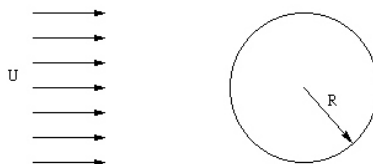


OPŁYW WALCA. WSPÓŁCZYNNIK SIŁY OPORU.

1. WPROWADZENIE.

Opływ walca prostopadłym do jego osi, strumieniem płynu jest zagadnieniem często spotykanym w praktyce (rys.1).

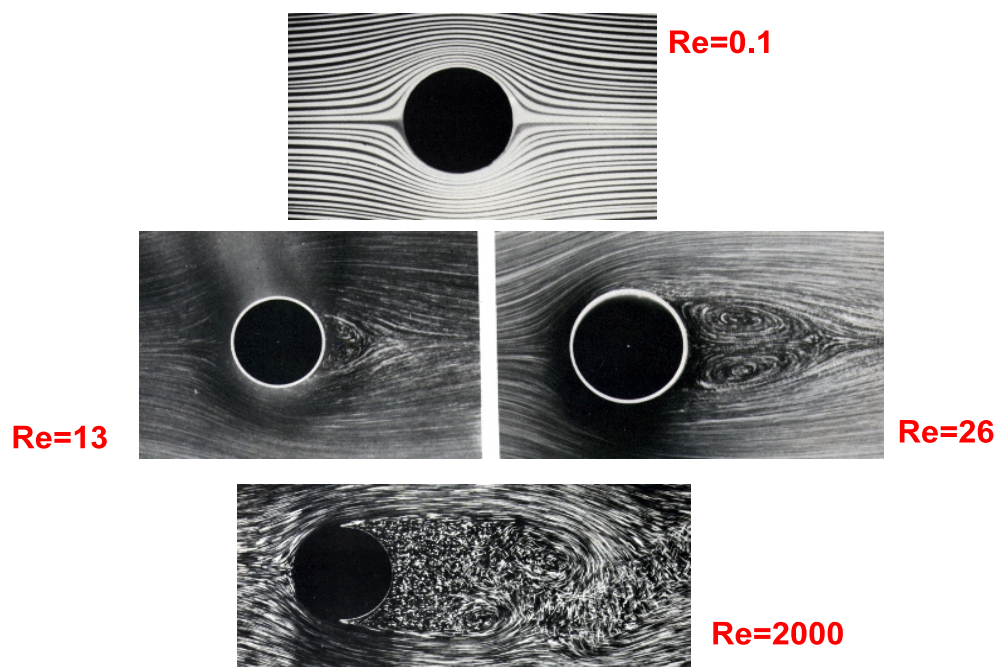


Rys. 1. Schemat opływu walca

Odnosi się to na przykład do rurowych wymienników ciepła, opływu wiatrem zewnętrznych konstrukcji (przęseł mostu, przewodów energetycznych itp.). Oprócz tego, ze względu na stosunkowo prostą geometrię i bogactwo zjawisk jakie towarzyszy opływowi walca zagadnienie ma pierwszorzędne znaczenie w badaniach teoretycznych. Ma fundamentalne znaczenie w badaniach nad zjawiskami siły oporu, oderwaniem warstwy przyściennej, formowaniem się śladu aero-hydrodynamicznego. Problemy te znajdują niezwykle ważne zastosowania w lotnictwie, w przemyśle samochodowym i wszędzie tam, gdzie stykamy się z opływem płynu ciał stałych.

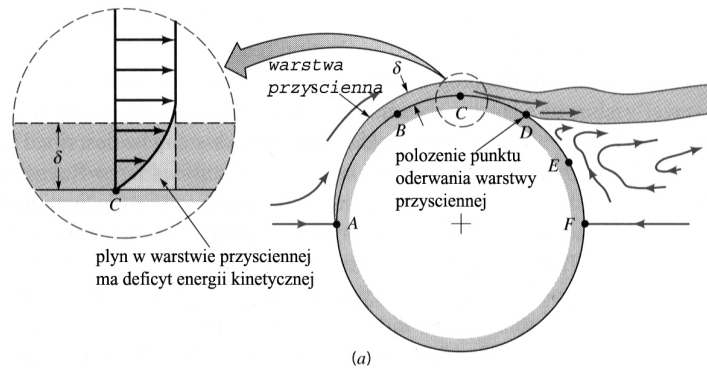
Wymiarem charakterystycznym zagadnienia opływu walca przedstawionego na rys.1 jest średnica walca $D=2R$. Liczbę Reynoldsa określa się jako $Re=U \cdot D/v$ gdzie U jest prędkością strumienia niezaburzonego (prędkość cieczy w nieskończoności), lepkością kinematyczną $v=\mu/\rho$ (μ - lepkość dynamiczna, kg/m s , ρ - gęstość płynu, kg/m^3).

