

Opory ruchu

Wstęp do Fizyki I (B+C)

Wykład X:

- 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.

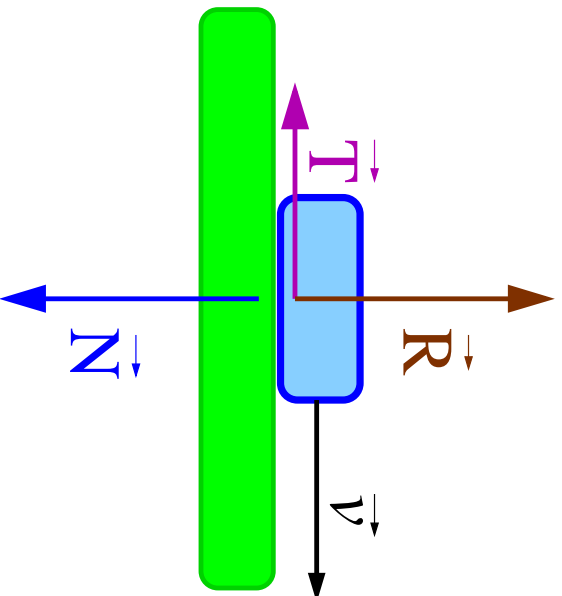
⇒ Prawo empiryczne:

$$\vec{T} = -\mu_k \vec{v}_0 N \quad \vec{v}_0 = -\frac{\vec{v}}{v}$$

Siła tarcia kinetycznego:

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

Prawo empiryczne ⇒ przybliżone !!!



Tarcie

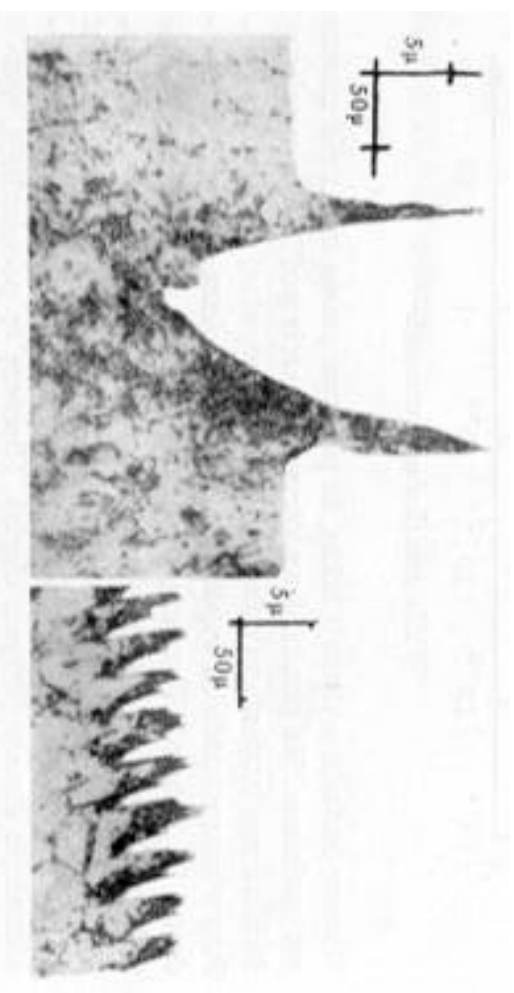
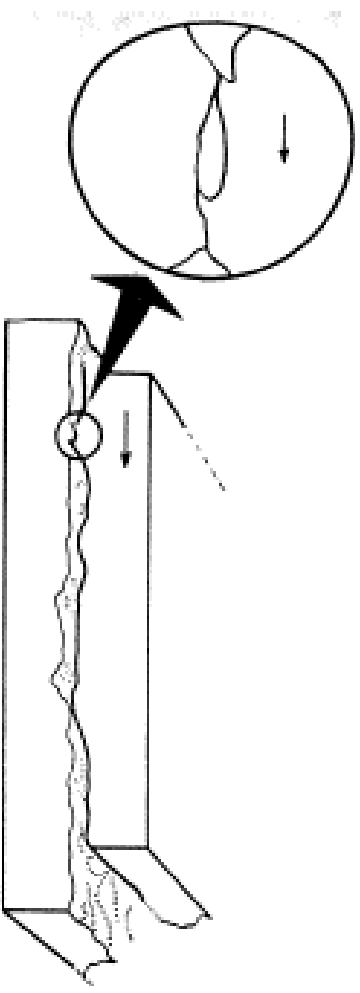
Obraz mikroskopowy

Tarcie wywołane jest przez oddziaływanie elektromagnetyczne cząstek stykających się się ciał.

