

Opory ruchu

Fizyka I (B+C)

Wykład XII:

- Tarcie
- Lepkość
- Ruch w ośrodku

Tarcie

Tarcie kinetyczne

Siła pojawiająca się między dwoma powierzchniami **poruszającymi się** względem siebie, dociskanymi siłą **N**.

Ścisły opis sił tarcia jest bardzo skomplikowany.

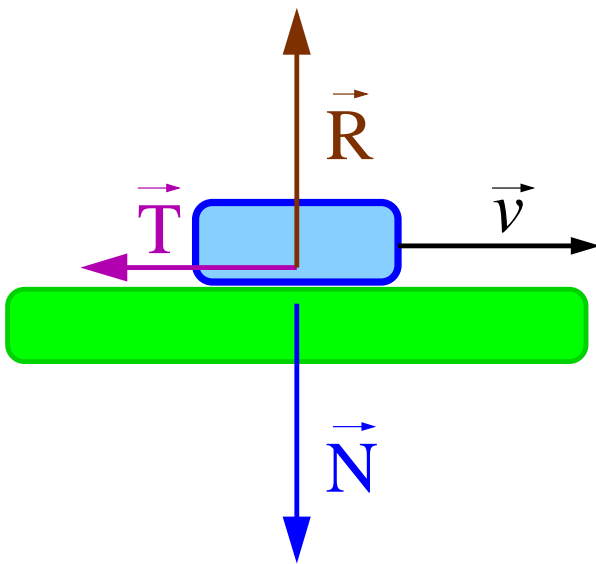
⇒ Prawo empiryczne:

$$\vec{T} = -\mu_k \vec{i}_v N \quad \vec{i}_v = \frac{\vec{v}}{v}$$

Siła tarcia kinetycznego:

- jest proporcjonalna do \perp siły dociskającej
- nie zależy od powierzchni zetknięcia
- nie zależy od prędkości

Prawo empiryczne ⇒ przybliżone !!!



Tarcie

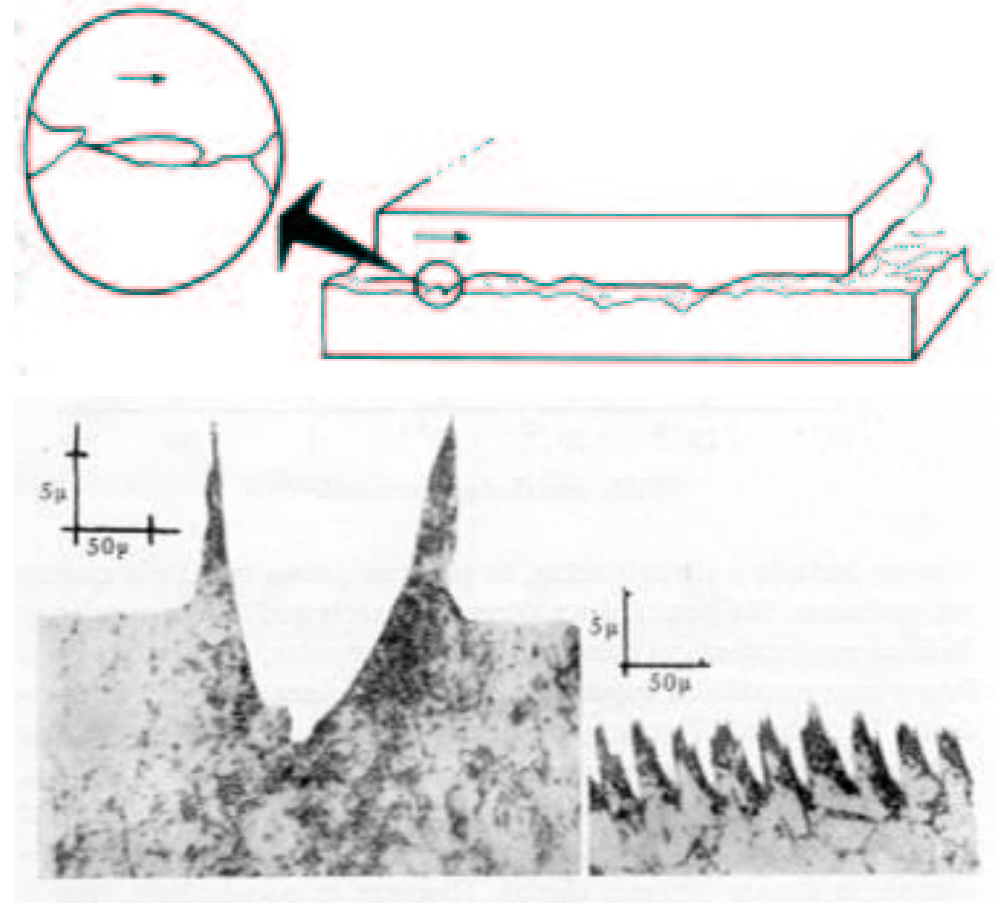
Obraz mikroskopowy

Tarcie wywołane jest przez oddziaływanie elektromagnetyczne cząstek stykających się ciał.