Przepływ poprzeczny wokół cylindra wywołuje wokół cylindra złożone obrazy przepływu (rys. 2).



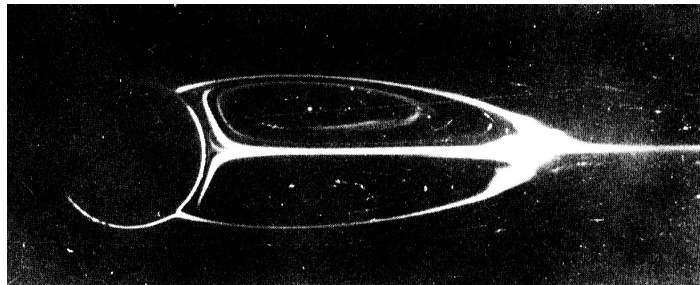
Rys. 2 Opływ walca - obrazy linii prądu wokół walca dla różnych liczb Reynoldsa. Wizualizacja za pomocą proszku aluminiowego. Dla $Re=0.1$ - przepływ pełzający. Dla $Re=13$ i $Re=26$ tworzenie się "pęcherzy wirowych" -stacjonarnych obszarów recyrkulacji płynu, których wielkość zwiększa się wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa; $Re=2000$ - turbulenty ślad (cień) aerodynamiczny z wyraźnie widoczną ścieżką wirową

Dla bardzo małych liczb Reynoldsa ($Re \leq 1$) linie prądu “obejmują” ścianki cylindra. Przepływ jest symetryczny (zarówno względem osi x wzdłuż przepływu jak i względem pionowej osi y). Linie prądu naśladują krzywiznę cylindra. O przepływach z tak małą liczbą Reynoldsa mówi się, że są to przepływy pełzające. Cechą charakterystyczną przepływów pełzających jest to, że obserwując obraz linii prądu trudno jest rozstrzygnąć w którym kierunku następuje przepływ (z lewej strony na prawą czy odwrotnie). Wpływ obecności cylindra w obszarze przepływu jest znaczny (linie prądu zakrzywiają się na znacznej odległości od cylindra). Dla większych liczb Reynoldsa płyn przylega do cylindra tylko w przedniej części. Cząstki cieczy nie nadążają za zmianami krzywizny walca. Powstaje zjawisko oderwania warstwy przysiennej ($Re \approx 10$).



Rys. 3 Zjawisko oderwania warstwy przysiennej

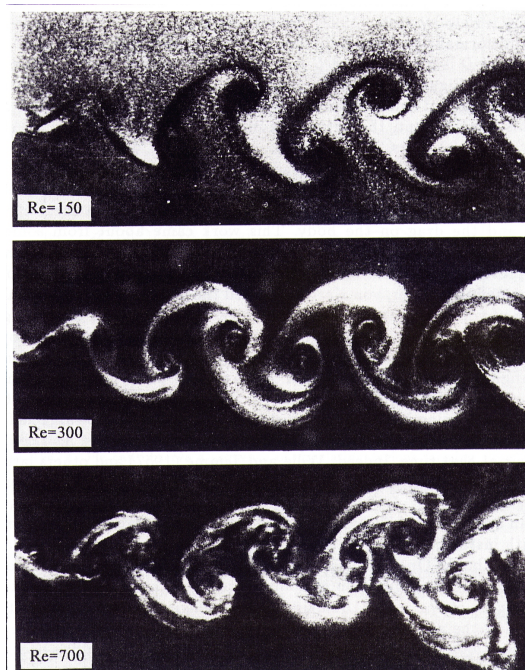
Za walcem tworzą się “pęcherze wirowe” (strefy recyrkulacji). Cząstki znajdujące się tuż przy powierzchni w czasie ruchu z przodu walca nie trafiają na jego tył z powodu występowania stref recyrkulacji. Płyn w obszarze za walcem tworzy stacjonarne “stacjonarne pęcherze wirowe”. Strefa recyrkulacji powiększa się wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa. (Rys.4).



