

8. OPORY RUCHU (6 stron)

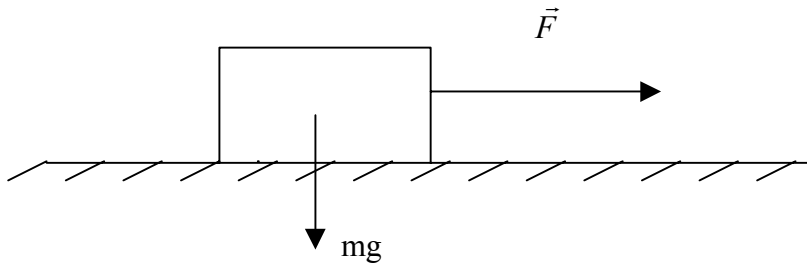
Wszystkie ciała poruszające się w naszym otoczeniu napotykać na mniejsze lub większe opory ruchu. *Sily oporu* są zawsze skierowane przeciwnie do kierunku wektora prędkości ciała i starają się powstrzymać jego ruch.

$$m\vec{a} = \vec{F} - \frac{\vec{v}}{v}\vec{F}_r$$

Opory ruchu występują zawsze wówczas, gdy badane ciało ślizga się lub toczy po powierzchni innych ciał lub też, gdy poruszają się w ośrodkach takich, jak ciecze i gazy, które łącznie będziemy nazywali *plynami*.

• Tarcie zewnętrzne.

Rozważmy najpierw ruch ciała w obecności *tarcia zewnętrznego*. Wyobraźmy sobie następujące doświadczenie:



Jeżeli siła F jest mała, to ciało pozostaje w spoczynku. Oznacza to, że siłę F równoważy inna siła $F_t = F$

Zwiększając siłę F osiągamy taki moment, kiedy ciało zaczyna się poruszać. Siła tarcia osiąga wówczas *wartość maksymalną*.

Prawa tarcia mają charakter czysto doświadczalny.

1. Siła tarcia między dwoma ciałami jest *proporcjonalna do siły normalnej* utrzymującej te ciała w zetknięciu (tzw. siła nacisku) $F_t = \mu F_n$ gdzie μ - współczynnik tarcia. Przy danej sile normalnej F_n siła tarcia poślizgowego *nie zależy od powierzchni* zetknięcia między dwoma ciałami.
2. Siła tarcia występującej w momencie, gdy ciało zaczyna się poruszać. Trzeba więc wprowadzić dwa współczynniki tarcia – współczynnik *tarcia statycznego* i współczynnik *tarcia kinetycznego*.
Na ogół: $\mu_s > \mu_k$ a więc siła potrzebna do *wprowadzenia ciała w ruch* jest na ogół większa od siły potrzebnej do utrzymania go w ruchu jednostajnym.
3. Z doświadczenia wynika też, że *dla niezbyt dużych prędkości ruchu* współczynnik tarcia kinetycznego *nie zależy od prędkości* ślizgającego się ciała.

Współczynnik tarcia posuwistego jest bezwymiarowy.

Źródłem siły tarcia są mechaniczne opory ruchu oraz oddziaływania międzycząsteczkowe występujące między drobinami obu stykających się ciał. Wartość współczynnika tarcia zależy od rodzaju oraz jakości (gładkości) stykających się powierzchni. W skrajnych przypadkach może on przybierać wartości nawet znacznie większe od jedności. Wynika to z dominacji dużych sił oddziaływania międzycząsteczkowego, zwłaszcza podczas braku warstwy powietrza między trącymi powierzchniami.

Współczynniki tarcia posuwistego niektórych materiałów (Lichsztełd, Kruk)

Materiał	Współczynnik tarcia	
	statycznego	dynamicznego
Główka kości po panewce stawu u zdrowego człowieka	0,003	0,003
Stal po lodzie	0,027	0,014
Stal po teflonie	0,09	0,04
Stal po stali	0,15 + 0,60	0,10
Stal po szkłe	0,19	0,10
Skóra po metalu	0,60	0,25
Drewno po drewnie	0,60	0,30-0,60
Metal po drewnie	0,20 ÷ 0,60	0,20 ÷ 0,60
Guma po metalu	1 ÷ 4	0,50-1,0
Dwa bardzo czyste i gładkie kawałki metalu w próżni	1 ÷ 100	1 ÷ 100

- **Mechanizm tarcia poślizgowego.**

Wyjaśnienie istoty fizycznej tarcia jest zagadnieniem dość trudnym. Przyjmuje się, że tarcie jest spowodowane oddziaływaniami molekularnymi między cząsteczkami stykających się ciał. W tym sensie tarcie można sprowadzić do oddziaływań elektromagnetycznych.

