



Żagle i fizyka

Sławomir Brzezowski

Instytut Fizyki UJ

1. Czy żaglówki pływają pod wiatr?

W zasadzie nie. Gdyby jednak sformułować to samo pytanie inaczej:

Niech wiatr wieje od punktu A do punktu B, a pomiędzy tymi punktami niech rozciąga się dostatecznie głęboka woda. Czy w tych warunkach da się dopłynąć żaglówką z punktu B do punktu A, nie opływając Ziemi dookoła?

to odpowiedź jest pozytywna – da się, ale trzeba płynąć zygzakiem.

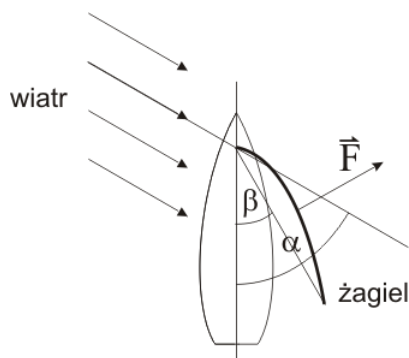
Zanim zrozumiemy, dlaczego statek napędzany żaglem potrafi „zdobywać wysokość na wiatr”, musimy rozważyć niektóre siły działające na żaglowiec w ruchu.

Z punktu widzenia fizyki statek żaglowy jest obiektem stałym znajdującym się na granicy dwóch ośrodków (wody i powietrza), zwykle pozostających we względnym ruchu, i zanurzony częściowo w każdym z tych ośrodków. Względny ruch ośrodków może mieć kilka przyczyn. Główną przyczyną jest oczywiście wiatr.

Nieco upraszczając założmy więc, że w układzie Ziemi woda jest nieruchoma a powietrze się przemieszcza. Przesiadźmy się teraz na jacht.

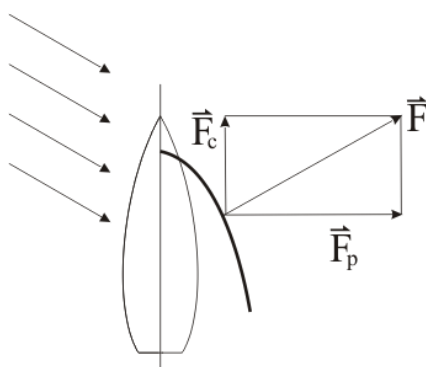
Kadłub jachtu jest tak ukształtowany, że względnie łatwo przesuwa się w wodzie do przodu i do tyłu, ale stawia duży opór przy próbie przesunięcia jachtu w bok.

Nad głowami mamy rozpięte żagle. Znowu nieco upraszczając możemy przyjąć, że są to pionowe powierzchnie (założymy dla uproszczenia, że maszt jest pionowy), ustawione pod pewnym kątem β do osi jachtu. Z perspektywy wierzchołka masztu narysowalibyśmy następujący szkic:



Powstawanie siły na żaglu

Zwróćmy uwagę na kierunek wiatru i kąt, pod jakim ustawiono żagiel. Oś jachtu i kierunek wiatru tworzą kąt α , a żagiel ustawiony jest w dwusiecznej tego kąta. Przy takim bowiem ustawieniu na żagiel będzie ze strony wiatru działała siła \vec{F} , prawie dokładnie prostopadła do powierzchni żagla. Tarcie powietrza o żagiel sprawi, że ta siła będzie przyłożona pod nieco innym kątem (na naszym rysunku symbol tej siły byłby skręcony nieco w prawo), ale o tym możemy zapomnieć – im gładszy żagiel, tym to skręcenie będzie mniejsze.



Rozkład siły działającej na żagiel na siłę ciągnącą i przechylającą

Przyjrzyjmy się sile \vec{F} . Jak każdą poziomą siłę, możemy ją rozłożyć na dowolne dwa nierównoległe poziome kierunki. Wybierzmy jeden z nich wzdłuż osi jachtu, a drugi prostopadły do niej. Możemy teraz zapomnieć o sile \vec{F} i zamiast niej mamy dwie równocześnie działające siły \vec{F}_c i \vec{F}_p .

Siła \vec{F}_c ciągnie jacht do przodu, zaś siła \vec{F}_p próbuje przesunąć jacht w bok. Pod wpływem pierwszej siły jacht płynie w pożądanym kierunku (małe opory ruchu – patrz wyżej), a pod wpływem drugiej kadłub powoli przesunę się w bok – tym wolniej, im większe są opory boczne. Ten drugi ruch nazywamy dryfem i jest to oczywiście zjawisko niekorzystne. Jeżeli jednak dryf nie jest za duży, to ostateczny kierunek przesuwania się jachtu pozwala „zdobywać wysokość na wiatr”. Płynąc zygzakiem (halsując) możemy odbyć podróż z portu B do portu A.

