

Wydział Nauk Technicznych

UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)

MECHANIKA PŁYNÓW

Elementy teorii warstwy przyściennej

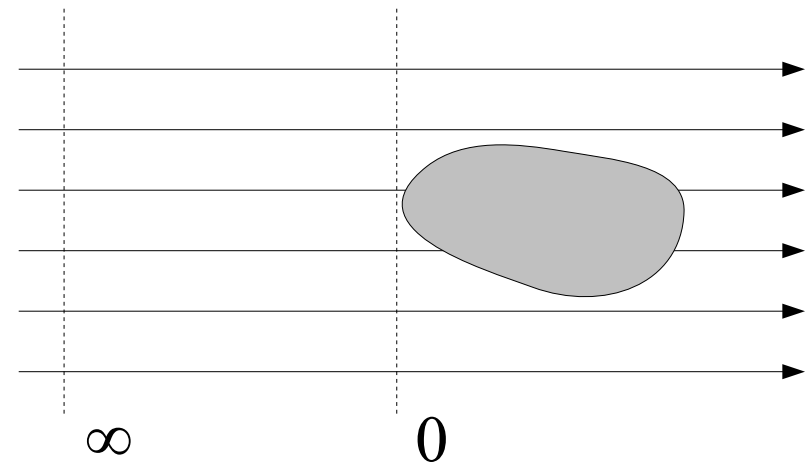
Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2015

Siła oporu i siła nośna

Siła oporu – składowa wektora siły hydro- lub aerodynamicznej równoległa do kierunku ruchu ciała względem płynu i skierowana przeciwnie do kierunku ruchu ciała.

Siła nośna – składowa wektora siły hydro- lub aerodynamicznej prostopadła do kierunku ruchu ciała względem płynu.



$$c_0 = 0$$

$$z_\infty = z_0$$

$$\frac{c_\infty^2}{2 \cdot g} + \frac{p_\infty}{\rho \cdot g} + z_\infty = \frac{c_0^2}{2 \cdot g} + \frac{p_0}{\rho \cdot g} + z_0 \longrightarrow p_0 - p_\infty = \Delta p_d = \frac{\rho \cdot c_\infty^2}{2}$$

ciśnienie dynamiczne

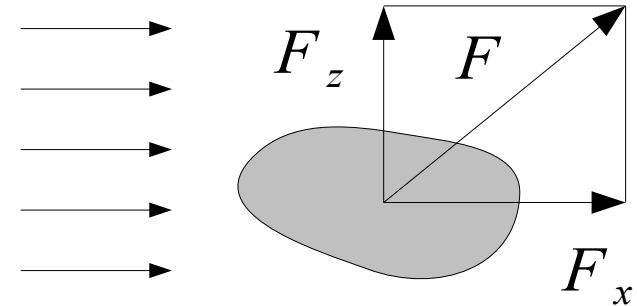
Siła oporu i siła nośna

$$F_x = \Delta p_d \cdot A_x$$

$$F_z = \Delta p_d \cdot A_z$$

$$F_x = \frac{\rho \cdot c_\infty^2}{2} \cdot A_x$$

$$F_z = \frac{\rho \cdot c_\infty^2}{2} \cdot A_z$$



F_x - siła oporu [N]

F_z - siła nośna [N]

ρ - gęstość płynu opływającego ciało $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

c_∞ - prędkość strugi płynu w obszarze niezakłóconym obecnością ciała $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

A_x - pole rzutu ciała opływającego na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu $\left[\text{m}^2 \right]$

A_z - pole rzutu ciała opływającego na płaszczyznę równoległą do kierunku ruchu $\left[\text{m}^2 \right]$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}$$

Współczynnik oporu i współczynnik nośności

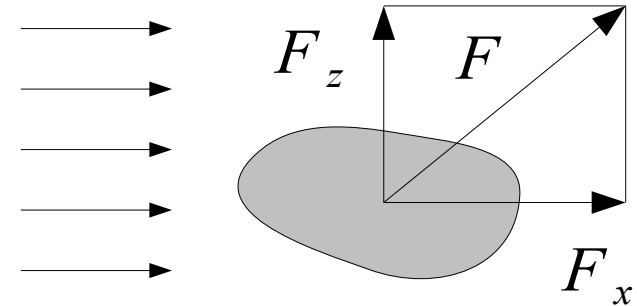
W przypadku płynu lepkiego, siła oporu i siła nośności muszą ulec korekcie. Ponieważ korektę taką trudno wyznaczyć analitycznie, wprowadza się dodatkowe współczynniki.

$$F_x = C_x \cdot \frac{\rho \cdot c_\infty^2}{2} \cdot A_x$$

$$F_z = C_z \cdot \frac{\rho \cdot c_\infty^2}{2} \cdot A_z$$

C_x - współczynnik oporu [-]

C_z - współczynnik nośności [-]



$$C_x = f(\text{Re}, \alpha, \phi)$$

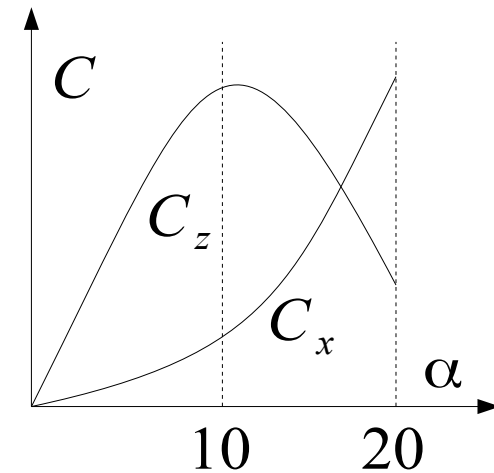
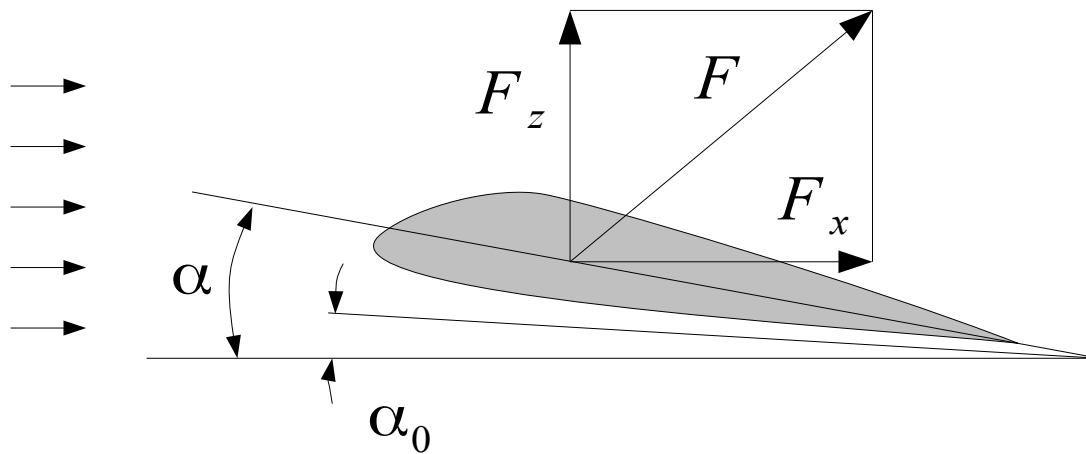
Re - liczba Reynoldsa [-]

α - kąt ułożenia ciała względem strugi
(kąt natarcia)

ϕ - współczynnik sferyczności [-]

Profil lotniczy

Profil lotniczy – kształt ciała, rozpatrywany w płaszczyźnie pionowej, zgodnej z kierunkiem ruchu względnego płynu i ciała, dla którego siła nośna ma wartość maksymalną, a siła oporu minimalną.



m - współczynnik kształtu (dla profili lotniczych $m \approx 3$)

α - kąt natarcia

α_0 - kąt natarcia, dla którego siła nośna równa się zero

$$C_z = 2 \cdot m \cdot (\alpha - \alpha_0)$$

wzór na współczynnik siły nośnej dla małych kątów natarcia ($< 15^\circ$)