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

⇒ **muszą zostać "odepchnięte"**

wypolerowana miedź ⇒

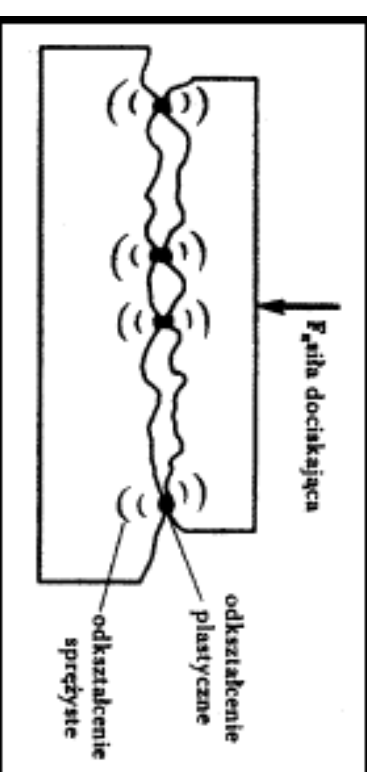


Tarcie

Zależność od nacisku

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

sila dociskająca	ułamek powierzchni
20 N	0.00001
50 N	0.000025
1000 N	0.0005
5000 N	0.0025



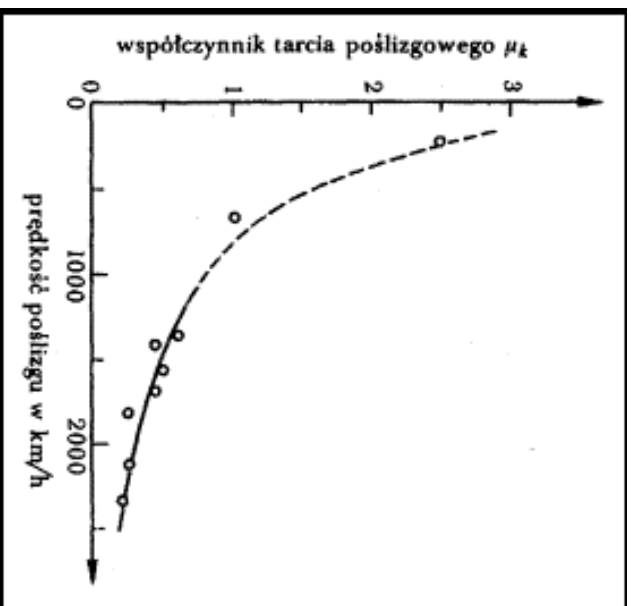
- ⇒ efektywna powierzchnia styku proporcjonalna do nacisku
- ⇒ liczba oddziaływań na poziomie atomowym proporcjonalna do nacisku