Wróćmy jeszcze na chwilę do siły \vec{F} powstającej na żaglu pod wpływem wiatru. Zauważmy, że wypełniony wiatrem żagiel, jako wykonany z tkaniny, nigdy nie jest płaski. Warto wiedzieć, że to jego wygięcie jest zjawiskiem korzystnym, zwiększającym siłę \vec{F} . Aby to zrozumieć, musimy na pozór odejść od tematu i wyobrazić sobie dowolny ośrodek gazowy lub ciekły, znajdujący się w ruchu (jak powietrze wokół żagla). W takim ośrodku, jeżeli znajduje się on

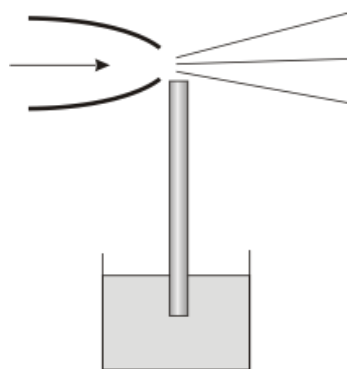
w stabilnym ruchu, można wskazać stabilne linie, wzdłuż których poruszają się cząsteczki ośrodka. Linie te zbliżają się do siebie, gdy ośrodek przeciska się przez jakieś zwężenia i oddalają się od siebie, gdy „ma więcej miejsca”. Wyobraźmy sobie na przykład zwężenie strumienia: linie prądu wody w takim zwężeniu ułożone są ciaśniej i... woda płynie tam szybciej.



$$p_1 > p_2$$

Tam, gdzie ośrodek przyspiesza – maleje ciśnienie

Wyobraźmy sobie porcję wody lub gazu poruszającą się w rurze o zmiennej średnicy: wchodząc w zwężenie ośrodek ten musi przyspieszyć, a jedyną przyczyną tego przyspieszenia może być różnica ciśnień: ośrodek przyspiesza przechodząc od miejsca o wyższym ciśnieniu do miejsca o niższym ciśnieniu, a gdy zwalnia, to jego ciśnienie musi rosnąć (prawo Bernoulli'ego). Na tej zasadzie działa zwykły rozpylacz: w przewężeniu nad rurką ciśnienie jest na tyle niskie w porównaniu z ciśnieniem w otoczeniu, że następuje zasysanie cieczy ze zbiornika.



Rozpylacz

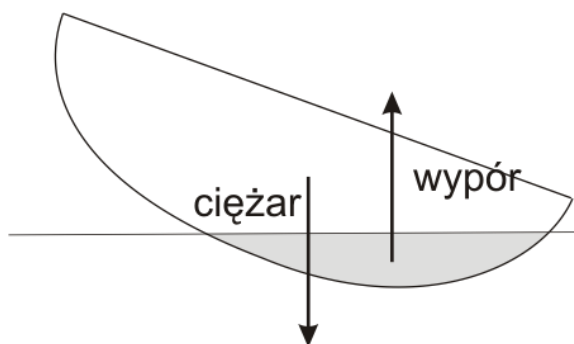
Wracamy na jacht. Strugi powietrza opływającego żagiel są z konieczności zagęszczone na jego wybrzuszonej, zawietrznej stronie. Oznacza to, że powietrze porusza się tam nieco szybciej, niż w innych miejscach i dlatego za żaglem rozciąga się strefa obniżonego ciśnienia: żagiel jest zasysany na stronę zawietrzną, co zwiększa siłę \vec{F} .



Strumienie powietrza opływającego żagiel

2. Czy jacht może się wywrócić?

Oczywiście może, ale jego skłonność do wywrotek może być różna. Wszystko zależy od konstrukcji kadłuba.



Para sił przeciwstawia się przechylaniu łódki

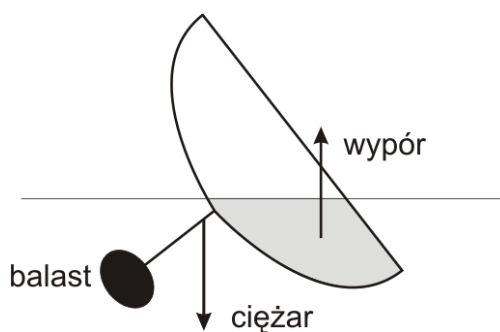
Zacznijmy od małych, lekkich żaglówek, pływających na jeziorach. Rysunek pokazuje przekrój kadłuba takiej łódki: widzimy szeroki, płaskodenny kształt, częściowo zanurzony w wodzie. Co dzieje się, gdy taka żaglówka, pod naporem wiatru, przechyla się? Wyjaśnia to rysunek: część zanurzona kadłuba przesuwają się na stronę zawietrzną i tam wędruje też punkt przyłożenia siły wyporu. Siła wyporu, „współdziałając” z siłą ciężkości, przeciwstawia się dalszemu przechylaniu łódki. Opisany mechanizm nie zabezpiecza oczywiście łódki przed wywrotką: dostatecznie duża siła przechylająca w końcu ją wywróci, ale po ew. wywrotce, dzięki swojej lekkości, łódka, nawet wypełniona wodą, może zachować pływalność.