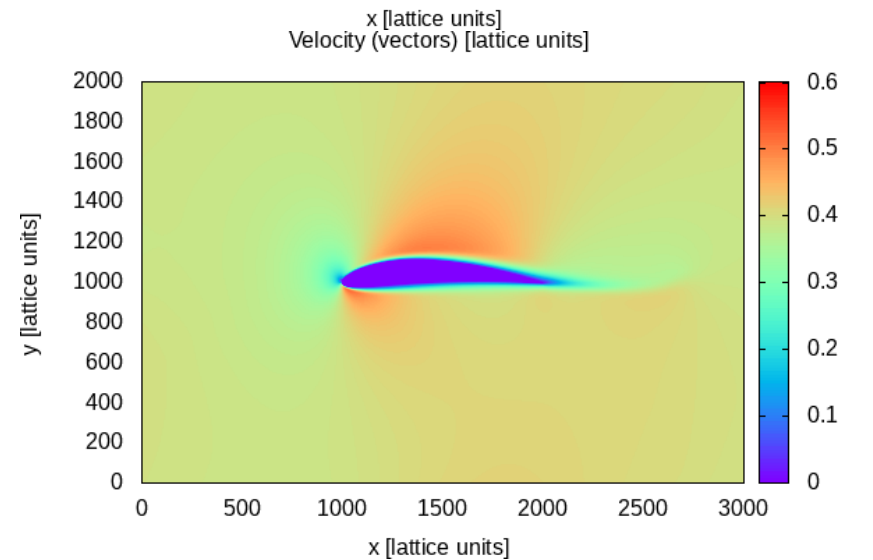
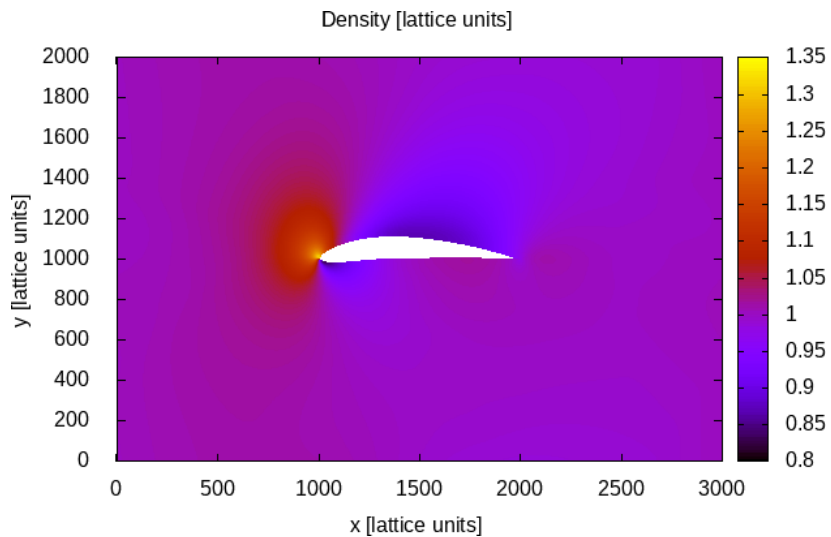
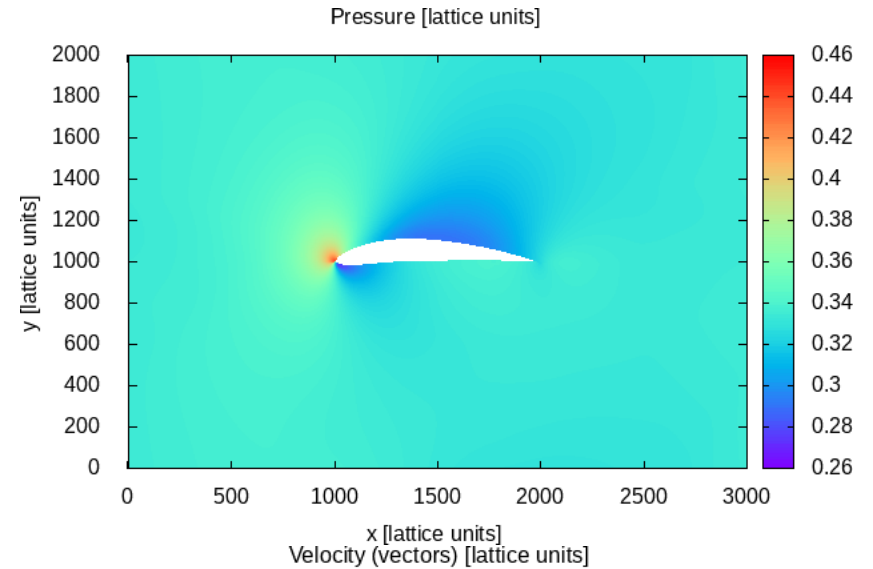
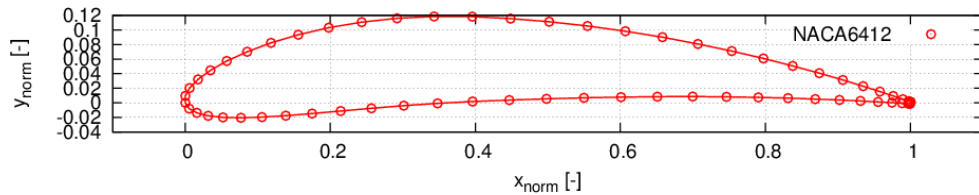
Profil lotniczy



Przykład badań eksperymentalnych profilu lotniczego:
wpływ kąta natarcia (z lewej) oraz wpływ kształtu (z prawej).

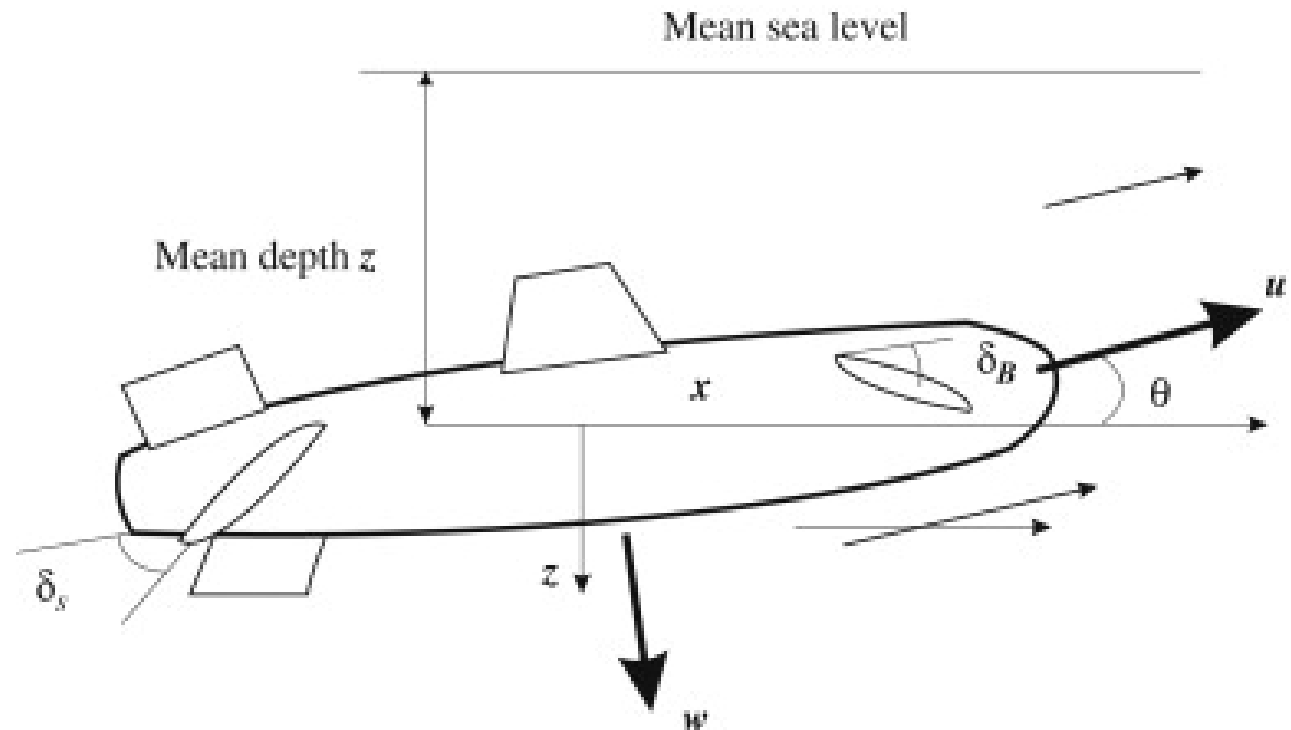
Profil lotniczy

Przykład symulacji opływu profilu NACA6412 gazem sieciowym (Metoda Gazu Sieciowego Boltzmannna).



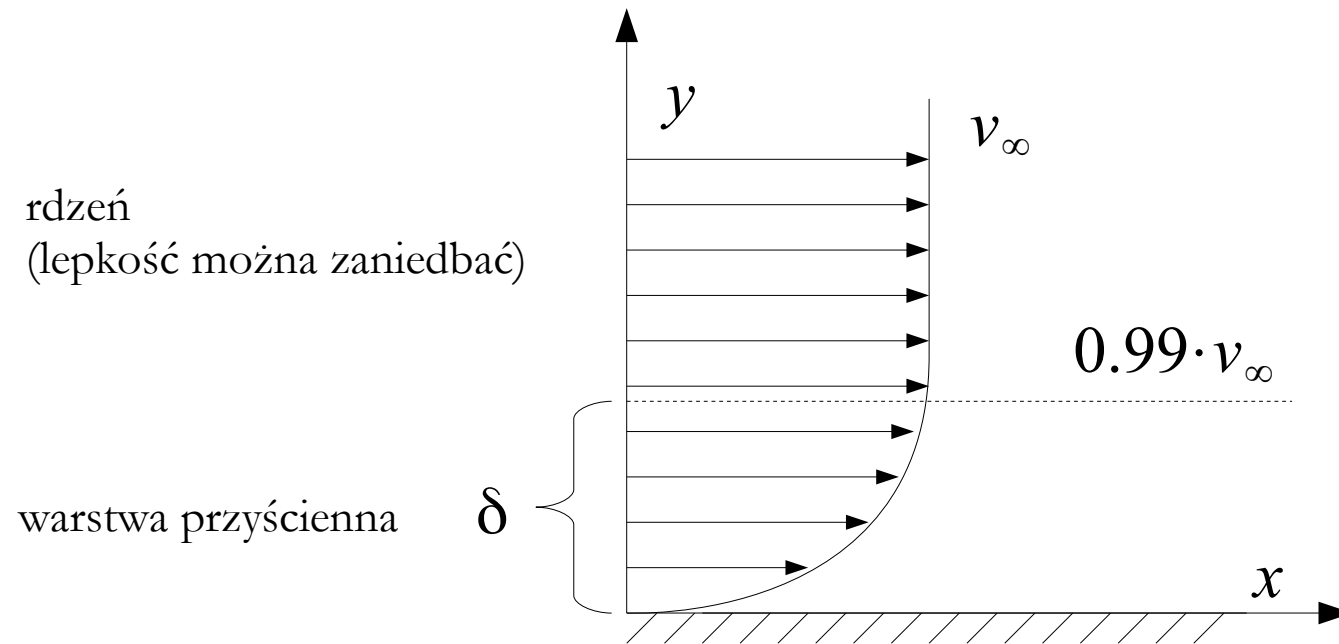
Stery głębokości

Stery głębokości – ruchome płaszczyzny sterowe jednostek pływających, zdolnych do kontrolowanego zanurzania i wynurzania oraz utrzymywania i zmiany głębokości zanurzenia w ruchu. Stery głębokości są jednym z elementów globalnego systemu kontroli zanurzenia jednostek podwodnych.