Powierzchnie nigdy nie są idealnie równe na poziomie mikroskopowym cząstki jednego ciała “blokują drogę” cząstkom drugiego ciała

⇒ muszą zostać “odepchnięte”

wypolerowana miedź ⇒

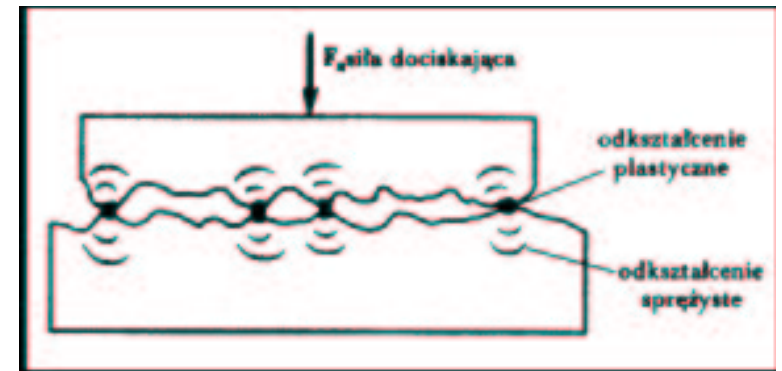


Tarcie

Zależność od nacisku

Powierzchnia rzeczywistego (mikroskopowego) styku ciał jest w normalnych warunkach wiele rzędów wielkości mniejsza niż powierzchnia geometryczna:

siła dociskająca	ułamek powierzchni
1 N/cm ²	0.00001
2.5 N/cm ²	0.000025
50 N/cm ²	0.0005
250 N/cm ²	0.0025



⇒ efektywna powierzchnia styku proporcjonalna do nacisku

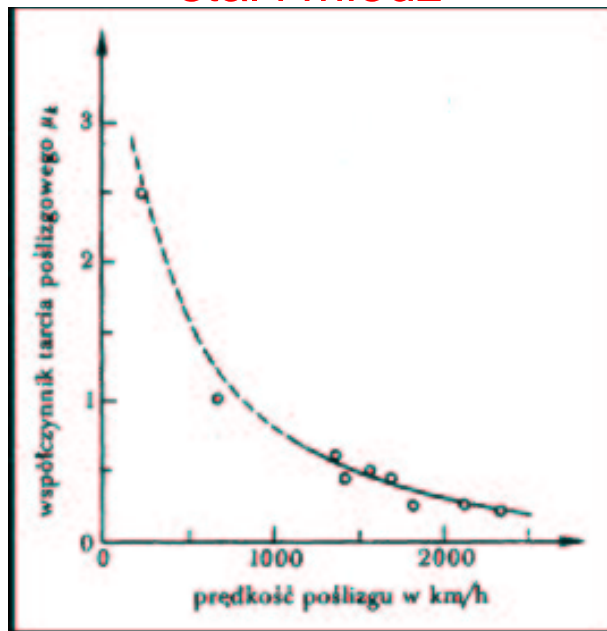
⇒ liczba oddziaływań na poziomie atomowym proporcjonalna do nacisku

Tarcie

Odstępstwa od praw empirycznych

Przy dużych prędkościach może się pojawić zależność μ_k od prędkości v :

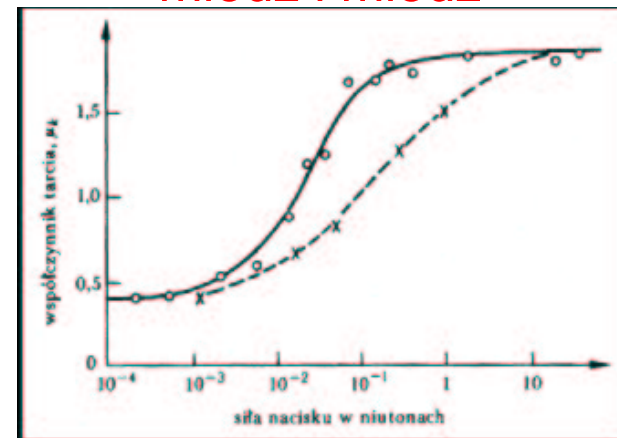
stal i miedź



Przy bardzo dużych prędkościach miedź ulega chwilowemu stopieniu...

