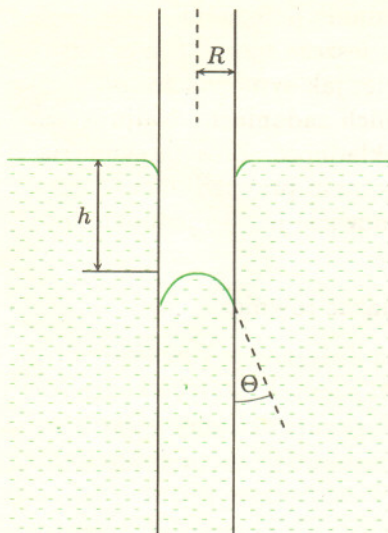


Pływanie sitem

Krzysztof REJMER



Rys. 1. Zjawisko kapilarne z meniskiem wypukłym. Ciśnienie cieczy pod zakrzywioną powierzchnią jest większe od ciśnienia atmosferycznego. Ta nadwyżka ciśnienia jest równoważona przez ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy o wysokości h . Zgodnie z prawem Laplace'a

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

gdzie R jest promieniem rurki, a σ współczynnikiem napięcia powierzchniowego cieczy. Mechaniczna równowaga wymaga, by

$$\Delta p = \rho gh,$$

gdzie ρ jest gęstością cieczy.

Wyłynęli na morze zwykłym Sitem, o Boże,
Popłynęli Sitem w siną dal!
Wbrew przestrogom przyjaciół (Rodzin też oczywiście),
Rankiem ósmego grudnia, w wyciu wichru i świcie
Popłynęli Sitem w siną dal!
A gdy Sito się dziko kolebało na fali,
I wołano im z brzegu: „Wyście powariowali!”
Oni tak odkrzyknęli: „Nasze Sito nieduże,
Ale niech się wypchają huragany i burze –
My płyniemy Sitem w siną dal!”

Edward Lear „Dziąble”
tłum. Stanisław Barańczak

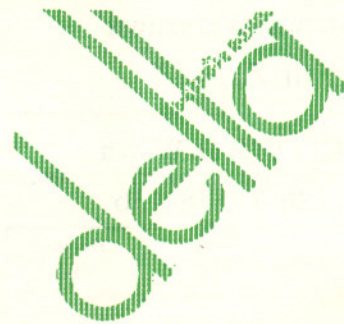
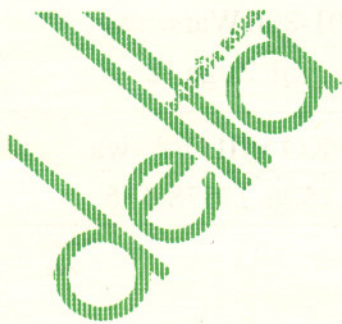
Edward Lear, z którego wiersza pochodzi ten cytat, uważany jest za mistrza poezji absurdu, jednak możliwość pływania w sicie nie jest nonsensem, choć zrealizowanie tego śmiałego projektu byłoby dość trudne! Warunki pływania sita są dwa: jego oczka nie mogą być zbyt duże, a woda nie może zwilżać siatki. Chcąc pływać sitem, musimy je odpowiednio przygotować, na przykład zanurzyć w płynnej parafinie. Może to spowodować zaklejenie wszystkich oczek sita. W tej sytuacji, aby sito było sitem, musimy ogrzać je nad świecą.

Powszechnie znane są zjawiska kapilarne. Jeśli ciecz nie zwilża ścianek, jej poziom w rurce jest niższy niż w naczyniu, do którego zanurzono koniec rurki (rys. 1). Przyczyną tego jest działanie sił napięcia powierzchniowego,

Prenumerata „Deltą”
za okres:

Prenumerata „Deltą”
za okres:

Prenumerata „Deltą”
za okres:

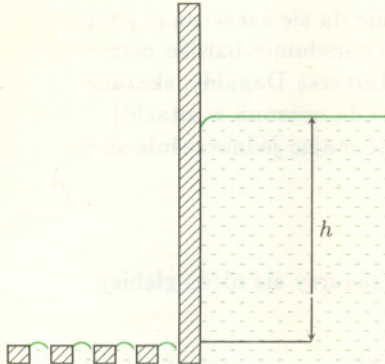


zwiększających ciśnienie pod wypukłą powierzchnią cieczy. Każde z oczek sita jest niczym innym, jak bardzo krótką rurką o małej średnicy, w każdym oczku sita powstaje menisk wypukły (rys. 2), jeśli tylko woda nie zwilża sita.