Rys.4 Strefa recyrkulacji za walcem, $Re=41$. Wizualizacji dokonano skondensowanym mlekiem, którym pokruto powierzchnię walca.

Dla $Re > 49$ strefa recyrkulacji staje się niestabilna i porcje wirowości odrywają się od powierzchni walca tworząc ścieżkę wirów zwaną ścieżką Karmana (rys.5). Jest ona bardzo regularna. Częstotliwość f odrywających się wirów w sposób jednoznaczny zależy od prędkości U . Częstotliwość tą zwykle charakteryzuje się bezwymiarową liczbą $St=f \cdot d/U$, nazywaną liczbą Strouhala. Zjawisko to wykorzystywane jest niekiedy w konstrukcji przyrządów do pomiaru natężenia przepływu (elektroniczne wykrywane jest pojawianie się struktur wirowych i ich częstotliwość). Naprzemienne zrywanie się wirów przeciwnych cyrkulacjach z powierzchni walca, powoduje duże fluktuacje ciśnienia w kierunku prostopadłym do przepływu i w praktyce może powodować wibracje konstrukcji, hałas akustyczny, zjawiska rezonansu, co może nawet doprowadzić w efekcie do zniszczenia konstrukcji.

Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa następuje przejście z ruchu laminarnego w turbulentny. Dla liczb Reynoldsa $Re > 200$ za walcem tworzy się turbulentny ślad (cień) hydrodynamiczny. Nazwa



Rys.5. Ścieżka Karmana. “Pęcherze wirowe” o naprzemiennej cyrkulacji odrywają się od walca. Wizualizacji dokonano przy pomocy proszku aluminiowego. Białe obszary wskazują na wyższą wirowość oraz obecność turbulencji.

turbulentny oznacza, że w obszarze przepływu za walcem istnieją bardzo nieregularne, szybkie zmiany fluktuacji prędkości. Turbulencja jest ograniczona do obszaru za walcem nazywanego “śladem aerodynamicznym”.

Dla liczb Reynoldsa rzędu $Re=5 \cdot 10^5$ warstwa przyścienne występująca na powierzchni walca zaczyna być turbulentna. Powoduje to zawężenie śladu aerodynamicznego. Punkt oderwania warstwy przyściennej przesuwa się zdecydowanie na tylną część walca. Siła oporu hydrodynamicznego maleje prawie 4-krotnie. Zjawisko to nazywamy *kryzysem oporu hydrodynamicznego*.

2. SIŁA OPORU

Ważną wielkością wiążącą się z ruchem płynu wokół zanurzonego ciała jest siła wywierana przez płyn na ciało. Wiadomo, że jeżeli chcemy przemieścić ciało zanurzone w cieczy ze stałą prędkością musimy przyłożyć siłę. Przeszkoda umieszczona w przepływającym płynie będzie unoszona przez płyn jeżeli nie przyłożymy do ciała odpowiedniej siły. Siłę wywieraną przez płyn na ciało nazywamy siłą oporu. Z eksperymentu wiadomo, że siła oporu jest funkcją $F_D=f(U,D,\rho,v)$. Korzystając z analizy wymiarowej można pokazać, że wzór strukturalny powinien mieć postać: $F_D=\varphi(Re)U^2\rho D^2$. Tradycyjnie wzór na siłę oporu przedstawia się jako:

$$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A \quad (1)$$

gdzie C_D jest współczynnik siły oporu, A - jest przekrojem frontalny opływającego obiektu. Siłę oporu można podzielić na siłę pochodzącą od lepkości cieczy tzw. siłę tarcia F_f :

$$F_f = \int_A \tau_s \sin\theta dA \quad \tau_s = \mu \left. \frac{du_s}{dn} \right|_{\text{ściana}} \quad (2)$$

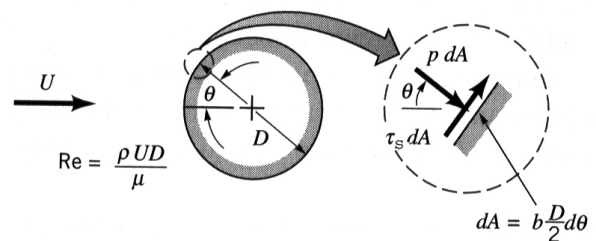
gdzie indeks s oznacza prędkość w kierunku równoległym (stycznym) do ściany a pochodna $d()/dn$ oznacza zmianę prędkości w kierunku prostopadłym (normalnym) do ściany oraz siłę pochodzącą od rozkładu ciśnienia:

$$F_p = \int_A p \cos\theta dA = \frac{1}{2} \rho U^2 \int_A C_p \cos\theta dA \quad (3)$$

gdzie C_p oznacza tak zwany współczynnik ciśnienia

$$C_p = (p - p_b) / \frac{1}{2} \rho U^2, \quad p_b \text{ jest ciśnieniem}$$

odniesienia np. ciśnieniem barometrycznym. Mnożenie przez funkcję \cos i \sin we wzorach (2) i (3) wynika z tego, że należy wyznaczyć wartość siły działającej w kierunku osi x czyli zrzutować $p dA$ oraz $\tau_s dA$ na kierunek osi x . Ciśnienie jest prostopadłe do walca, natomiast τ_s jest styczne (rysunek obok).



Współczynnik oporu można przedstawić więc jako sumę:

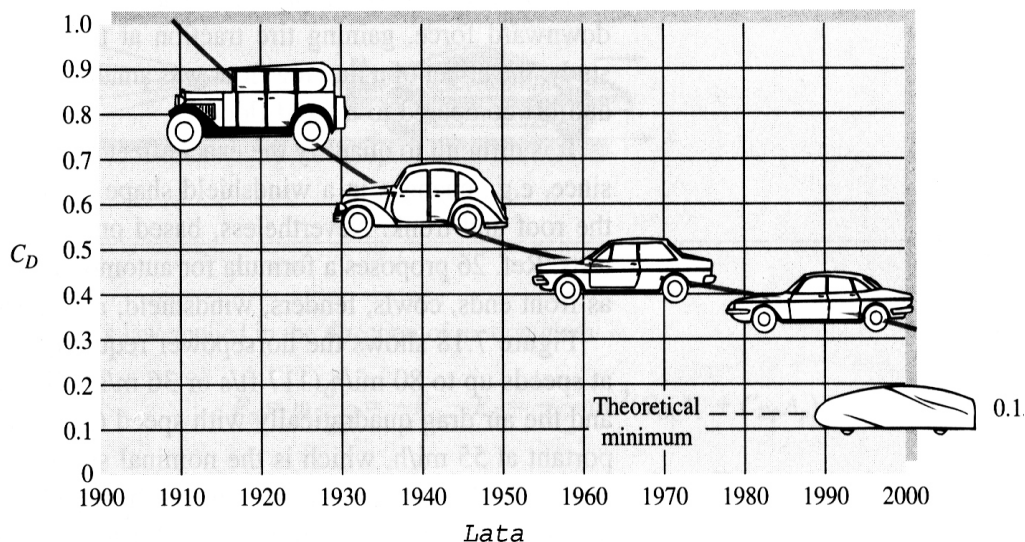
$$C_D = \frac{F_f}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} + \frac{F_p}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} = C_{D_f} + C_{D_p} \quad (5)$$

Opierając się na teorii warstwy przyściennej i badaniach doświadczalnych dotyczących położenia punktu oderwania warstwy przyściennej można obliczyć, że współczynnik oporu ciśnieniowego dla walca wynosi $C_{D_p} = 1.17$, natomiast współczynnik oporu tarcia wynosi $C_{D_f} = 5.93 / (Re)^{1/2}$. Tak więc całkowity współczynnik oporu można przybliżyć wzorem:

$$C_D = C_{D_f} + C_{D_p} = \frac{5.93}{\sqrt{Re}} + 1.17 \quad (6)$$

Siła pochodząca od rozkładu ciśnienia nazywana bywa *oporem kształtu*. Dla płaskiej płytki ustawionej równolegle do przepływu (ciało smukłe bardzo dobrze opływane) opór pochodzi wyłącznie od naprężeń stycznych na ścianie. Dla ciał źle opływanych, o których mówi się, że są to *ciała tępe*, o sile oporu decyduje rozkład ciśnienia. Dla tej samej płytki ustawionej prostopadle do przepływu opór od naprężeń stycznych jest prawie równy zero (dlaczego?) i zależy wyłącznie od rozkładu ciśnień przed i za płytką. Tworzenie się śladu aerodynamicznego za opływającym ciałem powoduje siłę oporu pochodzącą głównie od ciśnienia. Wpływając na szerokość śladu aerodynamicznego możemy wpływać

na wielkość siły oporu. Konstruktorzy pojazdów starają się tak zamodelować sylwetkę samochodu aby szerokość śladu aerodynamicznego, a w efekcie współczynnik oporu, była jak najmniejsza. (rys. 6)