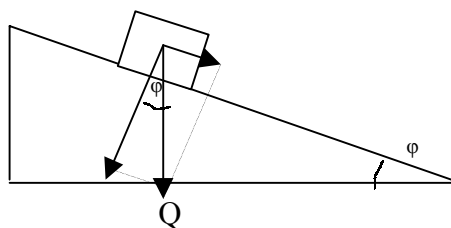
W ogólnym przypadku nie jest jednak możliwe uwzględnienie indywidualnych oddziaływań między cząsteczkowych. Wprowadza się zatem pojęcie sił tarcia jako rozumiana statystycznie średnią bardzo wielu oddziaływań molekularnych.



Gdy przyłożymy do siebie dwie oczyszczone i suche powierzchnie, np. metalowe, to kontakt między nimi zachodzi tylko na bardzo małych obszarach. W tych miejscach „styku” działają siły molekularne zwane siłami spójności. W miejscach tych działają wielkie ciśnienia powodujące odkształcenia plastyczne i tworzenie się trwałych połączeń. Gdy ciała zaczynają się względem siebie poruszać, zachodzi zrywanie tych połączeń. Atomy lub cząsteczki rozłączają się i zaczynają drgać, co powoduje po pewnym czasie ogrzanie się obu ciał.

Rzeczywista powierzchnia styku jest wprost proporcjonalna do normalnej siły dociskającej i nie zależy od geometrycznej powierzchni styku.

Inne proste doświadczenie.



$$F_s = Q \sin \varphi$$

$$F_t = \mu Q \cos \varphi$$

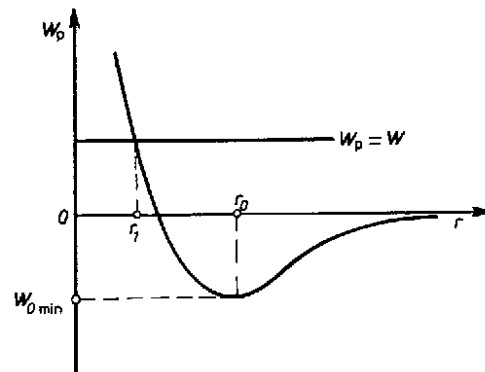
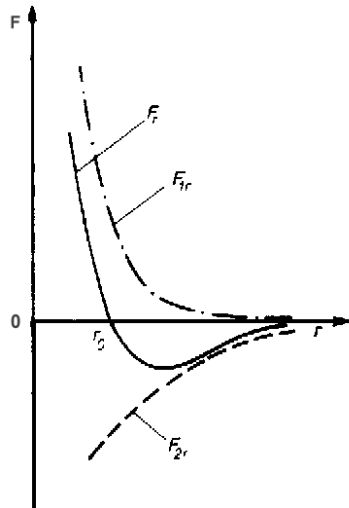
Na płaszczyźnie lekko odchylonej od poziomu znajduje się klocek o ciężarze Q . Powoli zwiększamy kąt nachylenia płaszczyzny φ , aż do momentu, kiedy klocek zacznie się zsuwać. Dla takich φ_0 , przy których ciało zsuwa się ze stałą prędkością $F_s = F_t$ a stąd $\mu = \tan \varphi_0$

Kąt, przy którym ciało zacznie się zsuwać powinien być niezależny od jego ciężaru. Warto zauważyć, że w tym doświadczeniu jeżeli nachylimy płaszczyznę pod pewnym kątem bliskim φ to ciało nie zsuwa się ruchem jednostajnym lecz to zwalnia to przyspiesza. Widać, że współczynnik φ zmienia się lokalnie w zależności od twardości, gładkości i stopnia zanieczyszczenia powierzchni.

Widać zatem, że wszystkie podawane w tablicach współczynniki tarcia dla styku np. miedź-miedź lub stal-stal są przybliżone.