Przy dużych siłach dociskających mogą się pojawić odstępstwa od zależności liniowej:

miedź i miedź



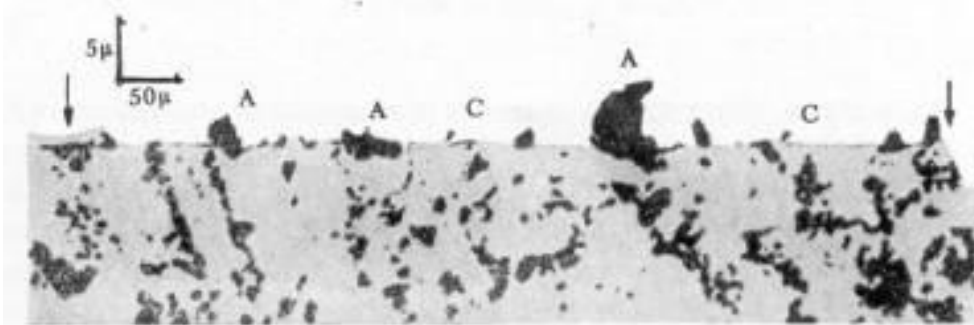
Przy dużym nasisku zniszczeniu ulega warstwa tlenków na powierzchni miedzi...

Tarcie

Ścieranie

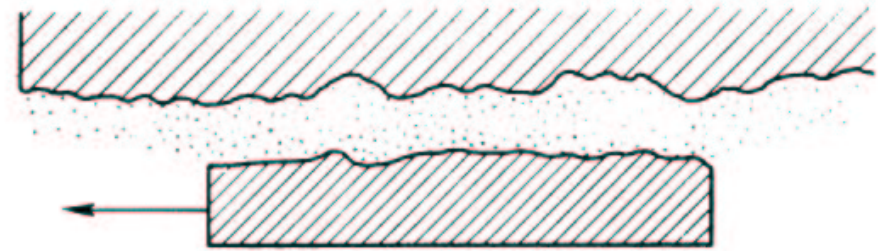
Na poziomie mikroskopowym tarcie prowadzi trwałych zmian w stykających się powierzchniach.

Fragmenty miedzi przyłączone do powierzchni stali:



Smarowanie

Tarcie zmniejszamy wprowadzając smar między poruszające się powierzchnie.

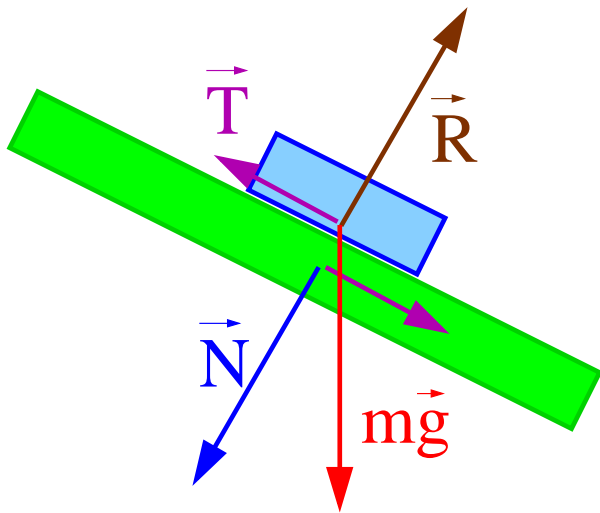


Powierzchnie nie stykają się \Rightarrow brak tarcia

\Rightarrow pojawia się jednak nowa siła oporu
związana z lepkością

Tarcie

Tarcie statyczne



Ciało pozostaje w równowadze dzięki działaniu tarcia statycznego

Siła działająca między dwoma powierzchniami nieruchomymi względem siebie, dociskanymi siłą N .

Maksymalna siła tarcia statycznego T_S^{max} jest równa najmniejszej sile F jaką należy przyłożyć do ciała, aby ruszyć je z miejsca.

Prawo empiryczne:

$$\vec{T}_S^{max} = -\mu_s \vec{i}_F N \quad \vec{i}_F = \frac{\vec{F}}{F}$$

Tarcie

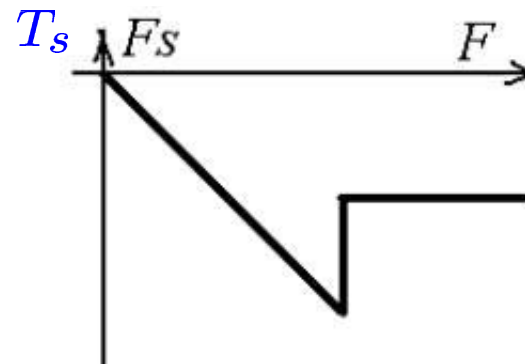
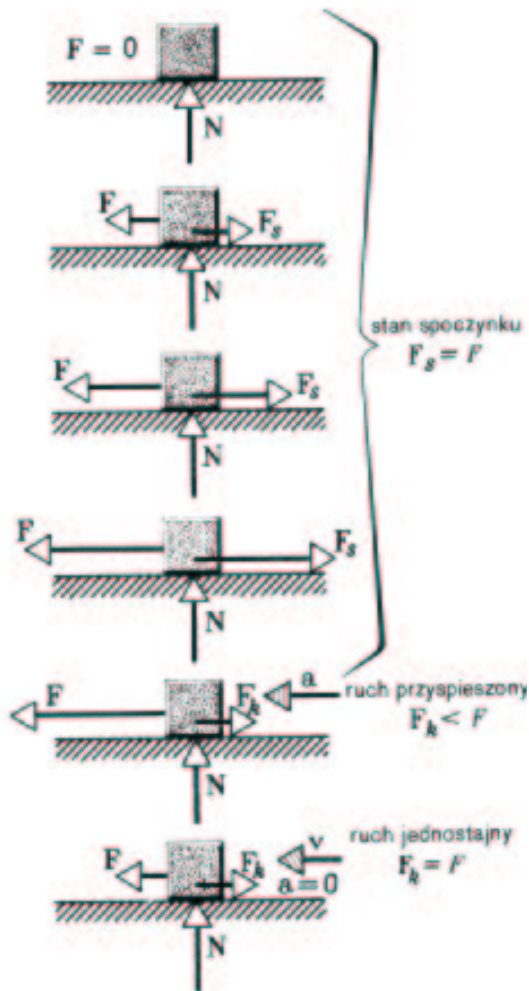
Tarcie statyczne

