

Paradoks kapilarny

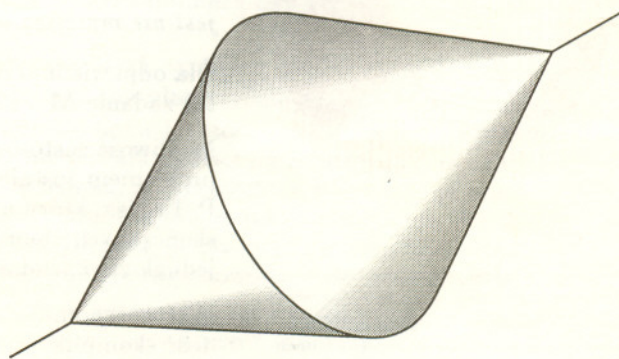
Zapewne każdy z Czytelników *Delty* zna następujące proste, a efektowne doświadczenie: z dwóch listewek budujemy równię pochyłą w postaci szyn rozszerzających się ku górze; następnie kładziemy na nich bryłę o kształcie dwóch jednakowych stożków złączonych podstawami. Przy odpowiedniej geometrii układu bryła będzie się toczyć pod górę! Wytłumaczenie tego paradoksu jest proste. Ponieważ szyny rozszerzają się ku górze, położenie środka masy toczącej się pod górę bryły obniża się, a zatem maleje jej energia potencjalna.

Podobny paradoks ma także miejsce w fizyce cieczy. Jeśli do szklanej rurki o kształcie stożka wpuścimy trochę wody i rurkę ustawimy pionowo, węższym końcem ku górze, może się okazać, że woda zamiast wyciekać z rurki, będzie się przemieszczać do góry!

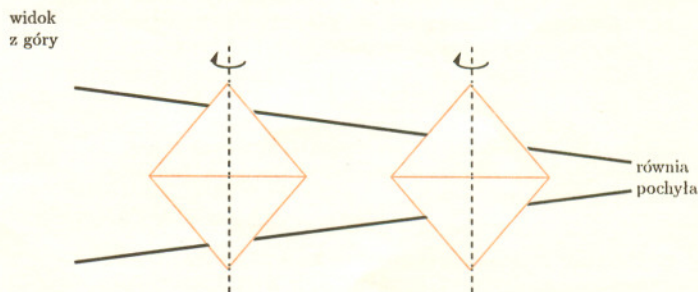
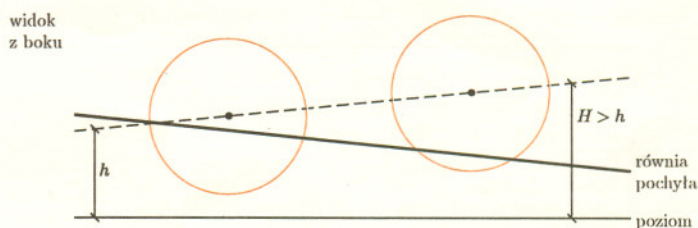
Takie zachowanie się wody możemy łatwo wytłumaczyć, jeśli pamiętamy o zjawiskach kapilarnych. Woda w kontakcie ze szkłem tworzy menisk wklęsły (w naszym przypadku będą to dwa meniski). Ciśnienie cieczy pod powierzchnią menisku wklęsłego jest niższe od ciśnienia atmosferycznego. Różnica obu tych ciśnień jest równa

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta,$$

gdzie r jest promieniem krzywizny menisku (jest on proporcjonalny do promienia rurki), σ – napięciem powierzchniowym na granicy woda-powietrze, a θ – kątem zwilżania szkła przez wodę. W górnej części rurki, gdzie jej promień jest mniejszy, mniejszy jest także promień krzywizny menisku, a zatem większa jest różnica ciśnień.



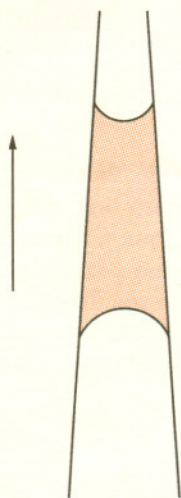
Rys. 1



Rys. 2. Bryła pozornie toczy się pod górę, ale jej środek ciężkości obniża się.



Rys. 3. Woda w rurce kapilarnej, θ – kąt zwilżania, r – promień krzywizny menisku.