Ciekawy efekt otrzymuje się przy bardzo dokładnym oczyszczeniu i oszlifowaniu obu powierzchni takich samych ciał i przyłożeniu ich do siebie w próżni. Współczynnik tarcia jest wówczas wielokrotnie większy. Powoduje to fakt, że następuje kontakt między atomami tego samego rodzaju. Występują bardzo duże siły, te same, które utrzymują atomy w jednym kawałku jako ciało stałe. Nazywamy je siłami molekularnymi.

Sił molekularnych nie można wyjaśnić w zadowalający sposób na poziomie fizyki klasycznej. Dopiero mechanika kwantowa pozwala je zrozumieć. Są one wypadkową oddziaływań wszystkich elektronów i jąder jednej cząsteczki z wszystkimi elektronami i jądrami drugiej. Można przedstawić poglądowo siłę oddziaływania (rys. lewy) oraz energię potencjalną (rys. prawy) między dwoma atomami lub cząsteczkami w funkcji ich wzajemnej odległości r .



Przebieg tych funkcji zależy od rodzaju cząsteczek. Inaczej oddziałują na siebie cząsteczki, których środki mas ładunków dodatnich i ujemnych pokrywają się, a inaczej cząsteczki, w których są one przesunięte względem siebie jak np. w cząsteczkach wody. Cząsteczki takie, nazywane cząsteczkami spolaryzowanymi, oddziałują na siebie większymi siłami.

Na cząsteczki nie spolaryzowane oddziałuje siła przyciągająca, która na większych odległościach jest proporcjonalna do kr^{-7}

Gdy atom lub cząsteczka zbliżą się za bardzo do siebie, zaczynają się odpychać.

W pewnej odległości r_0 siły się zerują, co oznacza, że istnieje tam stan równowagi.

Przy niewielkiej zmianie odległości w pobliżu r_0 można przyjąć, że siły oddziaływania są proporcjonalne do Δr . Jest to zakres, w którym odkształcenia ciał opisywane są prawem Hooke'a, czyli prawem sprężystości:

Siła starająca się przywrócić ciału pierwotny kształt jest proporcjonalna do odkształcenia.

Tarcie wewnętrzne

Inne własności ma opór jakiego doznają ciała poruszające się w gazach lub cieczach. Na przykład na lecący samolot oddziałuje powietrze opływające skrzydła i kadłub, duży wpływ mają tworzące się z tyłu wiry, czyli tzw. turbulencje. Dokładny opis tych zjawisk jest bardzo skomplikowany. Można natomiast stwierdzić, że opór powietrza jest w przybliżeniu proporcjonalny do kwadratu prędkości:

$$F = cv^2$$

Prawo to jest typowym prawem empirycznym opisującym skutek działania wielu trudnych do określenia czynników. Siła działająca na cały samolot nie jest np. równa sumie sił, które działałyby na jego części poruszające się osobno.

Przy mniejszych prędkościach opór powietrza staje się raczej zależny liniowo od prędkości:

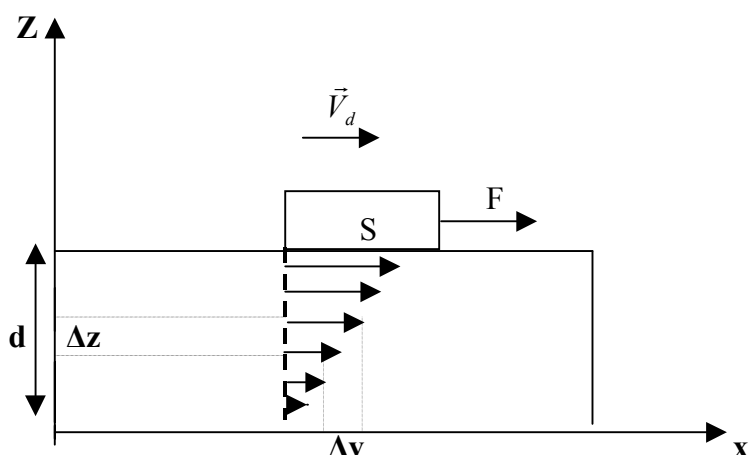
$$F = kv$$

Związane jest to z bardziej regularnym, tzw. laminarnym opływaniem ciała przez powietrze.

