub wody.

3. Optyw walca kołowego płynem doskonałym.

a) Przepływ potencjalny / niewirowy /.

Charakterystyczną cechą przepływu niewirowego jest to, że elementy płynu doznają tylko przesunięć i odkształceń, a nie wykonują obrotów. **Przepływ potencjalny (niewirowy) możebyć zrealizowany tylko przy pomocy płynu nielepkiego.**

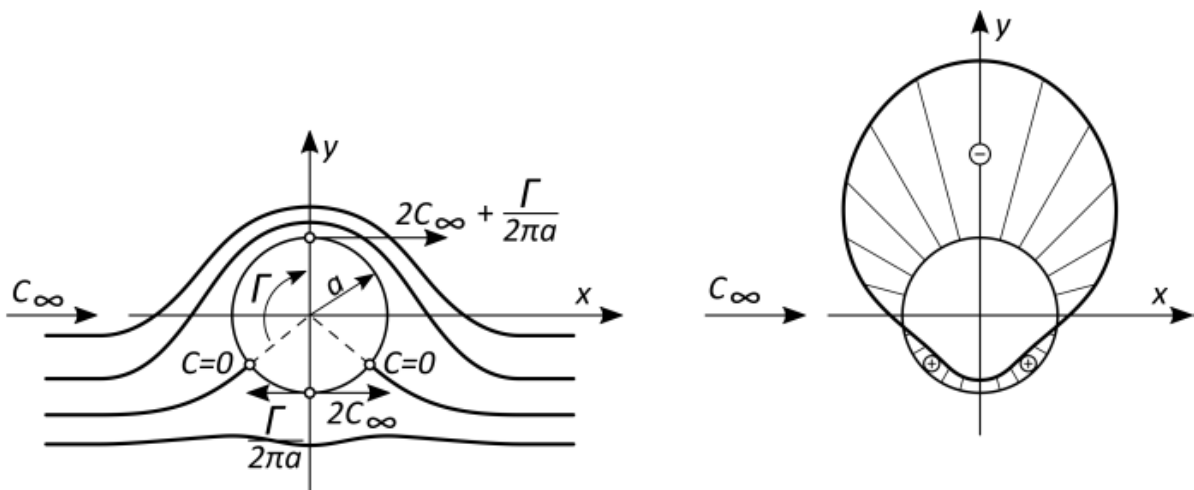


Rys.1. Rozkład prędkości i ciśnienia przy optywie bezcyrkulacyjnym profilu kołowego

Jak widać z rys.1. bezcyrkulacyjny opływ walca kołowego płynem idealnym wykazuje symetrię względem obu osi układu współrzędnych. Zawiera dwa punkty stagnacji i dwa punkty maksymalnej depresji. A zatem wypadkowa sił ciśnieniowych musi być równa zero. Składową P_x reakcji płynu równoległą do kierunku wektora prędkości w obszarze niezakłóconym c_∞ nazywa się oporem, natomiast składową P_y prostopadłą do kierunku przepływu niezakłóconego – siłą nośną. Z faktu, że na skutek pełnej symetrii zarówno $P_x = 0$ jak i $P_y = 0$ wynika potwierdzenie tzw. paradoksu d'Alamberta głoszącego, że przy ruchu ciał w płynie doskonałym nie powstają żadne siły. Wynik ten jest w sposób oczywisty sprzeczny z doświadczeniem, co oznacza, że lepkość zmienia obraz przepływu a w praktyce rozkład ciśnienia dla takiego przypadku nie istnieje.

b) Przepływ cyrkulacyjny

Aby na gruncie kinematyki płynu doskonałego objaśnić powstanie siły nośnej $P_y \perp c_\infty$, należy do rozważań wprowadzić wir płaski kołowy o cyrkulacji Γ . Wówczas ma miejsce cyrkulacyjny opływ walca kołowego.



Rys.2. Rozkład prędkości i ciśnienia na profilu kołowym przy opływie cyrkulacyjnym

W tym wypadku symetria przepływu względem osi x zostaje zakłócona przez wprowadzenie wiru, natomiast względem osi y rozkład prędkości i ciśnienia jest symetryczny.