Tarcie

Odstępstwa od praw empirycznych

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

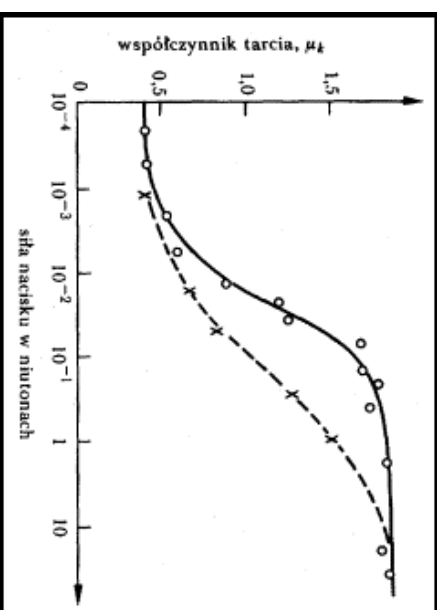
stal i miedź



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

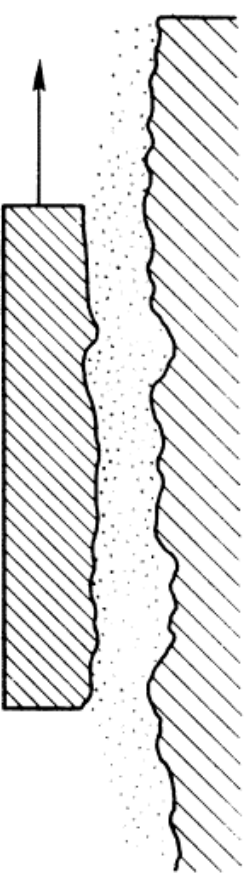
Na poziomie mikroskopowym tarcie prowadzi trwałych zmian w stykających się powierzchniach.

Fragmenty miedzi przyłączone do powierzchni stali:



Smarowanie

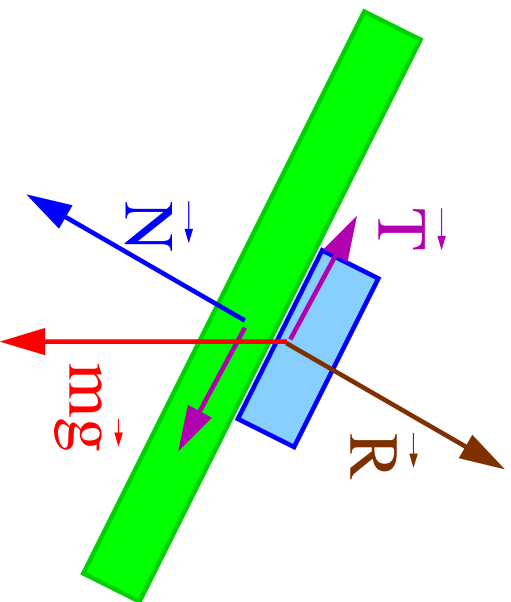
Tarcie zmniejszamy wprowadzając smar między poruszające się powierzchnie.



Powierzchnie nie stykają się ⇒ brak tarcia ⇒ 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, dociskanyimi siłą N .

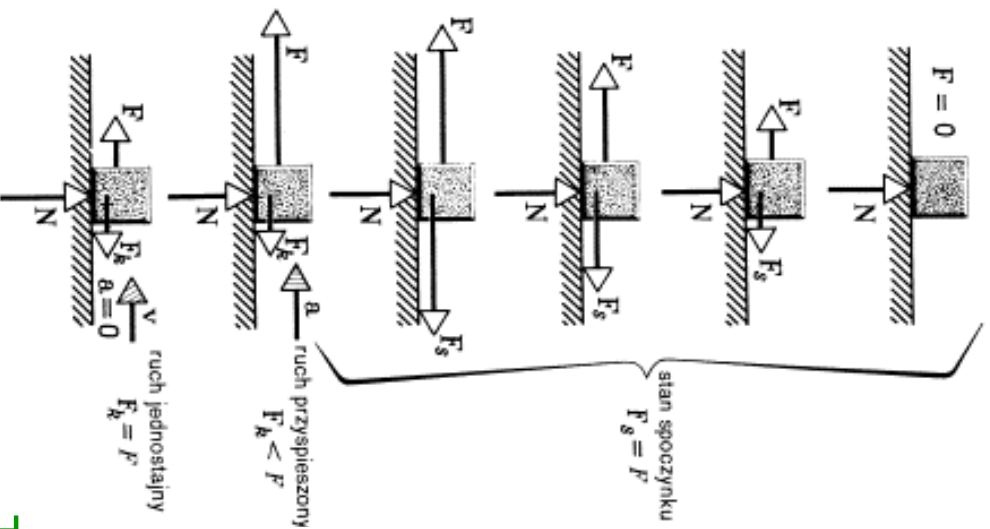
Maksymalna siła tarcia statycznego T_S^{max} jest równa najmniejszej sile F jaką należy przyłożyć do ciała, aby ruszyć je z miejsca.