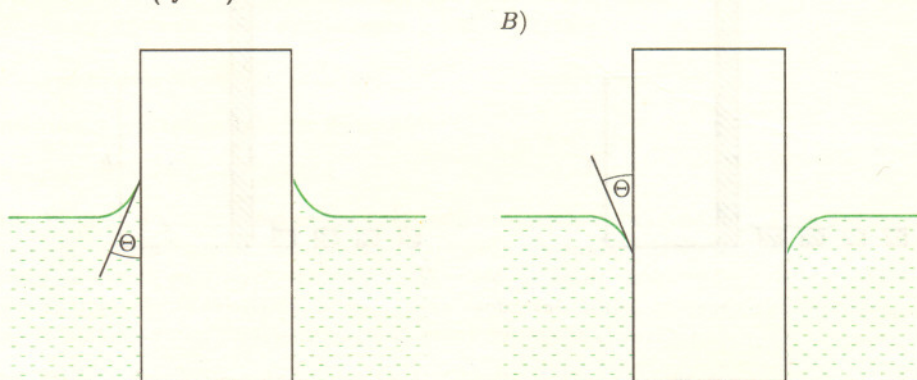
Zajmiemy się teraz siłami działającymi na sito. Oczywiście, działa na nie siła ciężkości $P = mg$ oraz siła wyporu, której wartość wynosi:

$$F_w = \Delta p \cdot S_s = \frac{2\sigma}{R} S_s \cos \theta,$$

gdzie S_s jest hydrostatycznie czynnym polem powierzchni sita, to znaczy całkowitym polem powierzchni S pomniejszonym o pole powierzchni otworków. Na sito działa jeszcze jedna siła skierowana (w przypadku cieczy niezwilżającej) pionowo do góry, a więc wspomagająca siłę wyporu, jej źródłem jest napięcie powierzchniowe (rys. 3).



Rys. 2. Jeśli ciecz nie zwilża sita, w każdym jego oczku powstaje menisk wypukły.



Rys. 3. Na pływające ciało działają nie tylko siły ciężkości i wyporu hydrostatycznego, ale dodatkowo siła wynikająca z istnienia napięcia powierzchniowego. Składowa pionowa tej siły ma wartość $\sigma L \cos \theta$, gdzie L jest obwodem pływającego ciała. Kąt θ (kąt $90^\circ - \theta$ w przypadku (B)) nazywany jest kątem zwilżania. Jeśli ciecz zwilża powierzchnię pływającego ciała (A), siła ta zmniejsza siłę wyporu. Jeśli ciecz nie zwilża powierzchni pływającego ciała (B), siła ta zwiększa siłę wyporu. Najczęściej siła ta jest znikomo mała w porównaniu z ciężarem i siłą wyporu. Natomiast dla ciał o małej masie i dużym obwodzie może ona mieć wartość na tyle dużą, że nie można o niej zapomnieć.

Zwykle jest ona pomijana, ponieważ jest bardzo mała w porównaniu z pozostałymi siłami działającymi na pływające ciało, jednak w przypadku sita o bardzo wielu otworkach jest wystarczająco duża, byśmy musieli ją uwzględnić. Siłę pochodzącą od napięcia powierzchniowego, działającą na zewnętrznym obwodzie sita, szczęśliwie możemy zaniedbać. Ta dodatkowa siła dla jednego otworka ma wartość

$$F_\sigma = 2\pi R \sigma \cos \theta = \frac{2\sigma}{R} S_{otw}^1 \cos \theta,$$

gdzie S_{otw}^1 jest polem powierzchni oczka sita (dla prostoty przyjmijmy, że wszystkie otworki są kołami o promieniu R). Mnożąc jej wartość przez liczbę oczek i dodając do hydrostatycznej siły wyporu otrzymamy efektywną siłę wyporu działającą na sito

$$F_w^{ef} = \frac{2\sigma}{R} (S_s + S_{otw}) \cos \theta = \frac{2\sigma}{R} S \cos \theta,$$

gdzie S_{otw} jest łącznym polem powierzchni oczek sita. Siła ta musi równoważyć ciężar sita i płynących w nim Dziaźbli:

$$mg = \frac{2\sigma}{R} S \cos \theta.$$

Głębokość, na jaką zanurzy się sito, możemy obliczyć z równania

$$\rho g h = \frac{2\sigma}{R} \cos \theta.$$

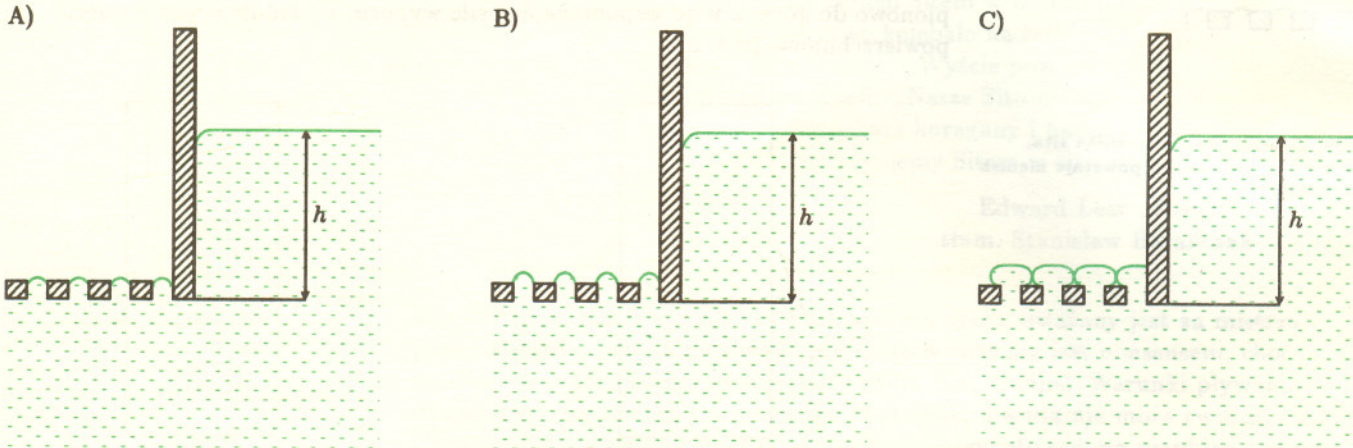
Podróż sitem przez wzburzony ocean byłaby jednak bardzo niebezpieczna; warunkiem możliwości jej odbycia jest powstanie w oczkach sita stabilnej, wypukłej powierzchni cieczy, co nie jest możliwe w niestacjonarnych

dr. K. Siermilaczkiewicz

warunkach. Z tego samego powodu praktycznie nie da się zaczerpnąć sitem wody, ale można w nim przenieść wodę, o ile sito napełnimy bardzo ostrożnie. (Z zagadnieniem tym od wieków zmagają się w Tartarze Danaidy, skazane za morderstwo na napełnianie dziurawej beczki wodą noszoną w sitach!) Maksymalna głębokość, na jakiej sito może pływać mając jednocześnie suche dno, wynosi

$$h_{max} = \frac{2\sigma}{\rho g R},$$

co odpowiada zerowej wartości kąta θ . Jeśli sito zanurzy się nieco głębiej, zaistnieje sytuacja pokazana na rysunku 4.



Rys. 4. Jeśli zanurzymy sito zbyt głęboko, na jego wewnętrznej powierzchni pojawiają się kropelki cieczy, które zaczynają się zlewać (C).

Kropelki wody znajdujące się na wewnętrznej powierzchni dna sita zleją się ze sobą tworząc w środku płaską powierzchnię i efekt wywołany działaniem sił napięcia powierzchniowego zniknie. Jeśli masa sita jest większa niż

$$\frac{2\sigma S}{Rg},$$

sito zatoni. Lekkie sito będzie pływać w częściowym zanurzeniu, jednak będzie wypełnione wodą. Przewidział to już Lear:

Naturalnie, że w łódce mokro było już wkrótce,
Woda ciekła przez dno wszędy i wzdłuż;
Żeby więc nie zamoczyć nóg (bo chorób stąd szereg),
Owinęli je schludnie w woskowany papierek,
Na agrafkę zapięli i już.

Przyjmując standardowe wartości gęstości i napięcia powierzchniowego wody: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ i $\sigma = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$ oraz zakładając, że otworki w dnie sita mają średnicę pół milimetra, możemy łatwo obliczyć maksymalną głębokość zanurzenia sita; jest ona równa 6 cm. Odpowiada to powierzchni 170 cm^2 na każdy kilogram masy sita i pasażerów. Oczywiście, głębokość, na jakiej może pływać sito, którego dno pozostaje suche, zależy od średnicy otworków. W praktyce średnice te są bardzo różne, dlatego przeciek wywołany zwiększeniem się zanurzenia sita rozpocznie się tam, gdzie są największe otworki.

Na zakończenie przypomnijmy, że brezentowy namiot (dziś chyba już rzadkość) podczas deszczu zaczyna przeciekać w miejscu dotknięcia spodniej strony. Uważny Czytelnik bez trudu odpowie na pytanie dlaczego, a potem pobiegnie na najbliższą przystań, bo może właśnie przybiło do brzegu sito pełne Dziąbli, gdyż:

Daleko stąd jest taki ład,
Skąd się Dziąbłe wywodzą obficie;
Zielona ich skroń i niebieska ich dłoń,
A w Dal Siną jeśli płyną, to w sicie.