Asymetryczny względem osi x rozkład prędkości pociąga za sobą asymetryczny rozkład ciśnienia. Powstaje więc wypadkowa sił ciśnieniowych prostopadła do kierunku przepływu równoległego, czyli tzw. siła nośna.

4. Opływ walca kołowego płynem rzeczywistym

a) Warstwa przyścienna oraz jej oderwanie

Dla brył o kształcie nieopływowym (duże c_x a małe c_y) siły styczne nie wpływają znacząco na wartość oporu. Można przyjąć, że siła oporu czołowego dla takich brył zależy przede wszystkim od rozkładu ciśnień na powierzchni bryły.

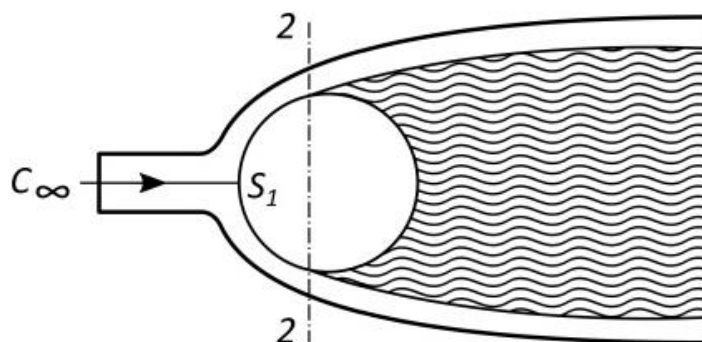
Rozkład ciśnień na powierzchni bryły jest ściśle związany ze zjawiskiem oderwania warstwy przyściennej i rodzajem przepływu w tej warstwie. Warstwa przyścienna rys.3. (PW) tworzy się w pobliżu powierzchni bryły w wyniku działania adhezji i sił lepkości powietrza. Jest to cienka warstwa płynu w bezpośredniej bliskości powierzchni ciała stałego, w której występuje gradient prędkości w kierunku normalnym do tej powierzchni.

W warstwie tej, o bardzo małej grubości, prędkość przepływu względnego zmienia się wraz z odległością od powierzchni bryły. Poza warstwą przyścienną prędkość opływu w kierunku normalnym do powierzchni bryły pozostaje prawie niezmienna, natomiast ulega ona zmianom wzdłuż przepływu w pobliżu powierzchni bryły.

Dla konkretnej bryły, o określonym kształcie i wymiarach, rodzaj przepływu w warstwie przyściennej zależy przede wszystkim od prędkości względnej płynu poza warstwą przyścienną.

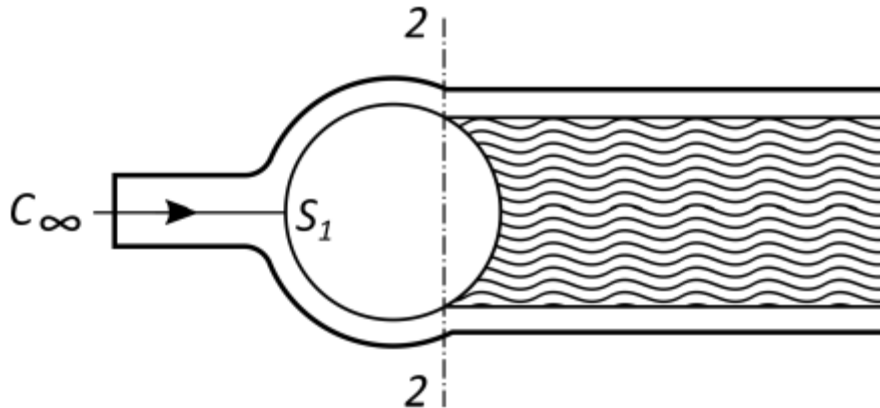
Na skutek działania sił stycznych oraz przyrostu ciśnienia wzdłuż przepływu, ruch elementów powietrza w warstwie przyściennej może zostać wyhamowany, a nawet może się zmienić zwrot wektora prędkości. Wówczas następuje oderwanie warstwy przyściennej, tworząc za bryłą obszar zawirowany (zastoju), w którym ciśnienie jest niższe niż w obszarze niezakłóconym. Zależnie od rodzaju przepływu w warstwie przyściennej, oderwanie jej następuje bliżej lub dalej od czoła bryły.