Prawo empiryczne:

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

Tarcie

Tarcie statyczne

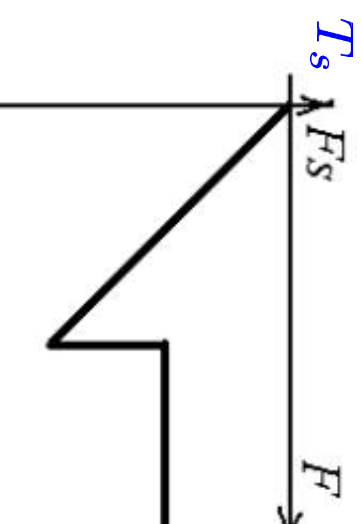


Póki przyłożona siła \vec{F} jest mała, tarcie statyczne utrzymuje ciało w spoczynku:

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

⇒ 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

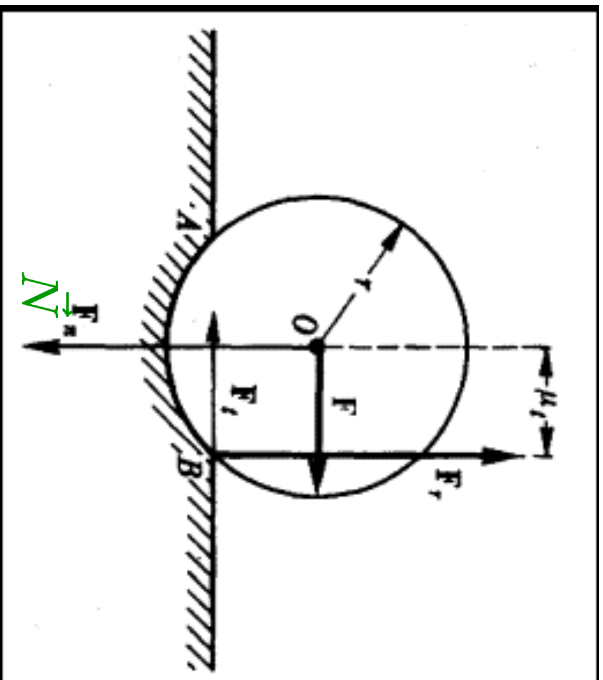
Hamowanie samochodu:

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 toczone



Toczące się ciało odkształca
zawsze powierzchnię po której
się toczy.

Poza tarcieciem statycznym i kinetycznym
(poślizgowym) mamy **tarcie toczone**:

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

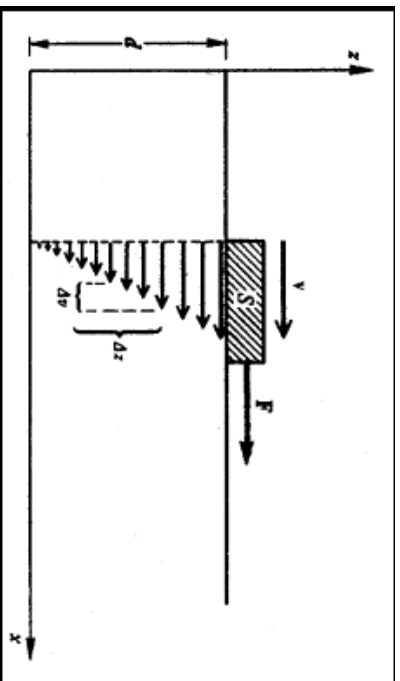
Współczynnik tarcia tocznego μ_t
jest zwykle bardzo mały

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:

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

gdzie: v - prędkość ciała

S - powierzchnia styku z cieczą

d - głębokość naczynia

η - współczynnik lepkości

Lepkość

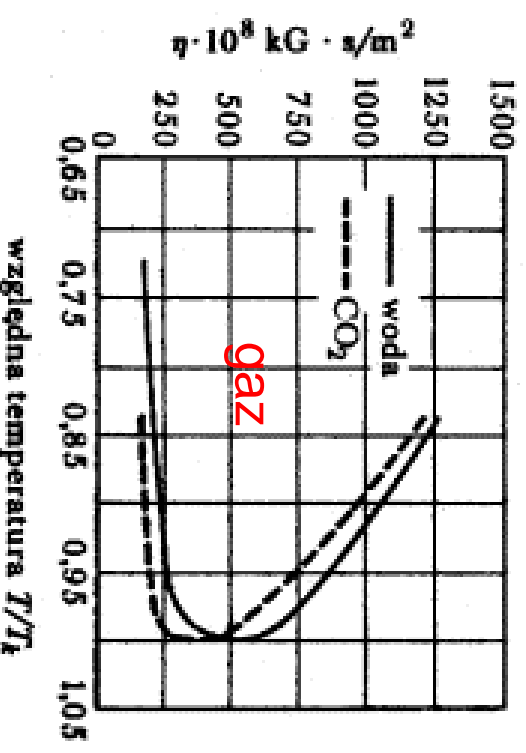
Typowe wartości:

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

ciecz

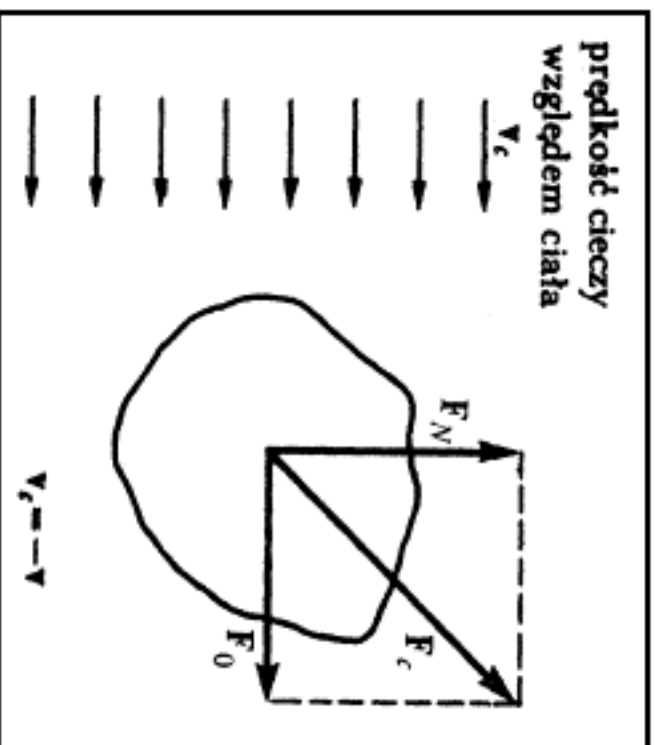


Ruch w ośrodku

Opór czołowy

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

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



Z analizy wymiarowej:

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

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)