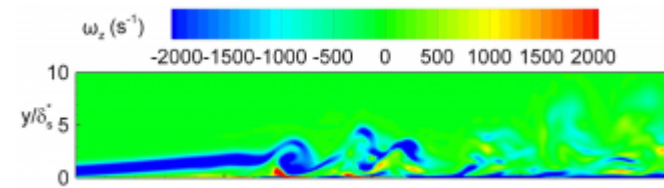
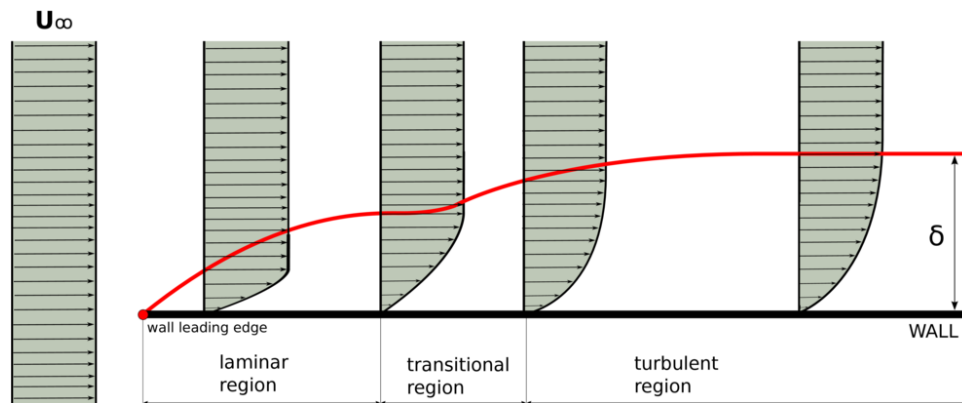
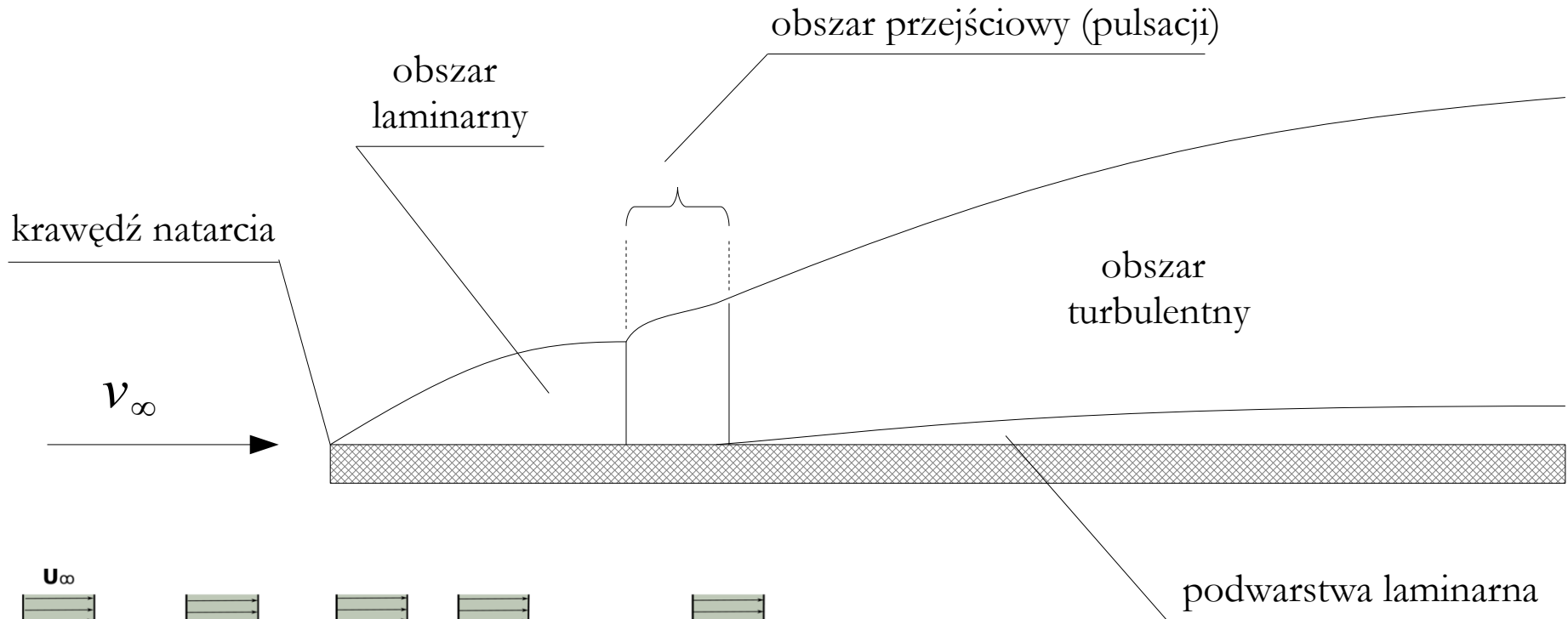
Warstwa przyścienna

Warstwa przyścienna – warstwa płynu znajdująca się bezpośrednio przy ścianie ciała opływanego. Rozróżnia się warstwę przyścienną laminarną i turbulentną.

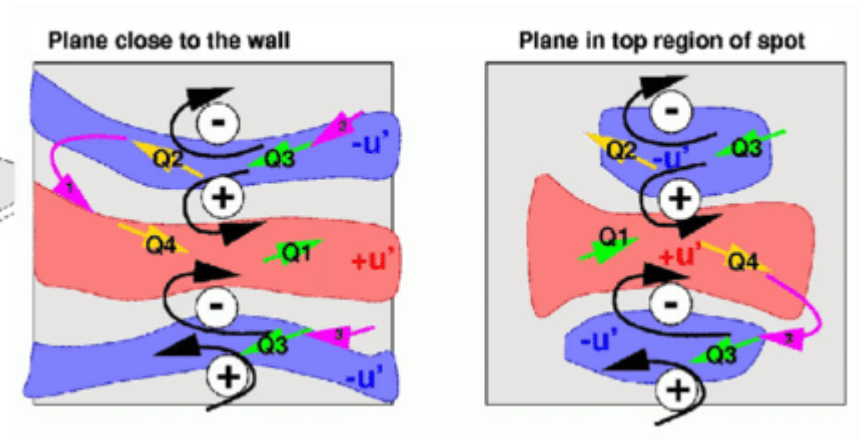
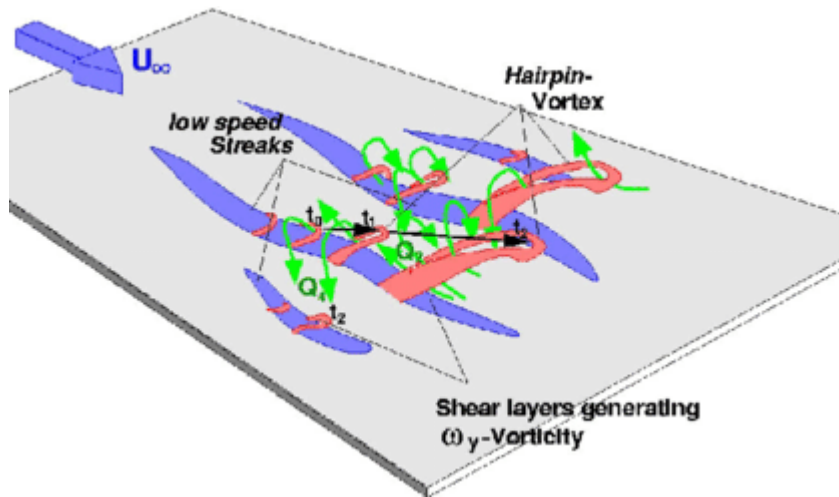


δ - grubość warstwy przyściennej

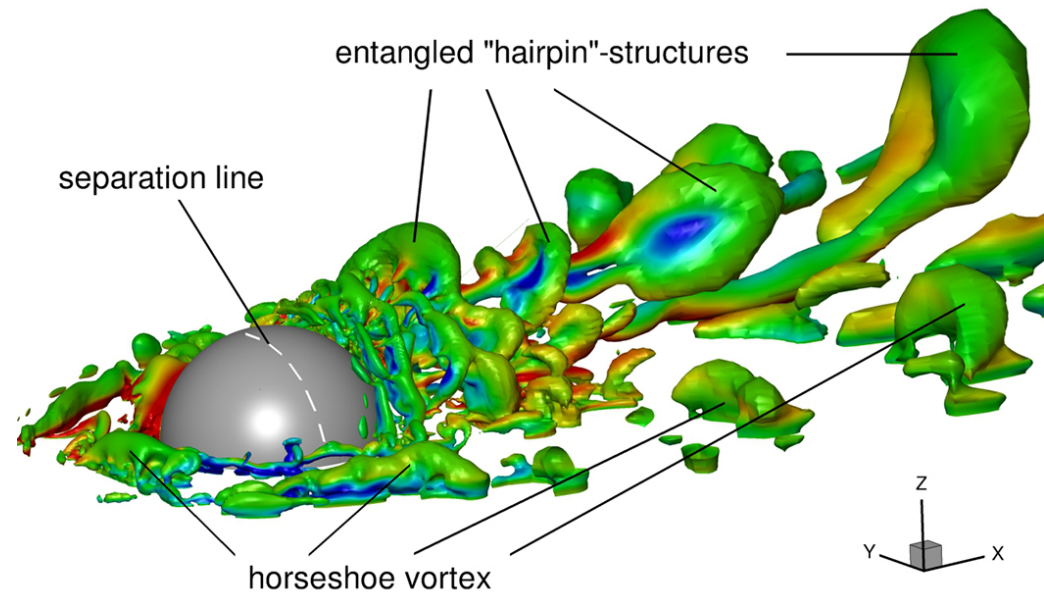
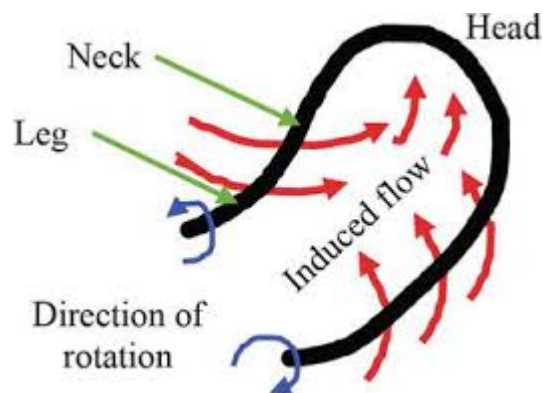
Rozwój warstwy przyściennej na ścianie