Przy małych prędkościach opływu powstaje laminarna warstwa przyścienna. Oderwanie jej zachodzi bliżej czoła bryły rys.3 w porównaniu z oderwaniem turbulენტnej warstwy przyściennej rys.4, kiedy tworzy się szeroki obszar zawirowany (o niższym ciśnieniu).



Rys.3. Szeroki obszar zawirowany.

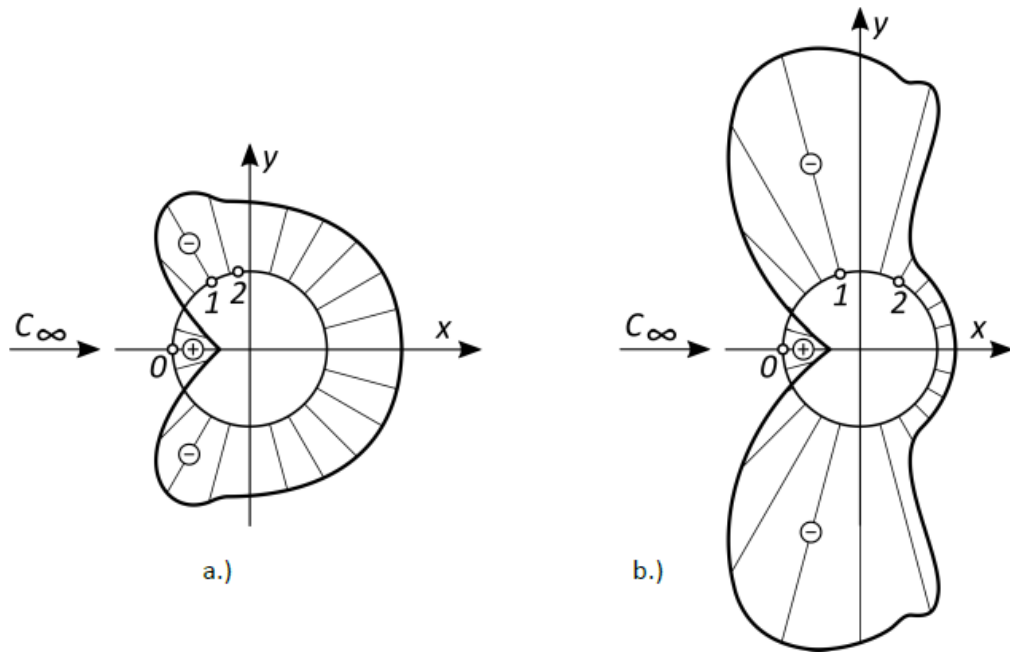
Wzrost prędkości opływu może spowodować przejście warstwy laminarnej w turbulentną, która odrywa się dalej, ponieważ jej wyhamowanie jest trudniejsze. Energia kinetyczna ruchu elementów tej warstwy jest uzupełniana przez powietrze poruszające się względem bryły poza warstwą przyścienną. Dla ruchu turbulentnego cała warstwa przyścienna wymienia elementy o mniejszej energii kinetycznej na elementy o większej energii przenikające spoza obszaru tej warstwy a przez to nie dopuszczają one do tak szybkiego zmniejszenia energii kinetycznej elementów przyściennych jak w przypadku warstwy laminarnej. W rezultacie tworzy się węższy obszar zawirowany.



Rys.4. Wąski obszar zawirowany.

Miejsce oderwania warstwy przyściennej decyduje o rozkładzie ciśnień na powierzchni bryły. Porównanie rozkładów ciśnień dla laminarnej i turbulentnej warstwy przyściennej pozwala stwierdzić, że korzystniejszy jest rozkład ciśnień towarzyszący oderwaniu warstwy turbulentnej.