- **Ruch ciał w płynach**

Zagadnienie oporów, które występują przy ruchu ciał w cieczach i gazach, ma duże znaczenie praktyczne, gdyż zjawisko to obserwujemy na co dzień – wszystkie ciała w naszym otoczeniu poruszają się w powietrzu. Występowanie oporów ruchu w płynach wiąże się z lepkością tych substancji.

1. **Ciała ciągnięte po powierzchni cieczy:**



Z doświadczenia wynika, że siła oporu wynosi:

$$F_L = \eta \frac{v_d}{d} S$$

Zjawisko to polega na tym, że warstewka cieczy przylegająca bezpośrednio do deski jest przez nią pociągana z prędkością v_d , natomiast warstewka cieczy przylegająca do dna naczynia pozostaje w spoczynku. Warstwy pośrednie poruszają się z prędkościami $v < v_d$. W cieczy wytwarza się więc gradient prędkości. Warstwy cieczy, których głębokości różnią się o Δz mają różnicę prędkości Δv , przy czym:

$$\frac{\Delta v}{\Delta z} \approx \frac{v_d}{d}$$

Sąsiednie warstwy cieczy ślizgają się po sobie i występuje przy tym opór. Występowanie oporów przy ruchu względnym warstw płynu nazywamy tarcie wewnętrzne.

2. **Ruch ciał zanurzonych w płynie:**

W przypadku poruszania się ciał zanurzonych w płynie zależności są dość skomplikowane, zależne od kształtu poruszającego się ciała. W przybliżeniu

$$F \sim k\eta v$$

przy czym k jest zależne od kształtu poruszającego się ciała a współczynnik lepkości η od własności ośrodka.

Dla ciał o kształcie kulistym siła oporu dana jest wzorem Stokesa:

$$F_L = 6\pi\eta r v$$

Przykład:

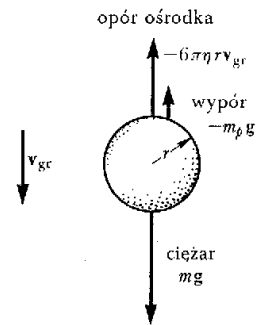
Ruch kuli spadającej w płynie pod wpływem siły ciężkości.

Na kulę działają siła ciężkości, siła wyporu cieczy i siła oporu spowodowana lepkością

$$F = mg - m_r g - 6\pi\eta r v$$

$$ma = F_0 - kv$$

F_0 - suma stałych sił

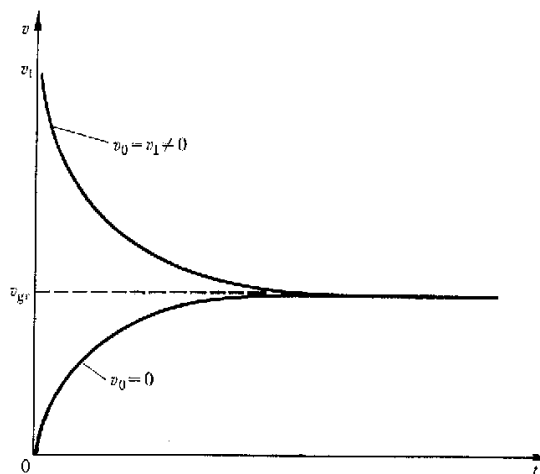


Kula spadająca w płynie pod wpływem siły ciężkości osiąga prędkość graniczną v_{gr} i porusza się ruchem jednostajnym niezależnie od prędkości początkowej. Wówczas siła ciężkości $F = mg$ jest równoważona przez sumę siły wyporu (siły Archimedes) $F_A = -m_r g$ oraz siły oporu czołowego $F_0 = -6\pi\eta r v_{gr}$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_0}{m} - \frac{k}{m} v$$

Otrzymaliśmy równanie różniczkowe opisujące ruch kuli. Rozwiązaniem tego równania jest funkcja

$$v(t) = \frac{F_0}{k} \left[1 - \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \right]$$



$$v(0) = 0$$

$$v \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \frac{F_0}{k}$$

Widać, że prędkość ciała zmienia się aż do momentu kiedy siła oporu, która jest proporcjonalna do prędkości, stanie się równa co do wartości wypadkowej pozostałych sił. Od tego momentu ciało porusza się ze stałą prędkością, równą prędkości granicznej v_{gr} .