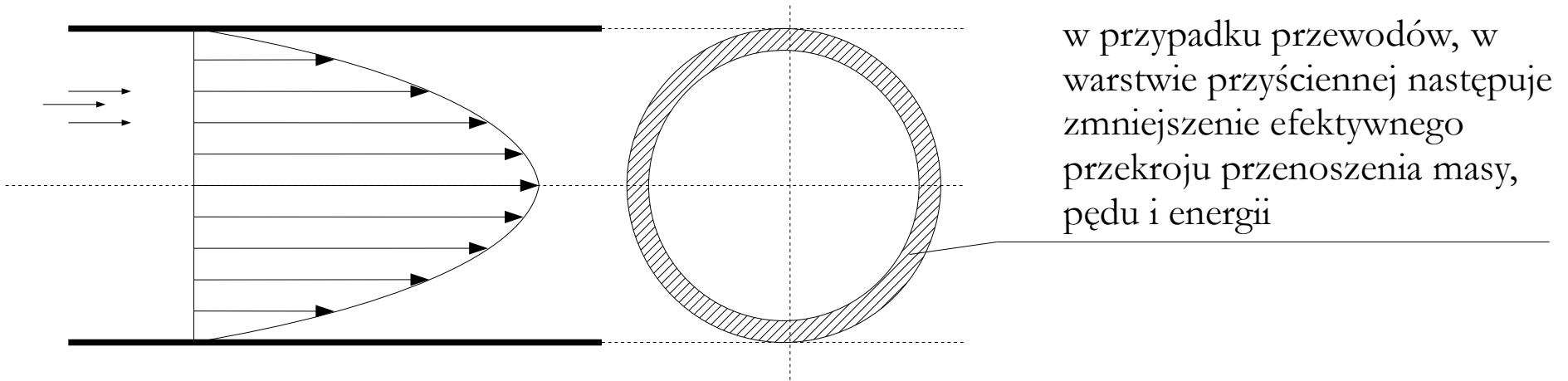
Rozwój warstwy przyściennej na ścianie



Przykłady modelowania tzw. przejścia laminarno-turbulentnego.



Straty w warstwie przyściennej



$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho \cdot v}{\rho_{\infty} \cdot v_{\infty}} \right) dy$$

- miara straty przekroju

$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho \cdot v}{\rho_{\infty} \cdot v_{\infty}} \cdot \left(1 - \frac{v}{v_{\infty}} \right) dy$$

- miara straty ilości ruchu (pędu)

$$\delta^{***} = \int_0^{\delta} \frac{\rho \cdot v}{\rho_{\infty} \cdot v_{\infty}} \cdot \left(1 - \frac{v^2}{v_{\infty}^2} \right) dy$$

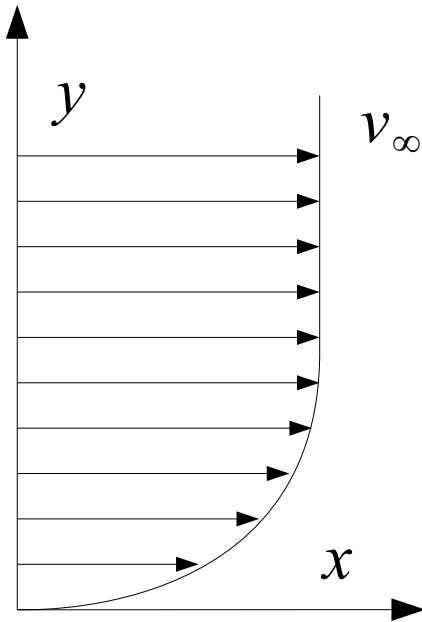
- miara straty ilości energii

dla płynu
nieściśliwego:

$$\frac{\rho}{\rho_{\infty}} = 1$$

Teoria Prandtla

Teoria Prandtla – model matematyczny ruchu płynu w przyściennej warstwie laminarnej, będący szczególną postacią równań bilansu masy i bilansu pędu.



równanie bilansu masy:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$$

równanie bilansu pędu:

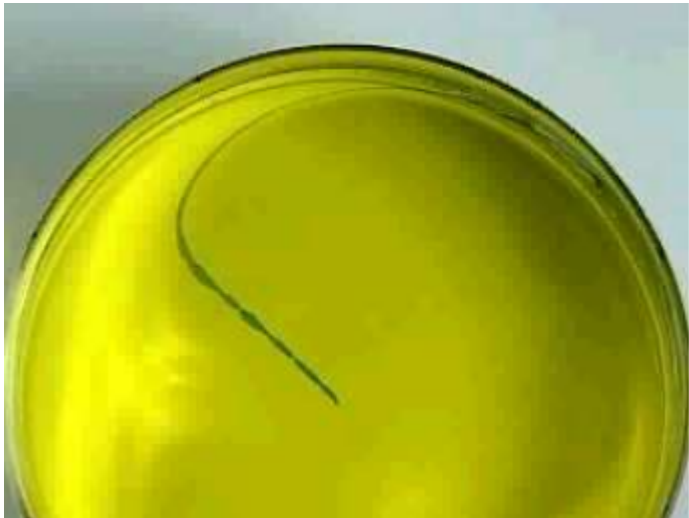
$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$$