W przypadku oderwania laminarnej warstwy przyściennej występuje szeroki obszar zawirowany i silne oddziaływanie podciśnienia na tylną część bryły. W przypadku oderwania turbulentnej warstwy przyściennej obszar zawirowany jest węższy i oddziaływanie podciśnienia słabsze.



Rys.5. Rozkład ciśnień na profilu kołowym.

Na rys. 5. Pokazano dwojaki sposób oderwania warstwy przyściennej (pkt.2), który jak już wspomniano wcześniej, zależy jest od wartości liczby Reynoldsa. Na rys. 6a od punktu zerowego zwanego punktem stagnacji (maksymalne nadciśnienie) do punktu 1, zwanego punktem oderwania (maksymalne podciśnienie) występuje ujemny gradient ciśnienia. Gradientem ciśnienia nazywamy zmianę ciśnienia w kierunku przepływu: ujemny gradient ciśnienia oznacza, że wzdłuż drogi przepływu ciśnienie maleje. Od punktu 1 gradient ciśnienia jest dodatni, czyli wzrasta ciśnienie, oczywiście kosztem zmniejszenia energii kinetycznej w warstwie przyściennej, czemu towarzyszy oderwanie się strugi. Przesunięcie kątowe punktu 1 względem punktu 0 wynosi dla małych liczb Reynoldsa (przepływ laminarny) ok. $70^{\circ} - 85^{\circ}$. Dla płynu doskonałego punkt 1 jest przesunięty względem punktu 0 dokładnie o 90° , bo wówczas nie występują siły lepkości.

Jeżeli przepływ odbywa się w zakresie większych liczb Re , czyli przy większym udziale sił bezwładności, warstwa przyścienne jest już turbulenta i energia kinetyczna wyczerpuje się na dłuższej drodze, co przy dodatnim gradiencie ciśnienia, zmiany na opływanej powierzchni zachodzą na znacznie dłuższej drodze a oderwanie ma miejsce w punkcie 2 dla kąta nawet 140° . Rys.6b.

Przepływ przy małych Re (przy laminarnej warstwie przyściennej), a więc przy większym udziale sił lepkości w stosunku do sił bezwładności charakteryzuje szerszy obszar zaburzeń i większy współczynnik oporu.

Aby współczynnik oporu był mniejszy, przepływ w warstwie przyściennej powinien być zatem turbulentny. Dla małych liczb Re można go zrealizować w ten sposób, że sztucznie

zaburza się przepływ w bezpośredniej bliskości powierzchni za pomocą uczynienia szorstką przedniej części walca lub umieszczenia drucików zakłócających.

Uzyskuje się w ten sposób paradoksalny pozornie efekt, że takie „zakłócenie” powierzchni opływanej zmniejszyć może współczynnik oporu.

5. Współczynnik oporu c_x

W przypadku ciał mających oś lub płaszczyznę symetrii równoległą do kierunku przepływu (jak np. walec kołowy) nie występuje siła nośna, ma miejsce jedynie opór. Opór ten nazywany profilowym to inaczej siłą oporu ciała P_x , którą można określić mierząc reakcję wywieraną przez płyn na opływane ciało. Wartość jej określa wzór :

$$P_x = c_x \rho \frac{c^2}{2} S$$

gdzie:

c_x – współczynnik oporu

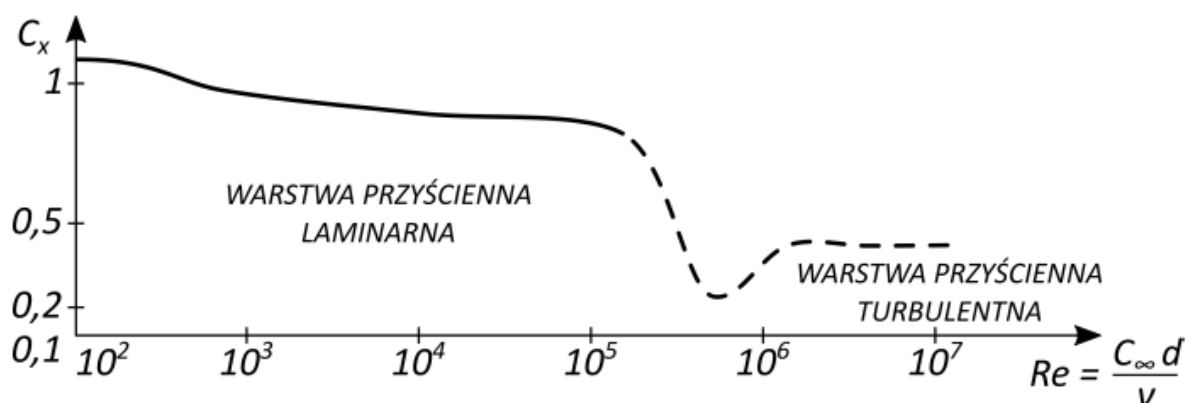
S – powierzchnia odniesieni

jt. rzut pow. walca na płaszczyznę do kierunku przepływu

$\rho \frac{c^2}{2}$ – ciśnienie prędkości p_d w strunieniu niezakłóconym

Wielkość współczynnika oporu c_x zależy od kształtu ciała, chropowatości powierzchni oraz od liczby Reynoldsa.

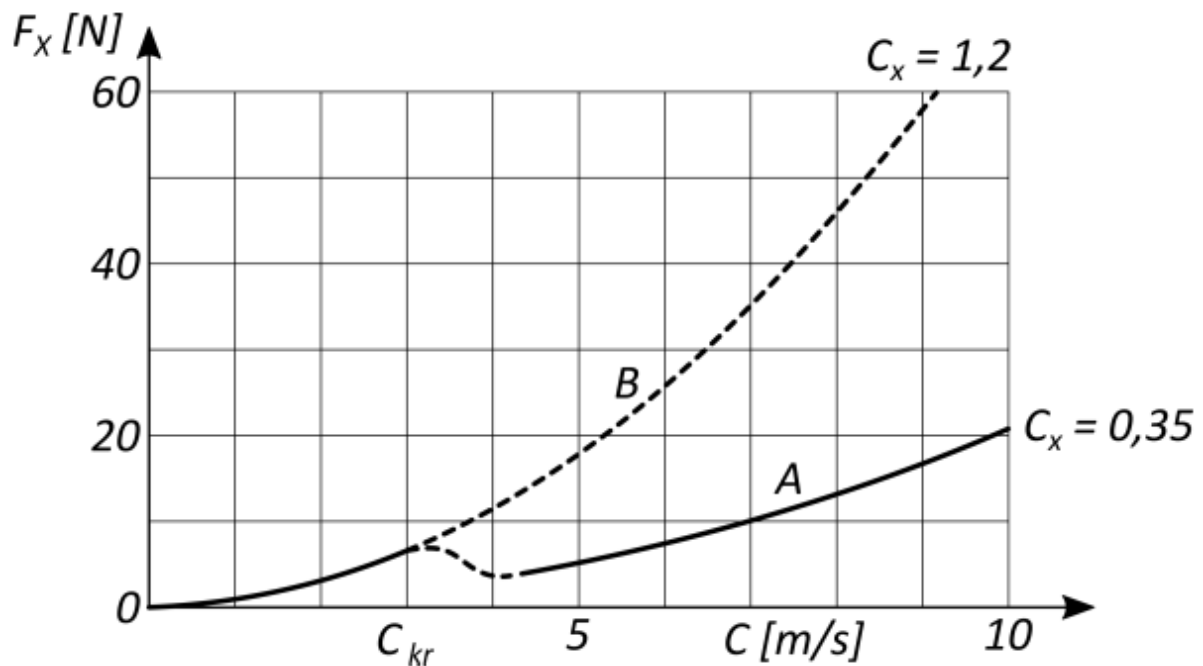
Przykładowo dla nieskończenie długiego walca kołowego, wartości współczynnika oporu kształtują się jak na rys.6 (inst. Rys.4 ew. Internet)



Rys.6. Współczynnik oporu walca w funkcji liczby Reynoldsa

Dla walca kołowego wartość krytycznej liczby Reynoldsa, przy której ruch w warstwie przyściennej przechodzi z laminarnej w burzliwej (turbulentnej) wynosi ok. $Re_{kr} = 2 \cdot 10^5$.