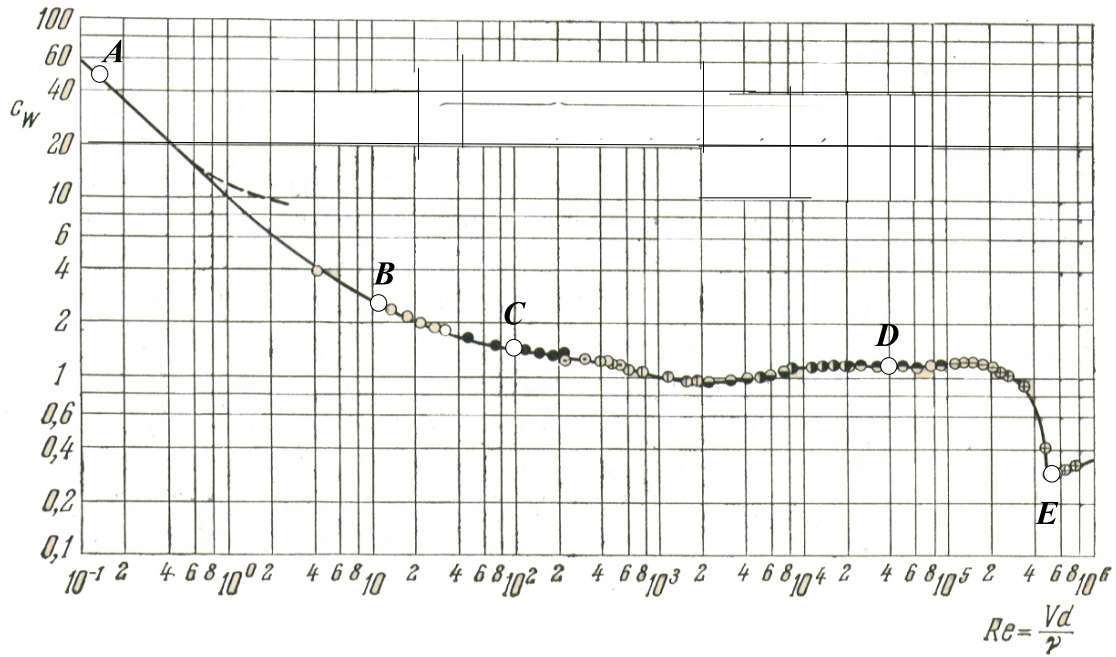
Rys.6 Wartości współczynnika C_D w zależności od sylwetki samochodu.

Posługując się wzorem (6) można oszacować udział siły tarcia w stosunku do całkowitej siły oporu:

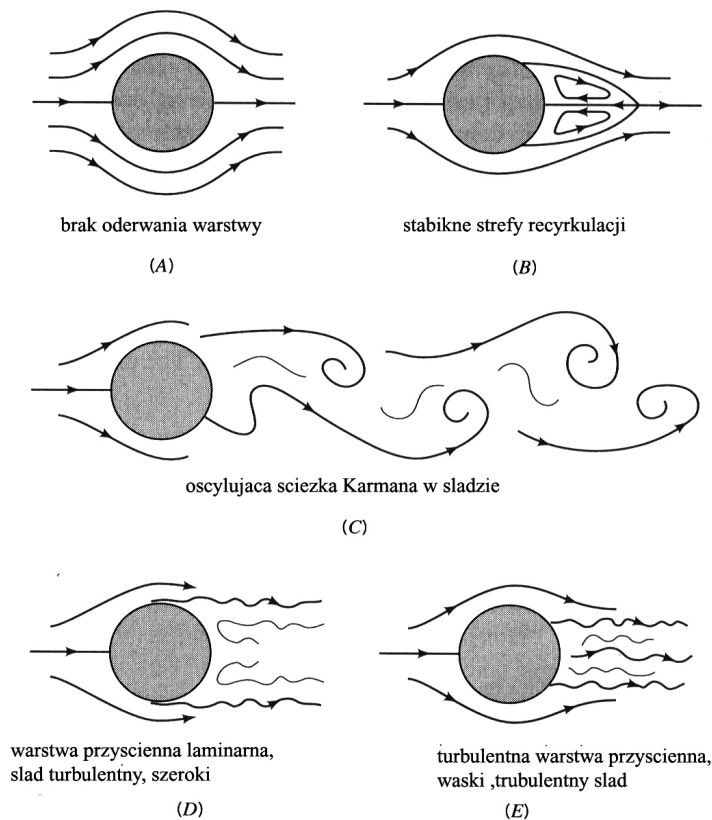
$$\frac{F_{Df}}{F_D} = \frac{C_{Df}}{C_D} = \frac{\frac{5.93}{\sqrt{Re}}}{\frac{5.93}{\sqrt{Re}} + 1.17} = \frac{1}{1 + 0.197 \sqrt{Re}} \quad (7)$$