Póki przyłożona siła \vec{F} jest mała, tarcie statyczne utrzymuje ciało w spoczynku:

$$\vec{T}_s = -\vec{F}$$

⇒ siła tarcia rośnie proporcjonalnie do przyłożonej siły.

Gdy przyłożona siła przekroczy wartość $T_s^{max} = \mu_s \cdot N$ ciało zaczyna się poruszać ⇒ tarcie kinetyczne



Tarcie kinetyczne naogół słabsze od spoczynkowego: $\mu_k < \mu_s$

Tarcie

Współczynniki tarcia

Przykładowe współczynniki
dla wybranych materiałów:

materiały	μ_s	μ_k
stal o stal	0,15	0,03 – 0,09
stal o lód	0,027	0,014
drewno o drewno	0,65	0,2 – 0,4
guma o beton suchy	1,0	0,7
guma o beton mokry	0,7	0,5

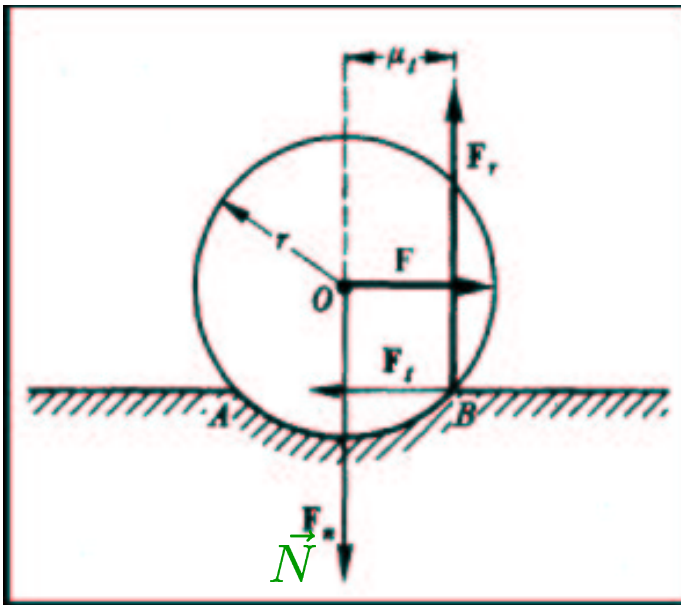
Hamowanie samochodu:

ważne aby koła nie zaczęły się ślizgać

- poślizg $\Rightarrow \mu_k$
- dobry kierowca lub ABS $\Rightarrow \mu_s$
zysk $\sim 40\%$ na drodze hamowania

Tarcie

Tarcie toczne



Toczące się ciało odkształca zawsze powierzchnię po której się toczy.

Poza tarciem statycznym i kinetycznym (poślizgowym) mamy **tarcie toczne**:

$$\vec{T}_t = -\mu_t \vec{i}_F \frac{N}{r}$$

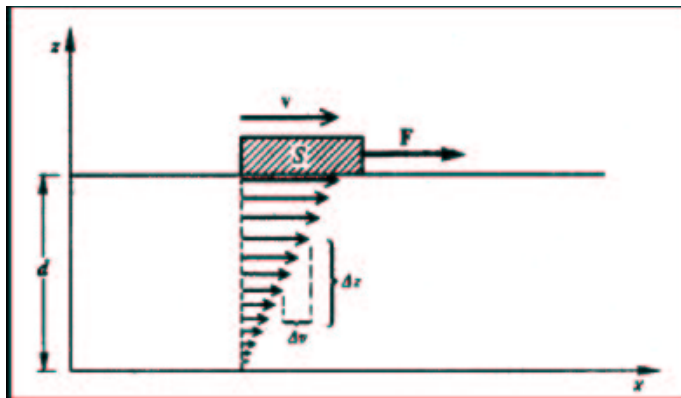
Współczynnik tarcia tocznego μ_t jest zwykle bardzo mały

Przykładowo:

- drewno + drewno $\Rightarrow \mu_t = 0,0005$ m
- stal hartowana + stal $\Rightarrow \mu_t = 0,00001$ m
(wymiar długości!)