kinematyczny
współczynnik
lepkości

Wpływ lepkości na warstwę przyścienną



$$\mu = 100 \left[\frac{mPa}{s} \right]$$

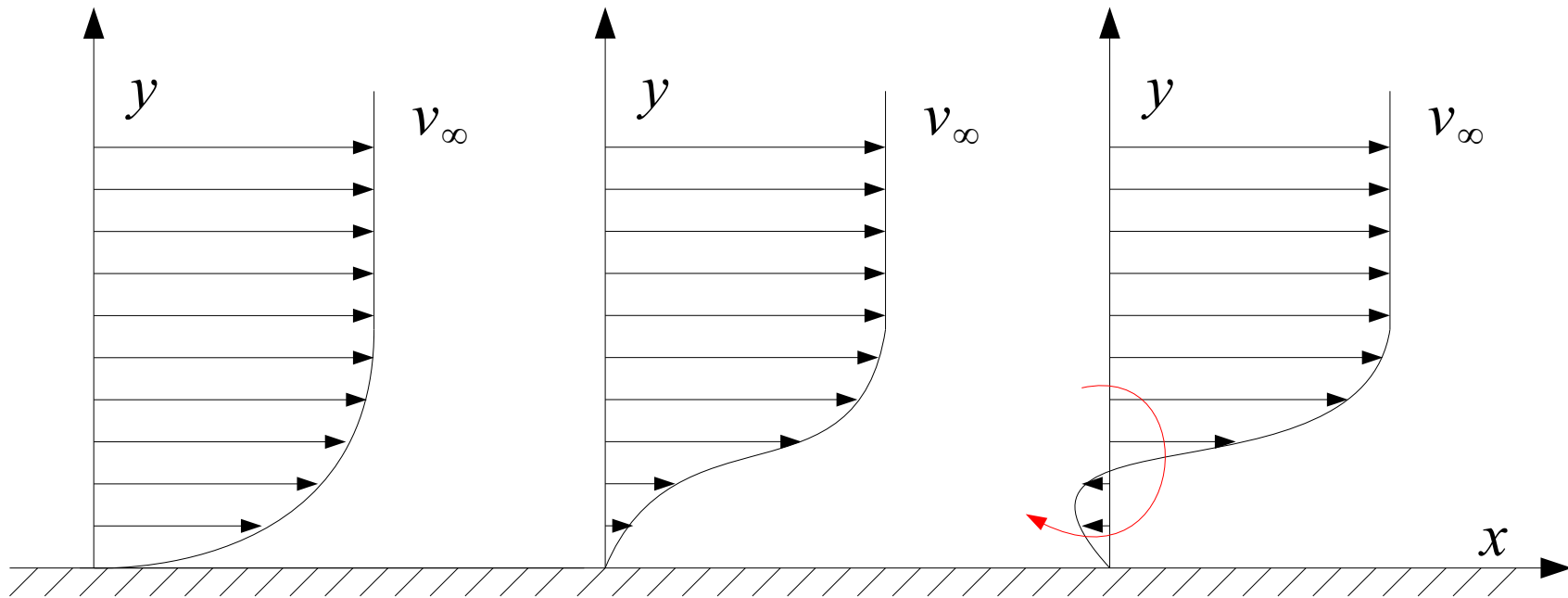


$$\mu = 10 \left[\frac{mPa}{s} \right]$$

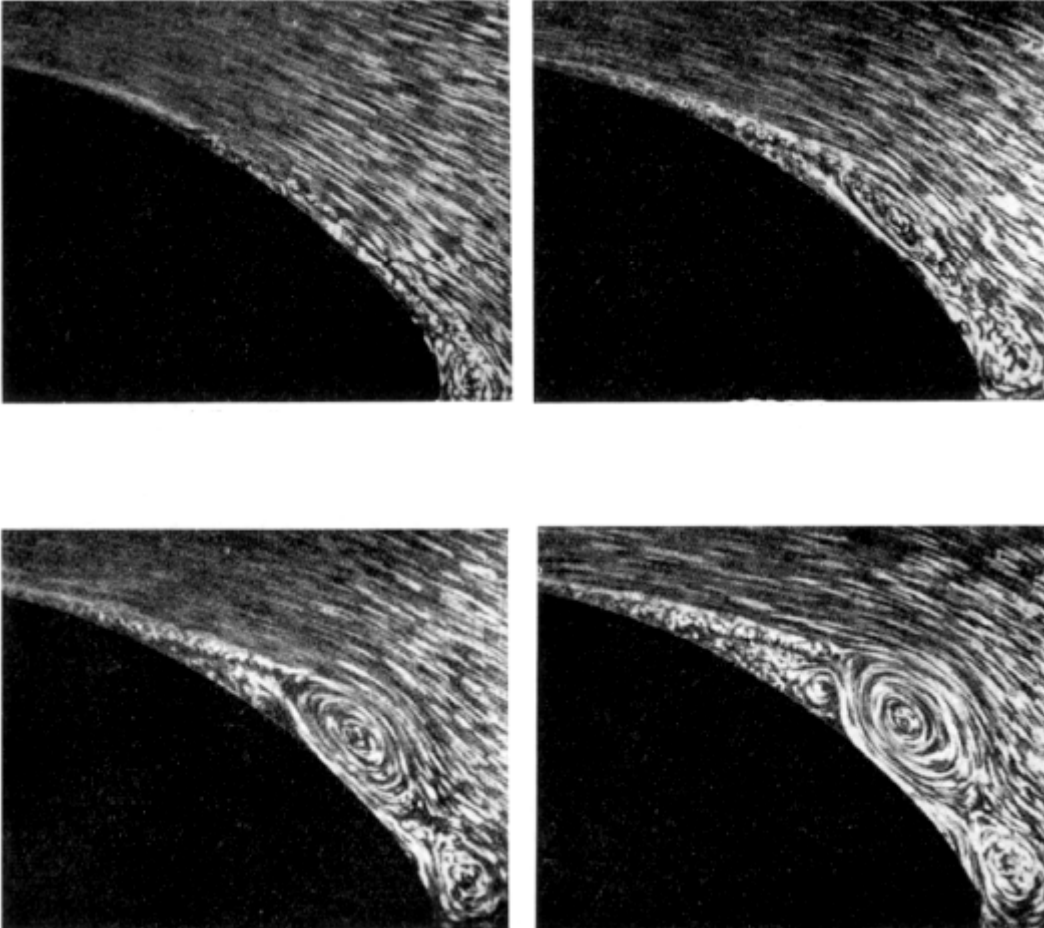
Eksperyment ilustrujący wpływ lepkości na grubość warstwy przyściennej – im większa lepkość, tym grubsza warstwa przyścienna.

Zjawisko oderwania

Zjawisko oderwania – stopniowe wytracanie energii w warstwie przyściennej prowadzące do powstania wirów i ich propagacji w kierunku rdzenia przepływu.



Zjawisko oderwania



Zjawisko oderwania na profilu kołowym (z lewej) oraz na nagłym uskoku (z prawej).

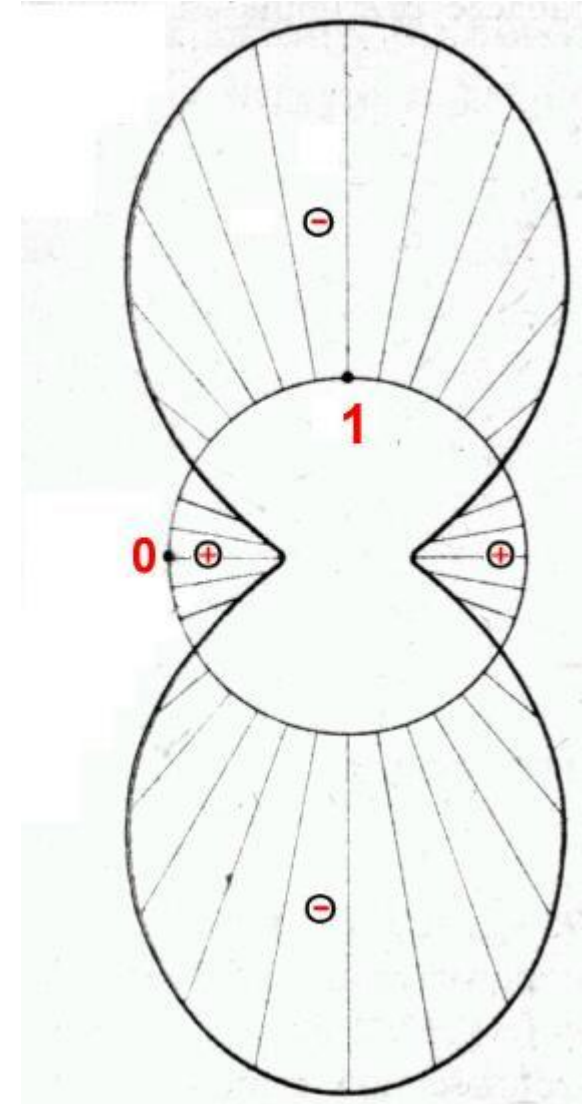
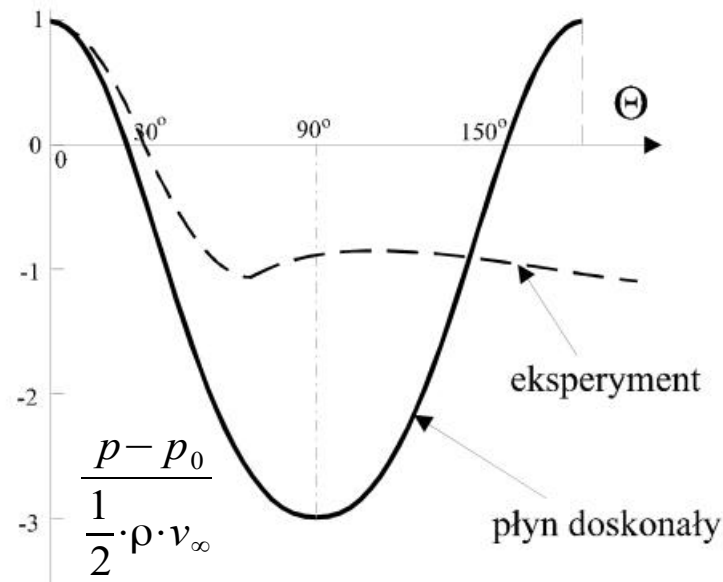
Paradoks d'Alemberta

Paradoks d'Alemberta – wniosek wynikający z rozwiązania równań ruchu na powierzchni profilu kołowego dla płynu idealnego (nielepkiego): okazuje się, że na walec opływany płynem idealnym nie działa żadna siła.

0 - punkt stagnacji
(maks. nadciśnienie)

1 - punkt maks. depresji
(maks. podciśnienie)

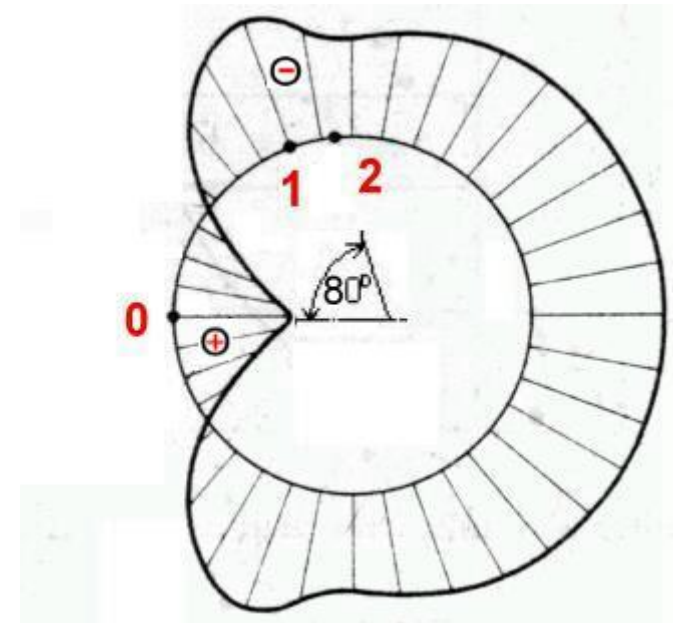
2 - punkt oderwania



Opływ pod- i nadkrytyczny

W płynach rzeczywistych (lepkich) rozkład ciśnień nie jest symetryczny i zależy dodatkowo od rodzaju ruchu w warstwie przyściennej:

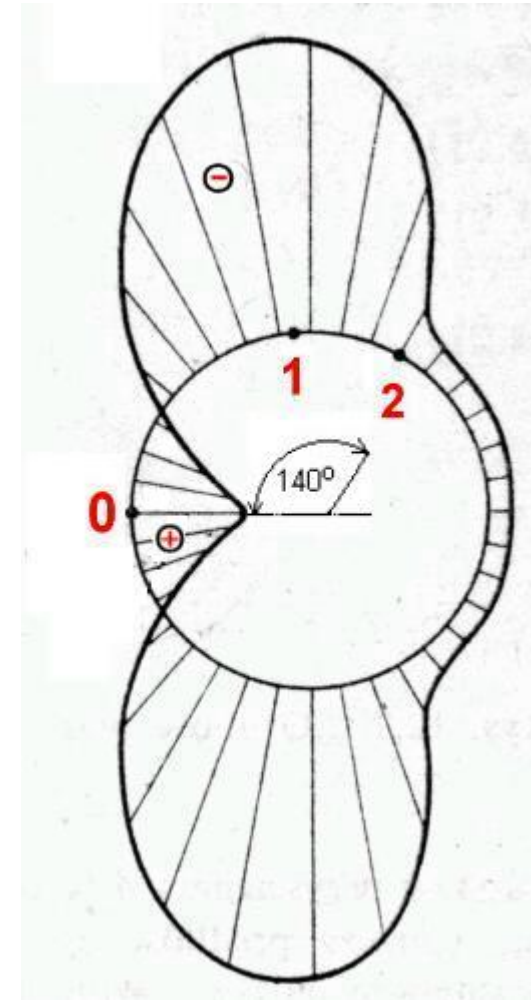
jeżeli w punkcie 1 warstwa przyścienna ma jeszcze charakter laminarny, to bardzo szybko następuje wytracenie energii płynu i oderwanie – wczesne oderwanie powoduje z kolei dużą depresję (podciśnienie) w tylnej części ciała i duże oporu ruchu (współczynnik oporu ma wysoką wartość)