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

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

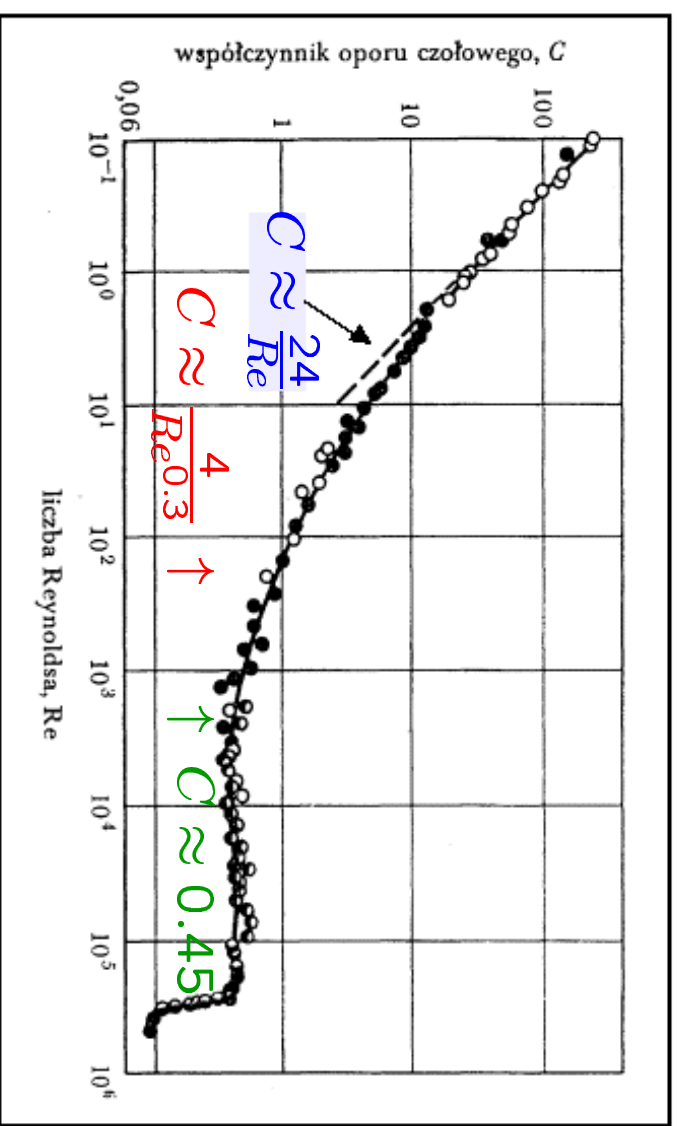
siła oporu proporcjonalna do prędkości

W obszarze dużych wartości Re

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

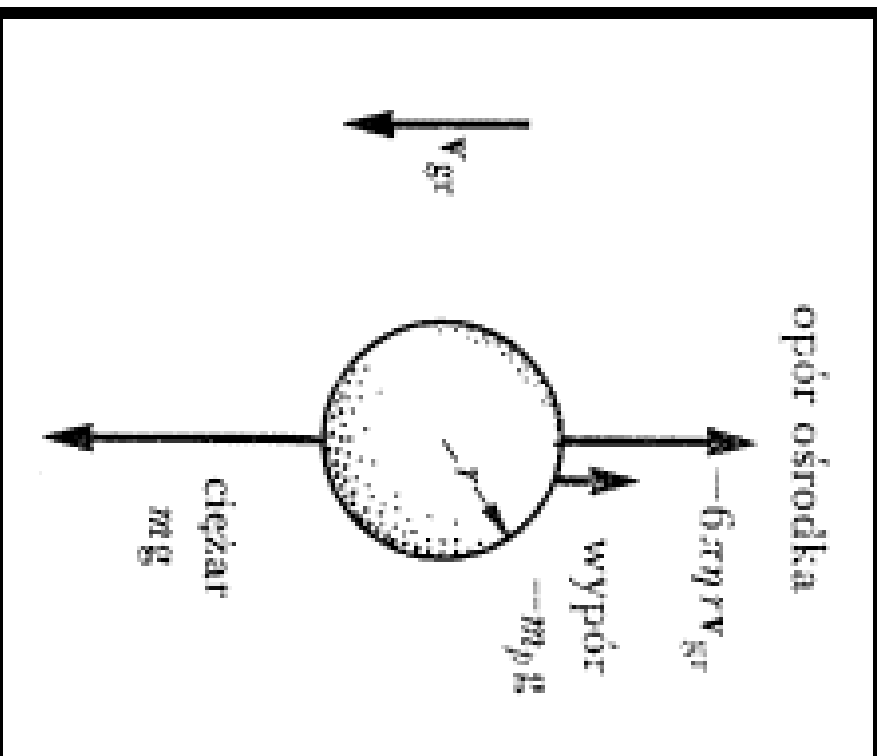
$$F_o \sim v^2$$

Wyniki pomiarów współczynnika C dla kuli:



Ruch w ośrodku

Prędkość graniczna

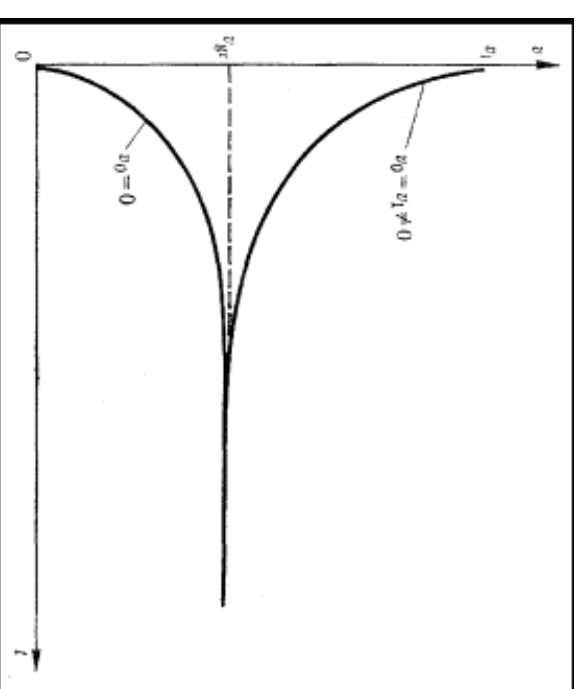


Równanie ruchu kuli spadającej w cieczy ($Re \ll 1$)

$$m\vec{a} = m\vec{g} - m\rho_0\vec{g} - 6\pi\eta r\vec{v}$$

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

Zależność od kształtu

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

Kula:

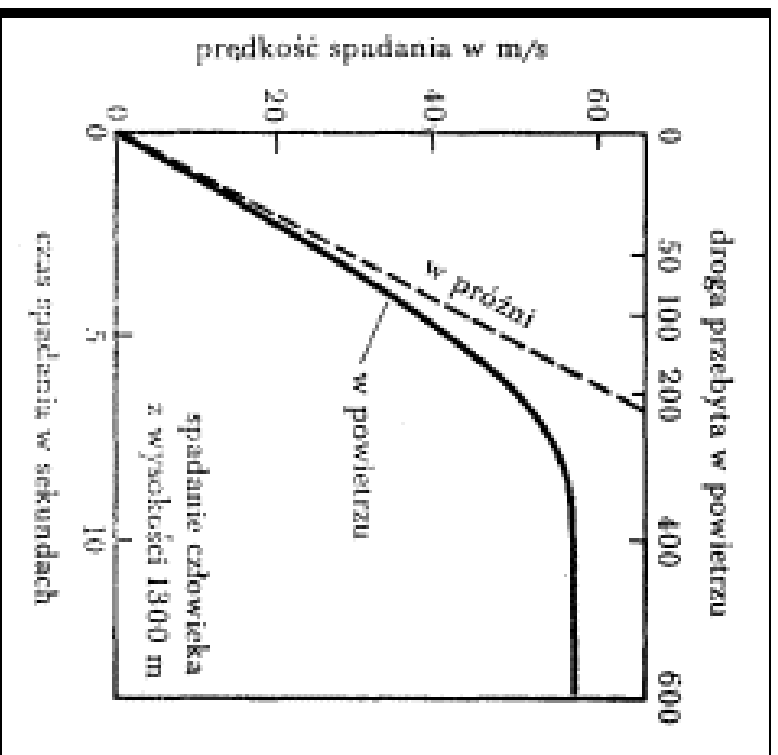
$$v_{gr} = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho - \rho_p)}{\eta}$$
$$\vec{F}_o = -6\pi \eta r \vec{v}$$
$$\approx -18.8 \eta r \vec{v}$$