Dla $Re=10^3$ wartość wyrażenia wynosi 0.138 , a dla $Re=10^5$ już tylko 0.0158 . Całkowita siła oporu pochodzi więc głównie od rozkładu ciśnienia. Jest to wynikiem zjawiska oderwania się warstwy przyściennej. Walec zaliczany jest do ciał tępych.

Na rys. 7 przedstawiono wykres współczynnika oporu dla walca w zależności od liczby Reynoldsa. Literami (A-E) zaznaczono punkty, które odpowiadają zaprezentowane schematycznie obrazy przepływów na rys. 8.



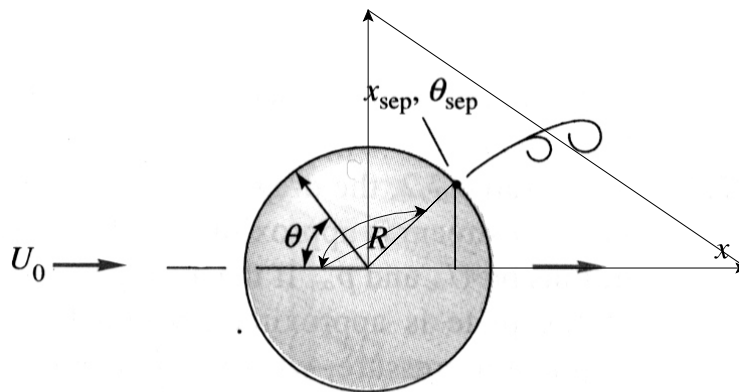
Rys.7 Wykres zmian współczynnika oporu dla walca w zależności od liczby Reynoldsa.



Rys. 8. Schematyczne obrazy przepływów dla różnych liczb Reynoldsa. Litery pod rysunkami korespondują z literami na wykresie 7.

3. Program ćwiczenia.

1. Dokonać obliczeń pola przepływu dla walca dla następujących liczb Reynoldsa: $Re=10$, i $Re=40$. Wyznaczyć długość “pęcherzyka wirowego” za opływającym walcem oraz odczytać wartość współczynnika oporu. Porównać otrzymane wyniki z wykresem na rys. 6. Obliczyć współczynnik według wzoru (6). Obserwując wykres X-wall shear distribution - składowa x-owa rozkładu naprężeń stycznych na ścianie walca, wyznaczyć kąt oderwania warstwy przyściennej (należy odczytać wartość rzędnej x dla której naprężenia styczne jest (prawie) równa zero, obliczyć $\cos\varphi=x/R$, a stąd kąt oderwania $\theta=180-\varphi$; $\varphi=\arccos(x/R)$)



2. Dokonać obliczeń pola przepływu dla liczb $Re=10^3$, $Re=10^4$, $Re=10^5$, oraz $Re=6 \cdot 10^5$. Otrzymane wyniki porównać z danymi przedstawionymi na rys.6. Dokonać obliczeń współczynnika oporu ze wzoru (6) i porównać z wynikami z FlowLab'a. Wyznaczyć współczynnik oporu tarcia C_{Df} na podstawie danych dostarczonych przez program FlowLab w RAPORCIE (“wall shear stress - naprężenia ścinające τ_s (styczne) na powierzchni walca) oraz pamiętając, że:
 $F_{Df}=\tau_s \pi D b=C_{Df} \rho U^2/2 D b$, wyznaczyć współczynnik C_{Df} ($b=1$, szerokość walca). Porównać wyniki obliczeń ze wzorem na współczynniki oporu tarcia we wzorze (6) ($5.91/Re^{1/2}$). Obserwując wykres X-wall shear distribution - składowa x-owa rozkładu naprężeń stycznych na ścianie walca, wyznaczyć położenie (kąt) punktu oderwania warstwy przyściennej dla $Re=6 \cdot 10^5$.