Opływ pod- i nadkrytyczny

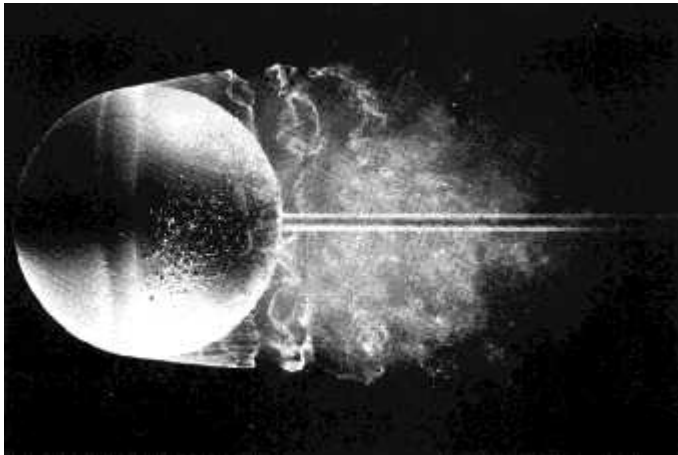
W płynach rzeczywistych (lepkich) rozkład ciśnień nie jest symetryczny i zależy dodatkowo od rodzaju ruchu w warstwie przyściennej:

jeżeli w punkcie 1 warstwa przyścienna ma już charakter turbulentny, to wytracanie energii trwa dłużej, wskutek czego oderwanie nastąpi później – późne oderwanie powoduje mniejszą depresję (podciśnienie) w tylnej części ciała i mniejsze oporu ruchu (współczynnik oporu ma wartość niską)

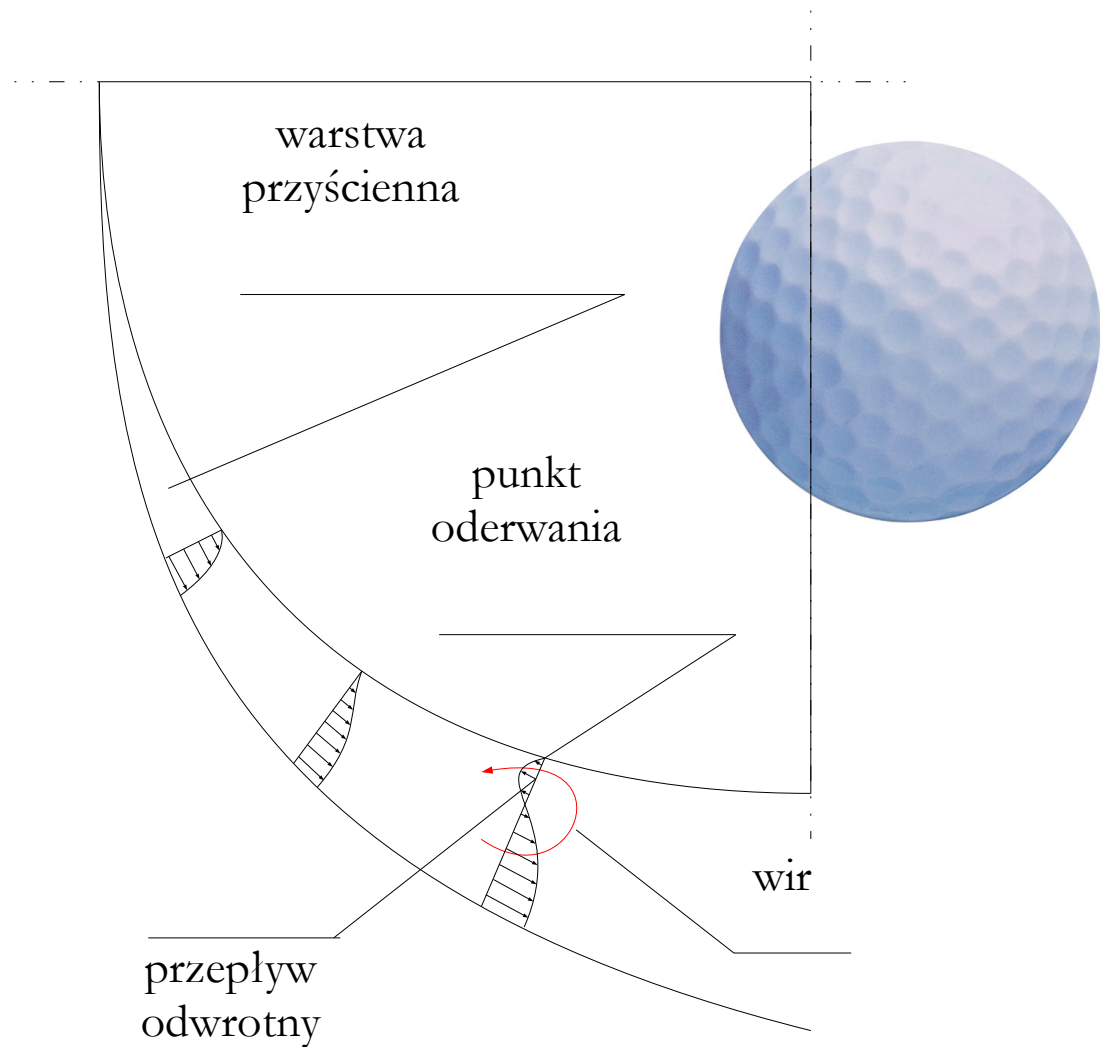
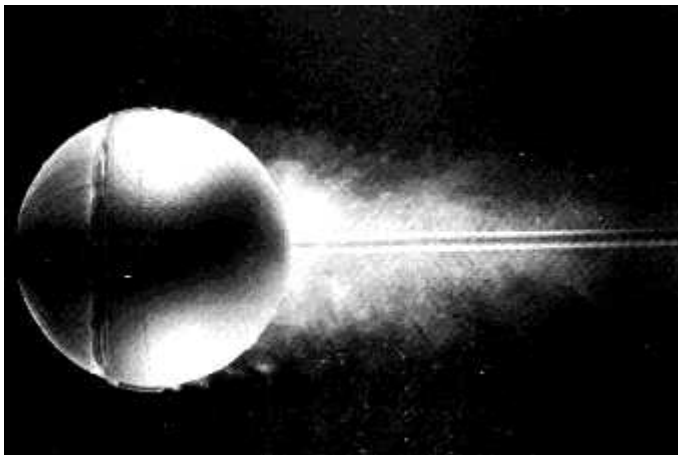