Lepkość

Ciało poruszające się
po powierzchni cieczy:



Warstwa cieczy przylegająca do
ciała porusza się wraz z nim.

Warstwa cieczy przylegająca do
dna spoczywa.

“tarcie wewnętrzne” pomiędzy warstwami cieczy
poruszającymi się z różnymi prędkościami.

Formuła empiryczna:

$$\vec{F}_L = -\vec{i}_V \eta \frac{v S}{d}$$

gdzie: v - prędkość ciała
 S - powierzchnia styku z cieczą
 d - głębokość naczynia
 η - współczynnik lepkości

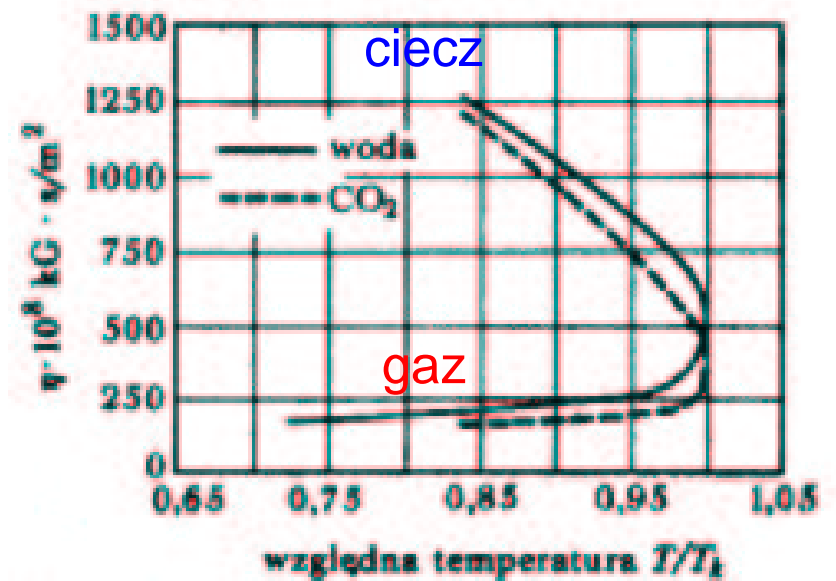
Lepkość

Typowe wartości:

eter	0.0002	Ns/m^2
woda	0.001	Ns/m^2
gliceryna	1.5	Ns/m^2
miód	500.	Ns/m^2
wodór	0.000009	Ns/m^2
powietrze	0.000018	Ns/m^2
tlen	0.000021	Ns/m^2

Lepkość cieczy maleje z temperaturą

Lepkość gazów rośnie z temperaturą

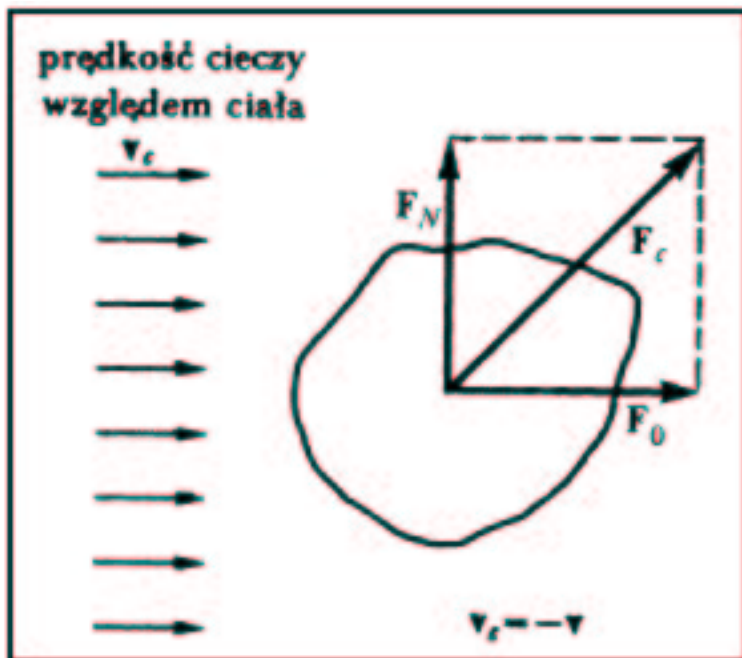


Ruch w ośrodku

Opór czołowy

Siły jakie działają na ciało poruszające się w ośrodku możemy podzielić na:

- siłę oporu czołowego $\vec{F}_o \updownarrow \vec{v}$
- siłę nośną $\vec{F}_N \perp \vec{v}$