Ten rodzaj stateczności mają w szczególności katamarany: łódki dwukadłubowe. Tylko bardzo silny wiatr potrafi unieść nawietrzny kadłub i wywrócić katamaran.



Katamaran na granicy wywrotki (fot. Wikipedia)

Inny mechanizm uzyskiwania stateczności opiera się na działaniu balastu i jest wykorzystywany głównie w jachtach morskich. Z dna takich jachtów wystaje w dół silna, płaska konstrukcja, na końcu której umieszcza się ołowiany lub stalowy balast – bardzo ciężki, sięgający niekiedy 1/3 ciężaru całego jachtu.



Stateczność jachtu z balastem

Spójrzmy na rysunek. Dodanie balastu sprawia, że siła ciężkości przyłożona jest teraz znacznie niżej, niż w przypadku lekkich, płaskodennych żaglówek:

jest przyłożona poniżej punktu przyłożenia siły wyporu. Zmienia to całkowicie zachowanie jachtu, jeżeli próbujemy go przechylić: nawet położony na burtę jacht (gdy maszt leży wtedy na wodzie) potrafi samodzielnie wstać.



Ten jacht, uderzony podmuchem wiatru, wstanie o własnych siłach (fot. Rick Tomlinson)

Za tę stateczność płacimy jednak wysoką cenę: po przebiciu kadłuba, lub zalaniu jego wnętrza wodą przez otwory pokładowe, jacht tonie. Teoretycznie – można by rozmieścić w kadłubie puste szczelne blaszane zbiorniki wypornościowe, ale wtedy zabrakłoby miejsca dla załogi i wyposażenia.

3. Czy żagiel pozwala się rozpędzić do prędkości większej, niż prędkość wiatru?

Odpowiedź jest zaskakująca: pozwala. Ta sztuka udaje się pod warunkiem, że w dostatecznym stopniu zmniejszymy opory ruchu.

Najpierw – trochę teorii. Wrócimy do żagla i działającej na żagiel siły. Kąty α i β zdefiniowaliśmy wcześniej. Pod wpływem składowej siły F skierowanej do przodu jacht się rozpędza. Ma to ten skutek, że na ruchomym jachcie halsującym „pod wiatr” wzmacnia się i skręca tak, że zaczyna wiać bardziej od dziobu, czyli kąt α maleje. Musimy więc zmniejszyć kąt β , aby utrzymać żagiel w dwusiecznej kąta α . Po tej operacji siła F też skręca, ale jej składowa ciągnąca jacht niekoniecznie musi maleć, bo wartość siły F rośnie (silniejszy

wiatr wiejący względem jachtu). Zauważmy, że niezależnie od prędkości jachtu składowa ciągnąca siły F będzie wciąż różna od zera i (teoretycznie) będzie mogła nadal rozpędzać jacht. Dopiero zrównoważenie rosnących wraz prędkością oporów ruchu i składowej ciągnącej sprawi, że prędkość przestanie rosnąć. Bez tych oporów prędkość mogłaby rosnać nieograniczenie i przekroczyć prędkość wiejącego nad wodą wiatru. Ta sztuka łatwo udaje się bojerowcom i windsurfiingowcom.



Jacht w ruchu, uwięziony w dolinie własnej fali (<http://www.spinnaker-yachts.com/photos.htm>)

Skoro jesteśmy przy oporach ruchu. Spójrzmy na fotografię. Widać na niej płynący jacht. Patrząc wzdłuż burty zauważymy, że w okolicach dziobu i rufy woda jest wypiętrzona, a wzdłuż jachtu rozciąga się „dolina” fali. Ta fala sama powstaje wokół jachtu, wędruje wraz z nim i więzi jacht w dołku wodnym. Jej długość równa jest długości jachtu.

Nietrudno zauważyć, że krótka fala porusza się po wodzie wolniej, niż długa (porównaj prędkość drobnych zmarszczek na wodzie z prędkością dużych fal). Tak więc prędkość fali o długości równej długości jachtu jest zarazem maksymalną prędkością, z jaką jacht może płynąć „w zwykły sposób” (czyli im dłuższy jacht, tym szybciej może płynąć). Czy jacht może się wyrwać z dołka wodnego, w którym się porusza, i popłynąć szybciej? Może, ale pod wpływem szczególnie dużej siły (silny wiatr, duża powierzchnia żagla). Jeżeli mu się to

uda, to dziób jachtu wspina się na przednią falę, przechodzi w ślizg i wtedy... opory ruchu gwałtownie maleją. Zaczyna się „prawdziwa jazda”. Ta sztuka udaje się na lekkich regatowych żaglówkach, a ostatnio, wobec rozwoju technologii materiałowych pozwalających budować wielkie, ale lekkie kadłuby, także na oceanicznych jachtach regatowych.



Duży oceaniczny jacht regatowy w pełnym ślizgu (fot. Rick Tomlinson)