Struktura powierzchni a opory opływu

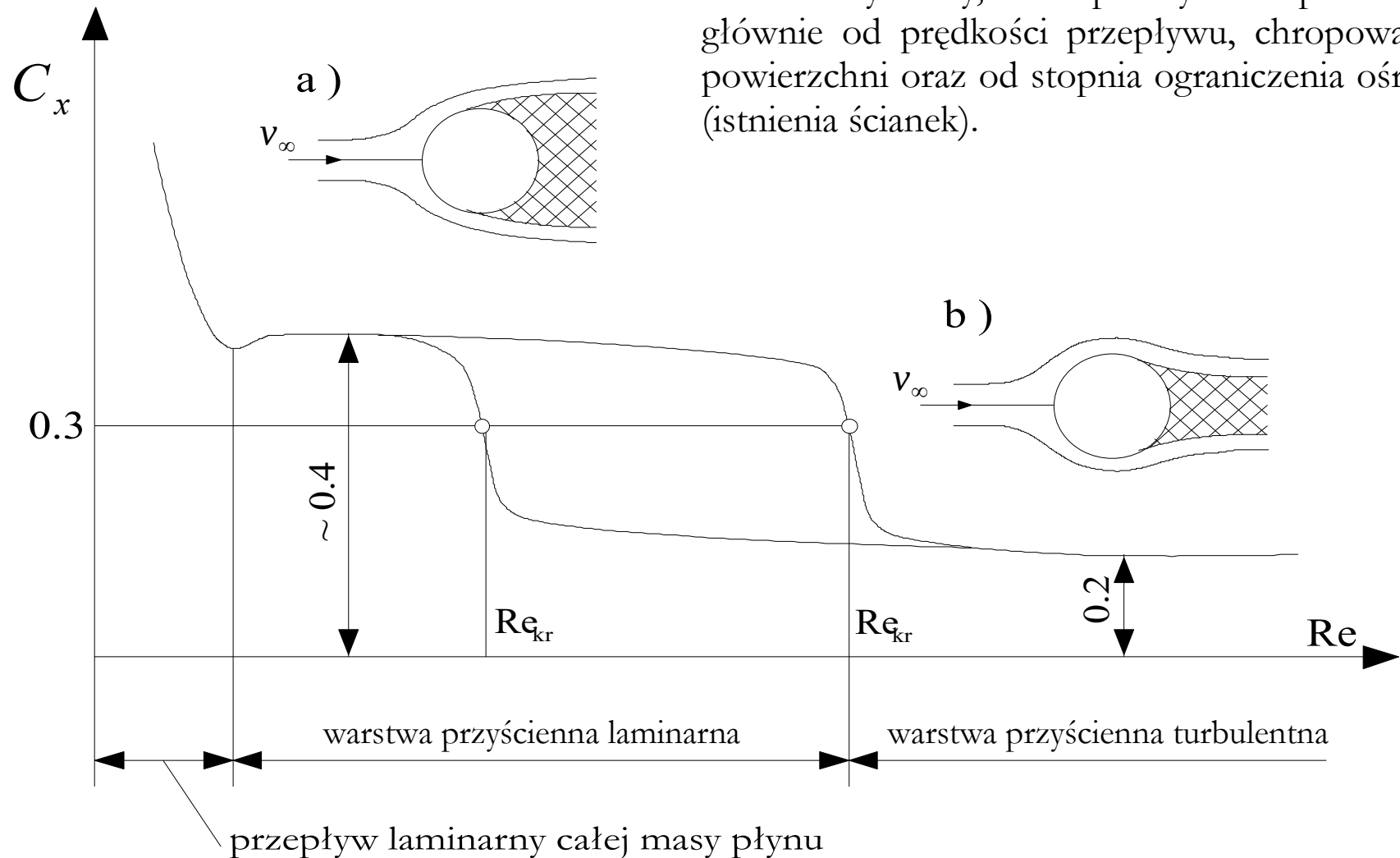
powierzchnia gładka



powierzchnia chropowata

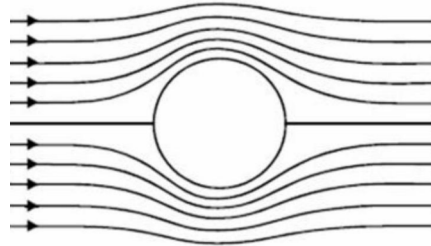


Wpływ rodzaju ruchu na współczynnik oporu



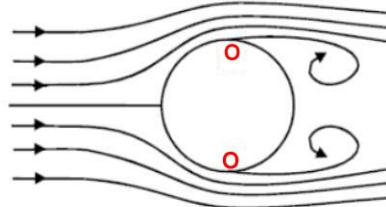
Wiry spływowe

$Re < 2$



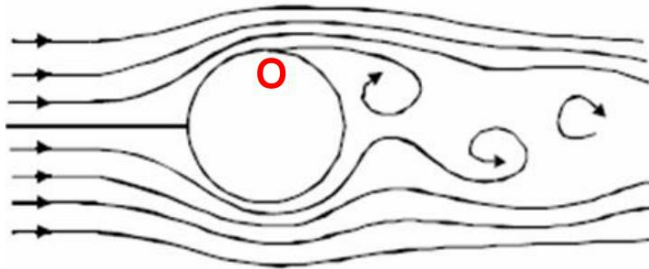
sily bezwładności płynu nie są w stanie pokonać sił lepkości – warstwa przyścienna nie ulega oderwaniu, a płyn w sposób laminarny opływa dookoła praktycznie całą przeszkodę

$2 < Re < 40$



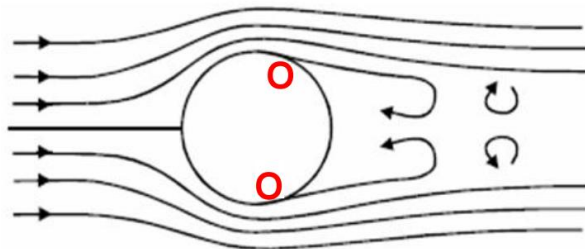
pojawia się oderwanie, ale pęd oraz bezwładność przepływającej strugi są zbyt małe, aby mogły oderwać powstałe wiry – obraz przepływu jest symetryczny

$40 < Re < 10^5$



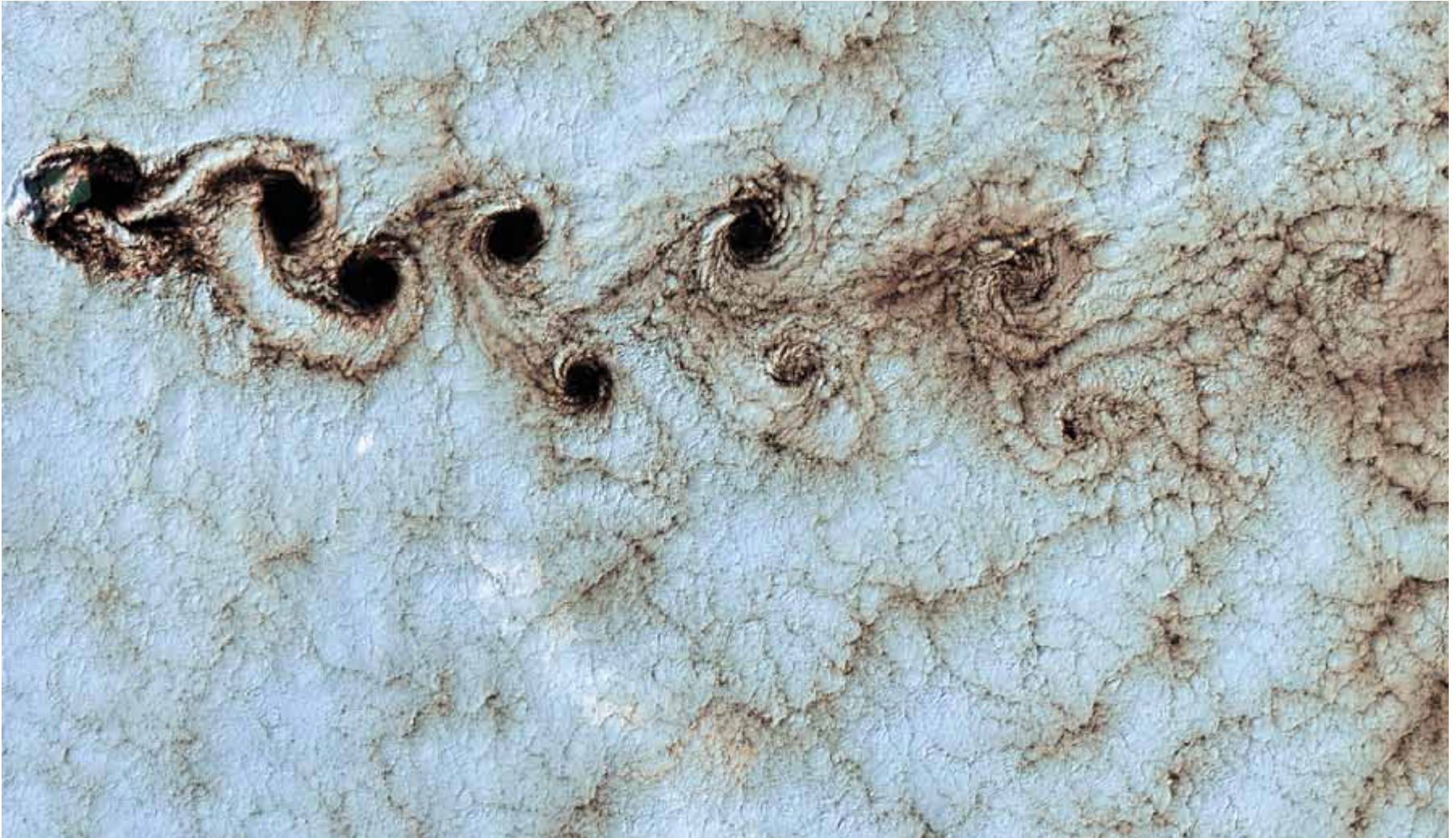
pojawia się oderwanie, a pęd oraz bezwładność przepływającej strugi zrywają naprzemienne tworzące się wiry – układ wirów za ciałem zwany jest **ścieżką** (lub wirami) **von Karmana**

$Re > 10^5$



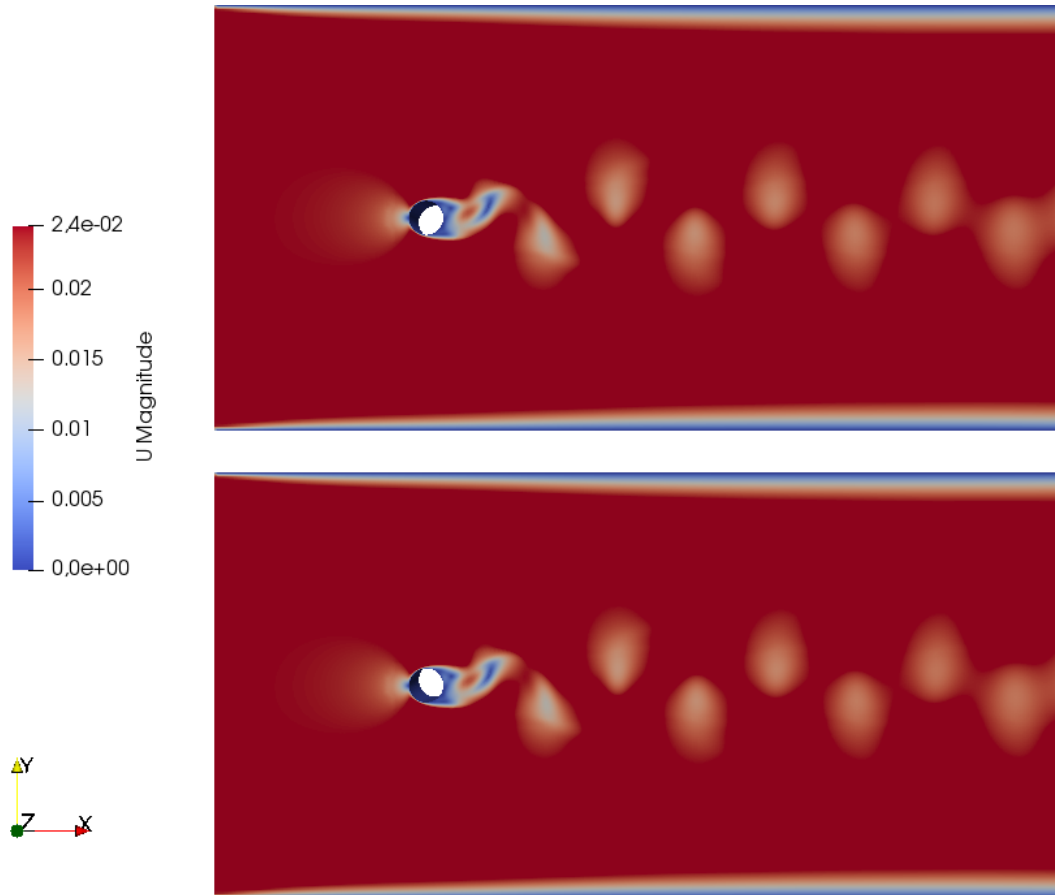
pojawia się oderwanie, a pęd strugi tłumi przepływ i uniemożliwia rozprzestrzenianie się wirów (brak jest na nie miejsca) – obraz przepływu staje się quasi-symetryczny