Z analizy wymiarowej:

$$\vec{F}_o = -\vec{i}_v \frac{C}{2} \rho v^2 S \quad \text{wzór Newtona}$$

gdzie: v - prędkość ciała
 S - powierzchnia poprzeczna
 ρ - gęstość cieczy

C - bezwymiarowy współczynnik zależny od kształtu ciała, jego orientacji względem \vec{v} oraz **bezwymiarowej** kombinacji parametrów:

$$Re = \frac{v l \rho}{\eta}$$

Re - liczba Reynoldsa, l - wymiar poprzeczny

O.Reynolds (1883): skalowanie przepływów cieczy

Ruch w ośrodku

Opór czołowy

Dla ciała kulistego i $Re \ll 1$
istnieje ścisłe rozwiązanie problemu:
(G.Stokes 1851)

$$C = \frac{24}{Re}$$

$$\vec{F}_o = -6\pi\eta r \vec{v}$$

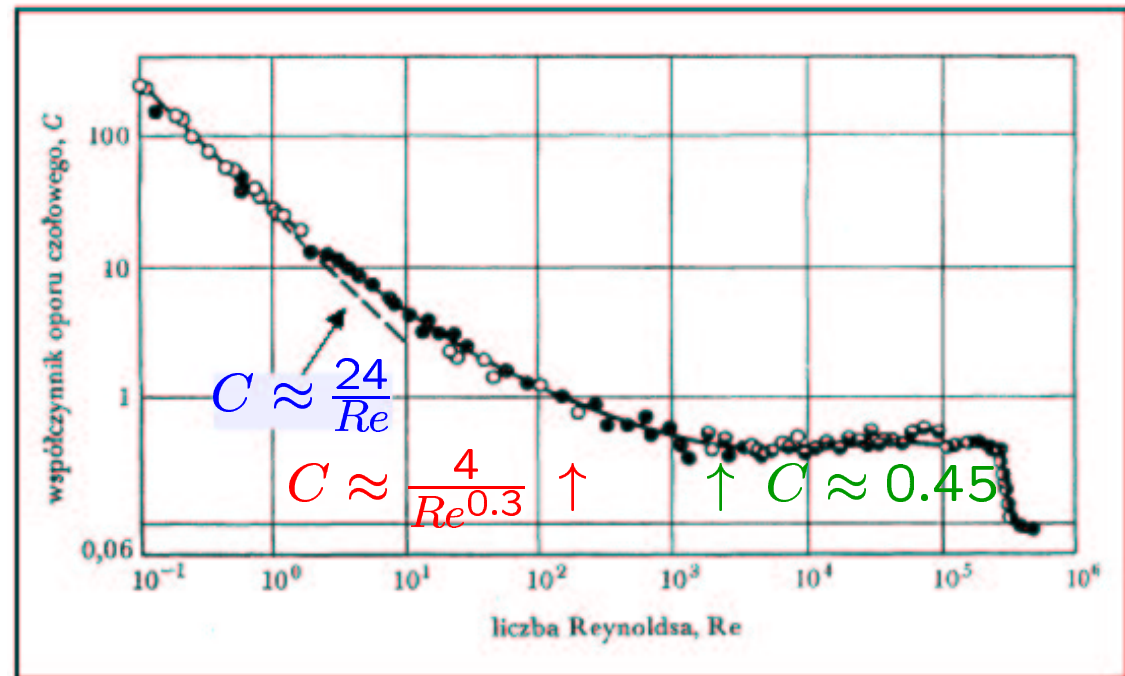
siła oporu proporcjonalna do v

W obszarze dużych wartości Re

$$C \approx \text{const}$$

$$F_o \sim v^2$$

Wyniki pomiarów współczynnika C dla kuli:



Ruch w ośrodku

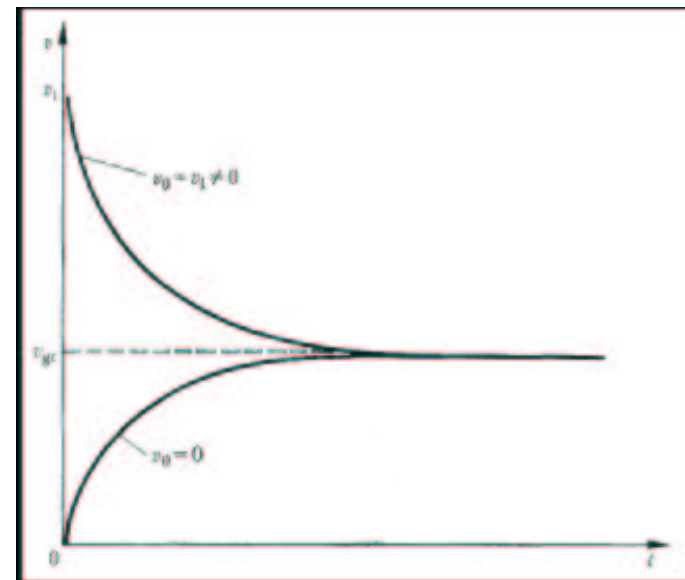
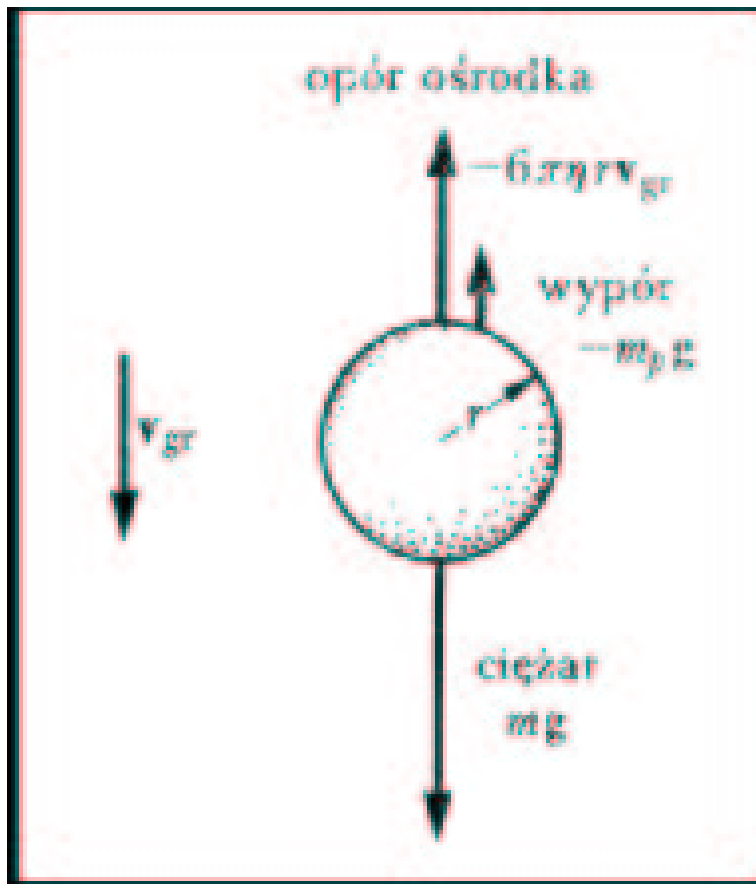
Prędkość graniczna

Równanie ruchu kuli spadającej w cieczy ($Re \ll 1$)

$$m\vec{a} = m\vec{g} - m_p\vec{g} - 6\pi\eta r\vec{v}$$

Rozwiązanie (ruch w pionie):

$$v(t) = v_{gr} + (v_0 - v_{gr}) \exp\left(-\frac{6\pi\eta r}{m} t\right)$$



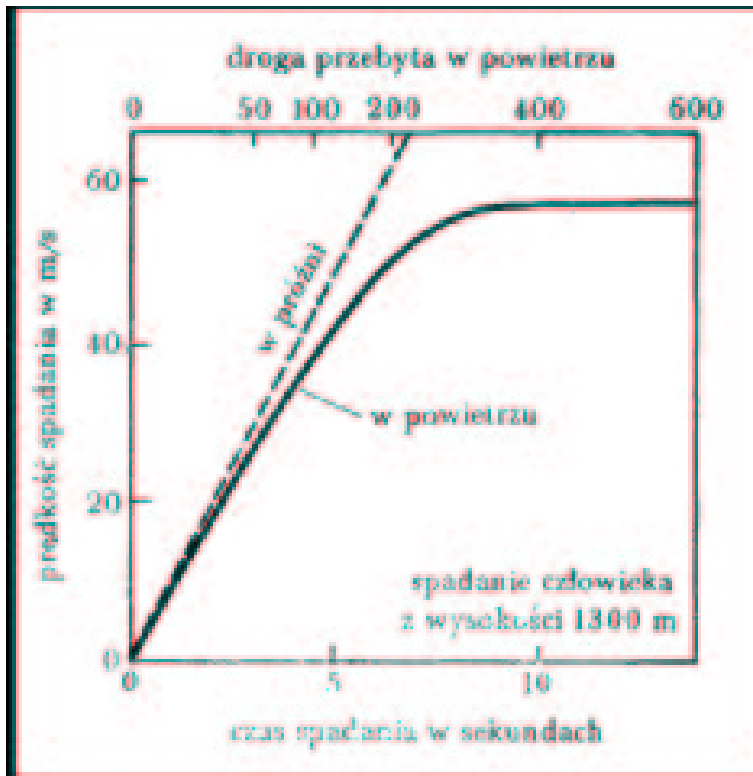
v_{gr} - prędkość graniczna

Ruch w ośrodku

Prędkość graniczna

Dla kuli spadającej w cieczy ($Re \ll 1$)

$$v_{gr} = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho - \rho_p)}{\eta}$$



Zależność od kształtu

Kula:

$$\begin{aligned}\vec{F}_o &= -6\pi \eta r \vec{v} \\ &\approx -18.8 \eta r \vec{v}\end{aligned}$$