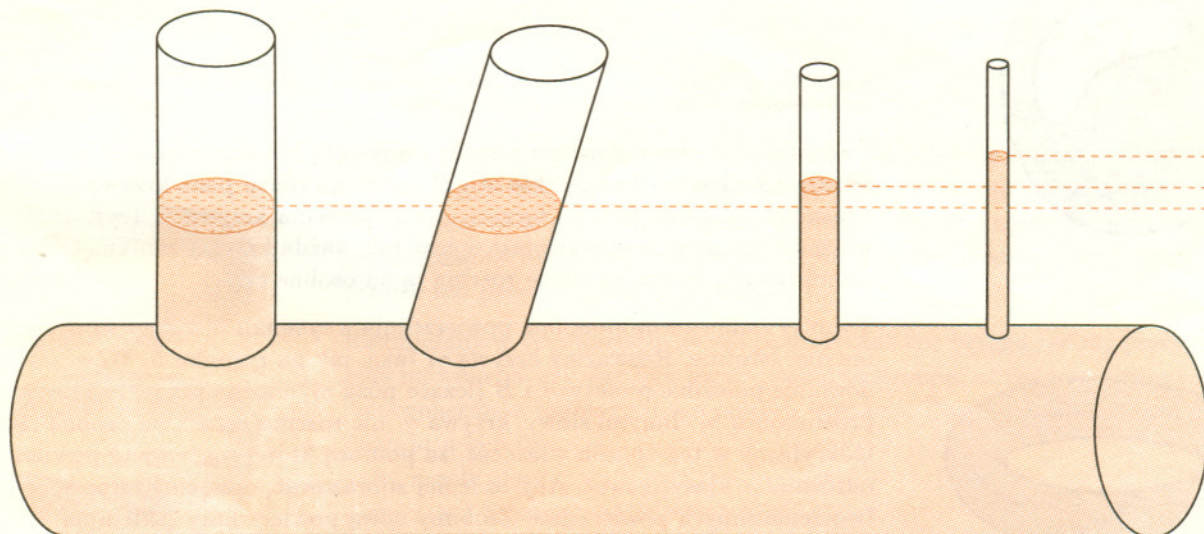
Rys. 4. Ruch wody w zwężającej się ku górze rurce kapilarnej.

Na każdy z menisków działa skierowana do wnętrza cieczy wypadkowa siła parcia. Siły te zależą nie tylko od różnicy ciśnień po obu stronach powierzchni, ale i od pola powierzchni menisku. Różnica ciśnień jest odwrotnie proporcjonalna do promienia rurki, pole powierzchni zaś jest proporcjonalne do kwadratu promienia, tak więc siła parcia jest proporcjonalna do promienia rurki, czyli jest większa w szerszej, dolnej części. Wartość współczynnika proporcjonalności nie jest szczególnie istotna, choć przy odrobinie wprawy można go obliczyć. Tak więc na wodę działa wypadkowa siła parcia skierowana pionowo do góry i może być ona większa niż ciężar wody, a wtedy wbrew sile grawitacji woda będzie się przemieszczać ku górze.

Możemy na to popatrzeć także z innego punktu widzenia. To, że woda w kontakcie ze szkłem tworzy menisk wklęsły, wynika z faktu, że oddziaływania przyciągające między cząsteczkami wody i szkła są silniejsze niż oddziaływania między samymi cząsteczkami wody. W konsekwencji napięcie powierzchniowe na granicy woda-szkło jest mniejsze niż napięcie powierzchniowe na granicy woda-powietrze. Oznacza to, że energia powierzchniowa wody (a dokładniej: powierzchniowa energia swobodna) jest tym mniejsza, im większa jest powierzchnia kontaktu wody ze szkłem. Minimalizując swoją energię powierzchniową woda będzie się przemieszczać ku górze. Wprawdzie różnie wtedy potencjalna energia grawitacyjna, ale w sumie takie zachowanie się może być opłacalne.

W ten sam sposób można wytłumaczyć to, że jeśli w naczyniach połączonych jedno z ramion jest kapilarą, to poziom wody w tym ramieniu jest wyższy niż w pozostałych (rys. 5). Położenie równowagi odpowiada minimum energii, do której istotny wkład dają energia powierzchniowa i potencjalna energia grawitacyjna. Woda podnosi się w rurce kapilarnej zmniejszając energię powierzchniową, aż znajdzie się w położeniu równowagi.

A jak w zwężającej się rurce kapilarnej będzie się zachowywać rtęć?



Rys. 5