Opory walca (np. siła wiatru) w zakresie prędkości nadkrytycznych są blisko trzykrotnie mniejsze niż w przypadku konstrukcji o stałej wartości współczynnika oporu.

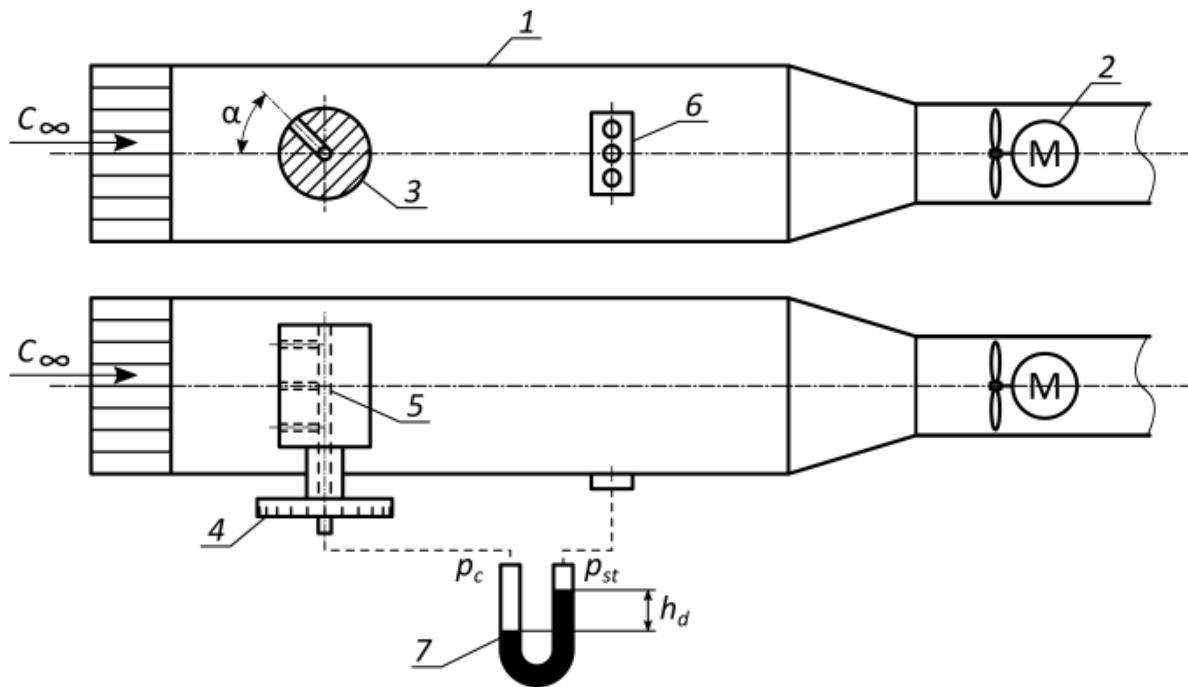


Rys.7. Siła oporu w funkcji prędkości wiatru dla słupa ($d = 1m, l = 1m$)

Na wartość siły oporu oprócz wymienionych wcześniej wielkości ma również wpływ chropowatość powierzchni, zależność tą przedstawia rysunek 7.

Z wszystkich powyższych przykładów wynika, że wartość współczynnika c_x nie maleje wraz z coraz gładszą powierzchnią a siła oporu nie rośnie stale ze wzrostem prędkości ośrodka. Wpływ ma na to rodzaj opływu, nad czy podkrytyczny jak również wiry Karmana. W życiu codziennym bardzo często spotykamy się z obiektami opływanyymi przez wiatr i wodę, podczas których może występować oderwanie lub siły powodujące drgania. Dlatego fakty te należy mieć na uwadze podczas ich projektowania.