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

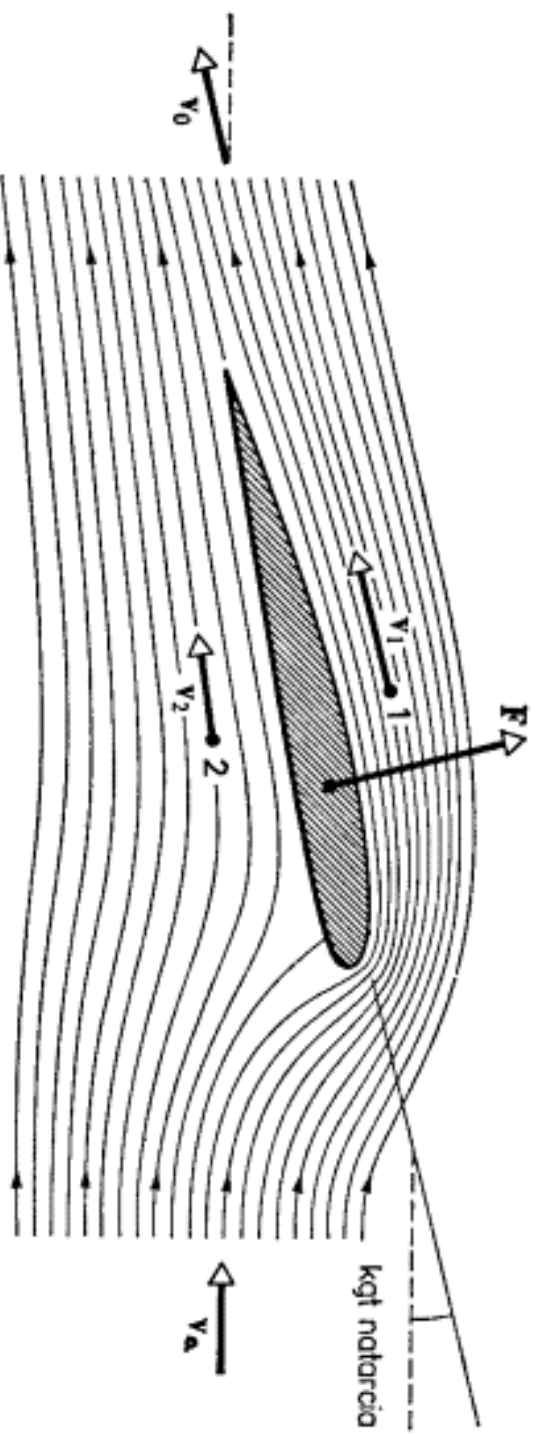
Prawo Bernoulliego

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

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

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

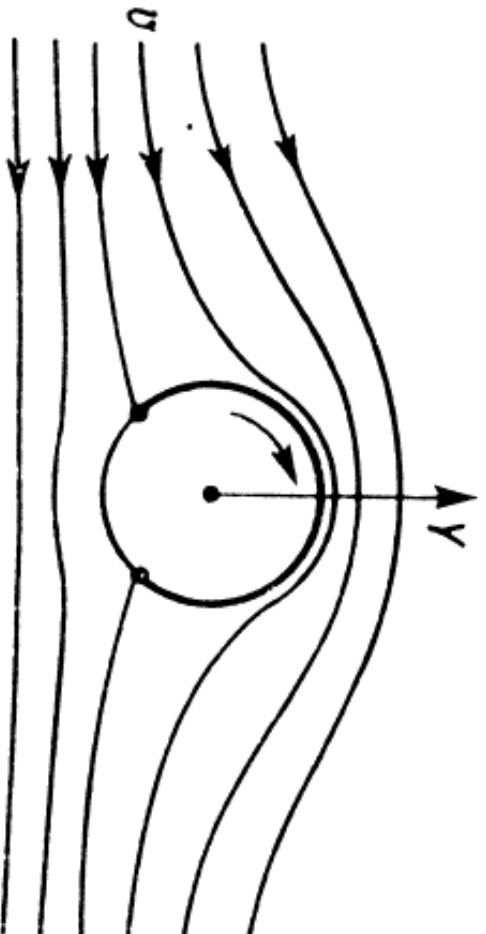
⇒ ciało jest “wciągane” w obszar większych prędkości



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 $\vec{F}_N \perp \vec{v}$