Dysk ($\perp \vec{v}$):

$$\vec{F}_o = -16 \eta r \vec{v}$$

Dysk ($\parallel \vec{v}$):

$$\vec{F}_o = -\frac{32}{3} \eta r \vec{v}$$

Ruch w ośrodku

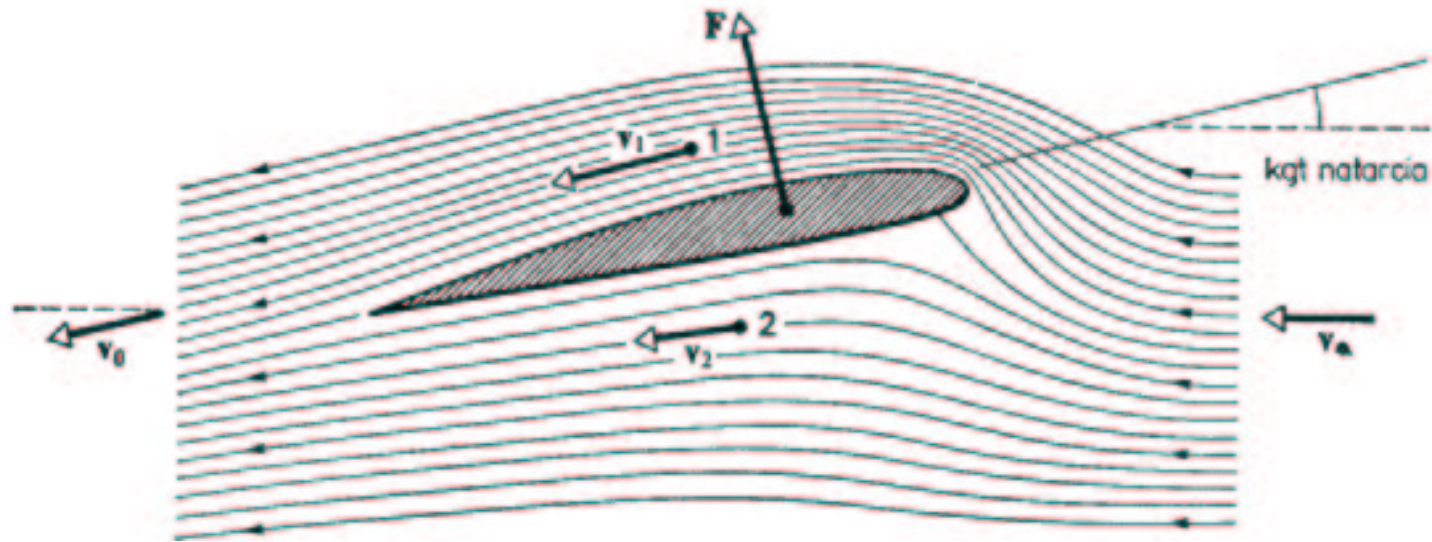
Prawo Bernouliego

Lepkość nie jest jedynym źródłem sił działających na ciało w ośrodku.

Prawo Bernouliego: $\rho gh + \frac{\rho v^2}{2} + p = const$

Ciśnienie cieczy (nacisk na jednostkę powierzchni ciała) jest mniejsze w obszarze większych prędkości opływania

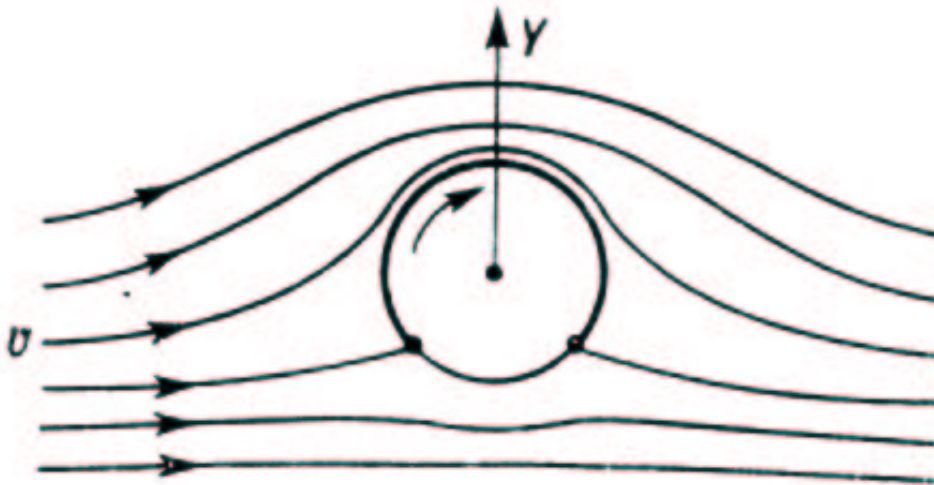
⇒ ciało jest “wciągane” w obszar większych prędkości



Ruch w ośrodku

Zjawisko Magnusa

Walec wirujący w przepływającej poprzecznie do osi obrotu cieczy lub gązie.



zgodne kierunki prędkości:

- ⇒ prędkość przepływu wzrasta
- ⇒ ciśnienie maleje

przeciwnie kierunki prędkości:

- ⇒ prędkość przepływu maleje
- ⇒ ciśnienie wzrasta

⇒ wypadkowa siła nośna $\vec{F}_N \perp \vec{v}$