6. Stanowisko pomiarowe



Rys. 8. Schemat stanowiska pomiarowego

1. – komora pomiarowa
2. - wentylator
3. – walec kołowy
4. – kątomierz
5. – króciec pomiaru uśrednienia ciśnienia całkowitego
6. –króciec pomiaru uśrednionego
7. – mikromanometr z rurką pochyłą

Kątomierz umożliwia pomiar położenia walca w stosunku do kierunku napływu powietrza w zakresie kątów $0^\circ - 360^\circ$.

7. Metodyka badań

Po uruchomieniu wentylatora wymuszającego przepływ należy pomierzyć rozkład ciśnień na walcu obracając nim zgodnie z najmniejszą wartością podziałki w zakresie od 0° do 360° . Zmierzone wartości służą do obliczenia współczynnika oporu c_x walca oraz wizualizacji rozkładu ciśnień na jego powierzchni. Po przebadaniu walca gładkiego, należy go owinąć papierem ściernym a następnie siatką drucianą o wymiarze oczka $1 \times 1 \text{ mm}$ i powtórzyć pomiary a następnie porównać wartości wyliczonych współczynników c_x .

8. Metodyka obliczeń

Jednostkowy opór walca można obliczyć wg. następującego wzoru:

$$P_{x \text{ jedn}} = \int_0^{2\pi} p \cdot r \cos \alpha \, d\alpha$$

Gdzie: p – nadciśnienie w punkcie walca określonym kątem α

Całkowity opór walca

$$P_x = P_{x \text{ jedn}} \cdot L$$

L – długość walca

Z drugiej strony

$$P_x = c_x \rho \frac{c_\infty^2}{2} F = c_x \rho \frac{c_\infty^2}{2} L \cdot d$$

A zatem

$$c_\infty \rho \frac{c_\infty^2}{2} L \cdot d = P_{x \text{ jedn}} \cdot L$$

Czyli

$$c_x = \frac{P_{x \text{ jedn}}}{\rho \frac{c_\infty^2}{2} d} = \frac{P_{x \text{ jedn}}}{P_{d\infty} \cdot d}$$

Postępując się metodą trapezową wyznaczania całek otrzymuje się

$$\int_0^{2\pi} p \cdot r \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = \Delta \alpha \cdot r \sum_{i=1}^{36} p_i \cdot \cos \alpha_i$$

Ostatecznie

$$c_x = \frac{\Delta \alpha \sum_{i=1}^{36} p_i \cdot \cos \alpha_i}{2p_{d\infty}}$$

Gdzie

$$\Delta \alpha = \frac{10^0}{360^0} 2\pi = \frac{1}{36} 2\pi - \text{krok pomiaru kąta} = 0,1744[\text{rad}]$$

$p_i = \rho_m \cdot g \cdot l_i \sin \beta$ – ciśnienie w określonym punkcie pomiarowym

ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej

l_i – długość słupa cieczy manometrycznej i – tego pomiaru

β – pochylenie manometru

$p_{d\infty}$ – wyznacza się dla $\alpha = 0^\circ$

ρ – gęstość powietrza wilgotnego

$$\rho = \rho_n \frac{(p - \varphi p'') T_n}{p_n T} + \varphi \rho''$$

9. Sprawozdanie winno zawierać:

Schemat stanowiska

Tabelę pomiarowo – obliczeniową

Wykres rozkładu ciśnień dla:

- walca gładkiego
- walca owiniętego papierem ściernym
- walca owiniętego siatką

Literatura

1. Instrukcja – Określenie współczynnika oporu ciała o kształcie opływowym
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych AGH.
2. Bukowski J.
Kijkowski P.- Kurs mechaniki płynów. PWN Warszawa 1980
3. Walczak J. - Inżynierska Mechanika płynów. Wydawnictwo Politechniki
Poznańskiej, Poznań 2006.
4. Drobnia S. – Laboratorium mechaniki płynów. Wydawnictwo Politechniki
Częstochowskiej. Częstochowa 1997.