Ścieżka von Karmana

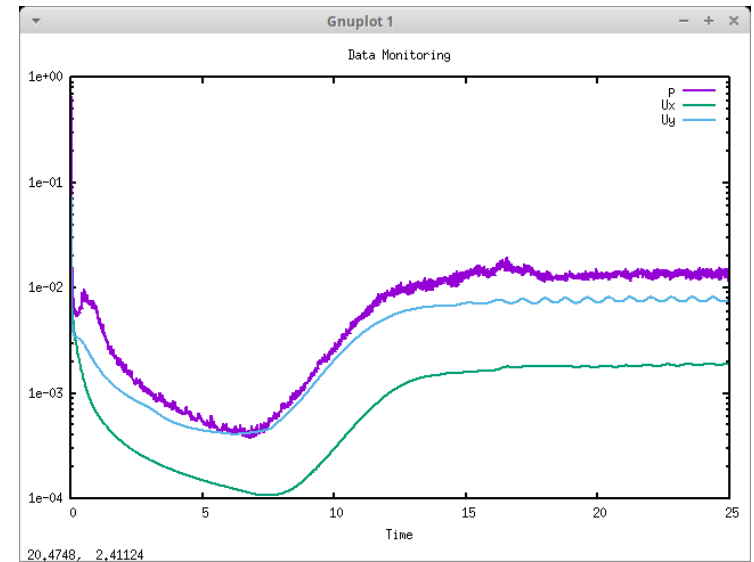


ścieżka wirów von Karmana w atmosferze ziemskiej (opływ wokół wyspy)

Ścieżka von Karmana



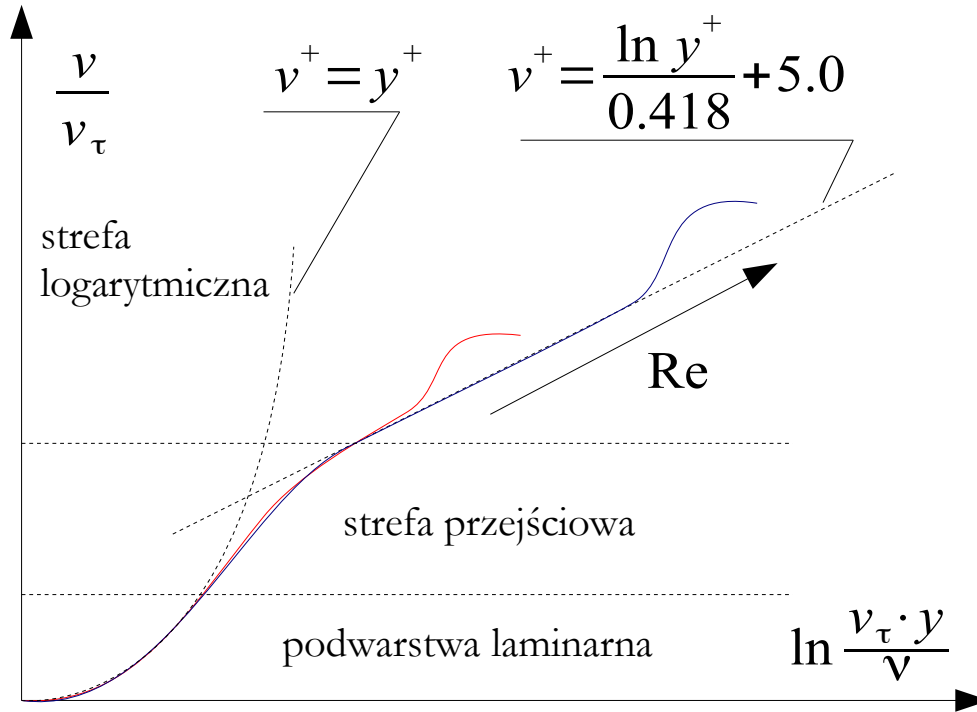
Solwer **icoFoam**.



Solwer **pisoFoam**
(u góry wykres rezyduów).

Przykład modelowania wirów von Karmana w pakiecie OpenFoam.

Turbulentna warstwa przyścienna



von Karman wprowadził bezwymiarowe wielkości pozwalające na opis profili prędkości w warstwie przyściennej.

ρ - gęstość płynu

ν - kinematyczny współczynnik lepkości

τ_w - naprężenia styczne na ścianie

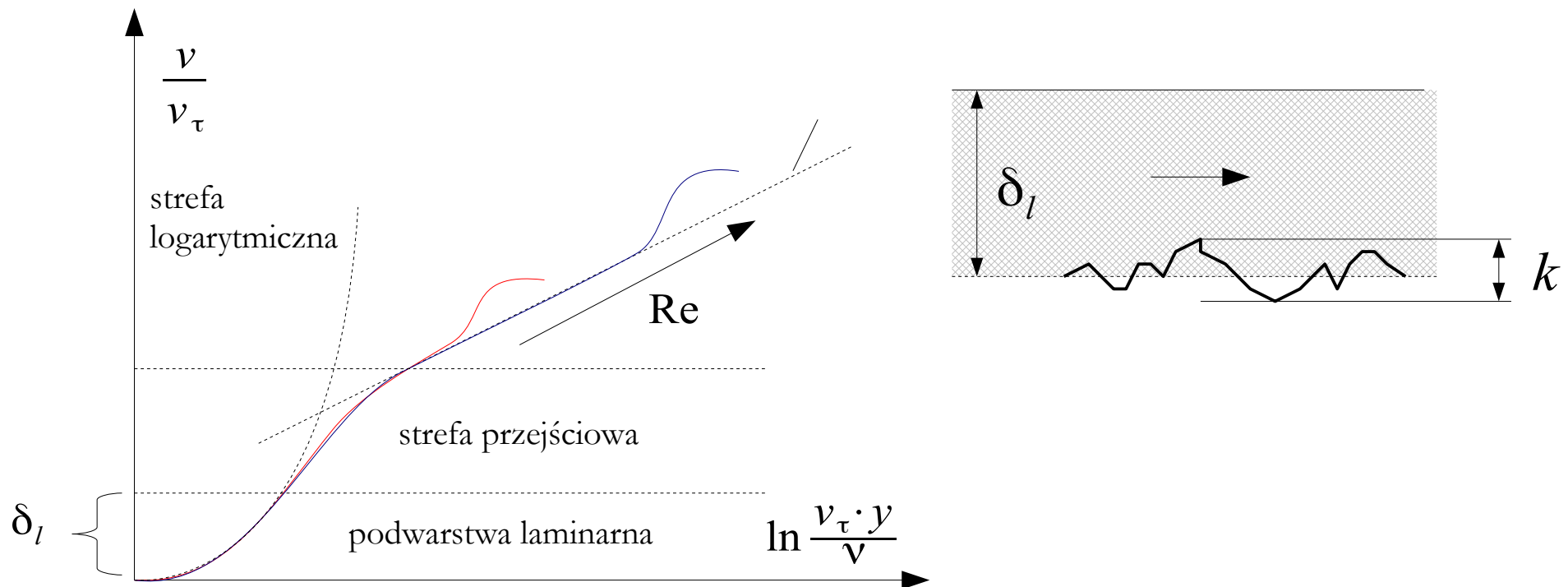
$$y^+ = \frac{y \cdot v_\tau}{\nu} \quad - \text{bezwymiarowa odległość od ściany}$$

$$v^+ = \frac{v}{v_\tau} \quad - \text{bezwymiarowa prędkość przepływu}$$

$$v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

Powierzchnia hydraulicznie gładka

Powierzchnia hydraulicznie gładka – powierzchnia, dla której średnia wysokość chropowatości mieści się w podwarstwie laminarnej. Jeżeli tak jest, to chropowatość nie wpływa na kształt profilu prędkości

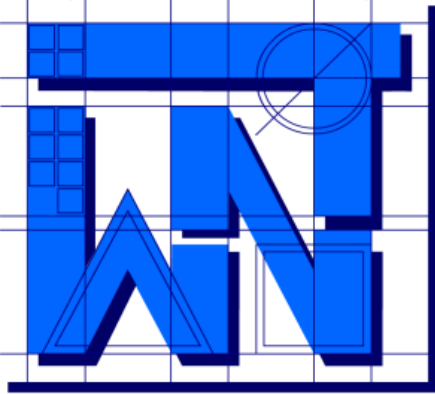


Podsumowanie

Zagadnienia:

Siła oporu i siła nośna, współczynnik oporu i współczynnik nośności, profil lotniczy, stery głębokości, warstwa przyścienna, rozwój warstwy przyściennej na ścianie, straty w warstwie przyściennej, teoria Prandtla, zjawisko oderwania, paradoks d'Alemberta, opływ pod- i nadkrytyczny, struktura powierzchni a opory opływu, wpływ rodzaju ruchu na współczynnik oporu, wiry spływowe, ścieżka von Karmana, turbulenta warstwa przyścienna, powierzchnia hydraulicznie gładka.

Wydział Nauk Technicznych



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN

The Faculty of Technical Sciences

POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11

tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55

URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)

Dziękuję za uwagę

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2013-2015