

# F Fale

## Fizyka fali głębokowodnej

Fale zawierają dwa rodzaje energii: potencjalną i kinetyczną. Energia potencjalna to energia konieczna do przemieszczenia masy wody z doliny do grzbietu fali. Energia kinetyczna jest związana z kolisto-kołyszącym ruchem wody.

Niektórym wydaje się, że kiedy grzbiet fali przemieszcza się z prędkością 50 km na godzinę, woda w tym grzbiecie również podróżuje z prędkością 50 km/h, i to w tym samym kierunku. Nic z tych rzeczy. To tak, jak z meksykańską falą na stadionach. Kiedy fala przemieszcza się wzdłuż trybun, kibice lekko unoszą się i opadają, ale pozostają w miejscu. Podobnie zachowuje się woda w morzu. Jeśli przyjrzy się wodorostom na wodzie poruszonym falą, zobaczysz, że kołyszają się w górę i w dół, ale też wędrują nieco z falą, po czym się cofają. Tak samo zachowują się kibice tworzący falę, podobni do myjących okna, którzy okrągłym ruchem polerują wielką tafłę szkła. Fala zawiera energię potencjalną, bo grzbiet fali wznosi się ponad jej dolinę. I ma energię kinetyczną, zawartą w małych ruchach wody, kołyszącej się kolisto w górę i w dół.

Nasze zgrubne oszacowanie mocy fal morskich wymagać będzie trzech składowych: okresu fali  $T$  (dystansu czasowego dzielącego jeden grzbiet od kolejnego), wysokości fal  $h$  i wzoru fizycznego określającego, jak obliczyć prędkość fali  $v$  na podstawie okresu fali.

Długość fali  $\lambda$  oraz okres fali (odpowiednio: odległość i czas między następującymi po sobie falami) zależą od prędkości wiatru wywołującego fale, co pokazano na rys. F.1. Wysokość fal nie zależy od prędkości wiatru, ale od tego, jak długo wiatr omiata powierzchnię wody.

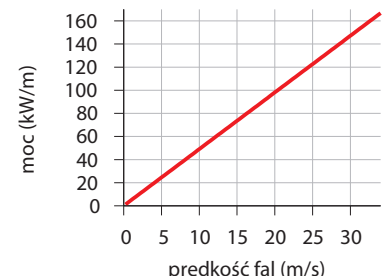
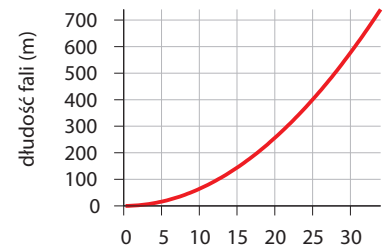
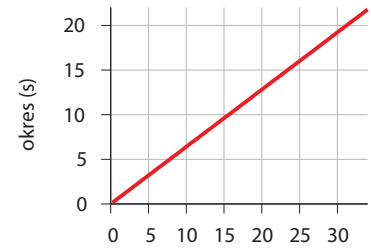
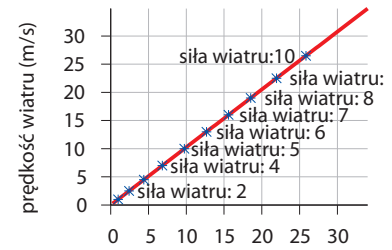
Możemy oszacować okres fal obserwując, jak często fale dobijają do morskiej plaży. Załóżmy, że co 10 sekund. Dla wysokości fal ustalmy amplitudę 1 m, co oznacza 2-metrową różnicę wysokości pomiędzy doliną fali a jej grzbietem. Przy tak wysokich falach, człowiek w szalupie, w dolinie fali, nie jest w stanie wyrzucić ponad grzbiet najbliższej fali. To chyba ponadprzeciętnie wysoka fala, możemy jednak wrócić do tych rachunków, jeżeli uznamy to za stosowne. Prędkość fal głębokowodnych zależy od czasu  $T$  dzielącego grzbiety fal, zgodnie z wzorem fizycznym (więcej w: Faber (1995), (str. 170):

$$v = \frac{gT}{2\pi}$$

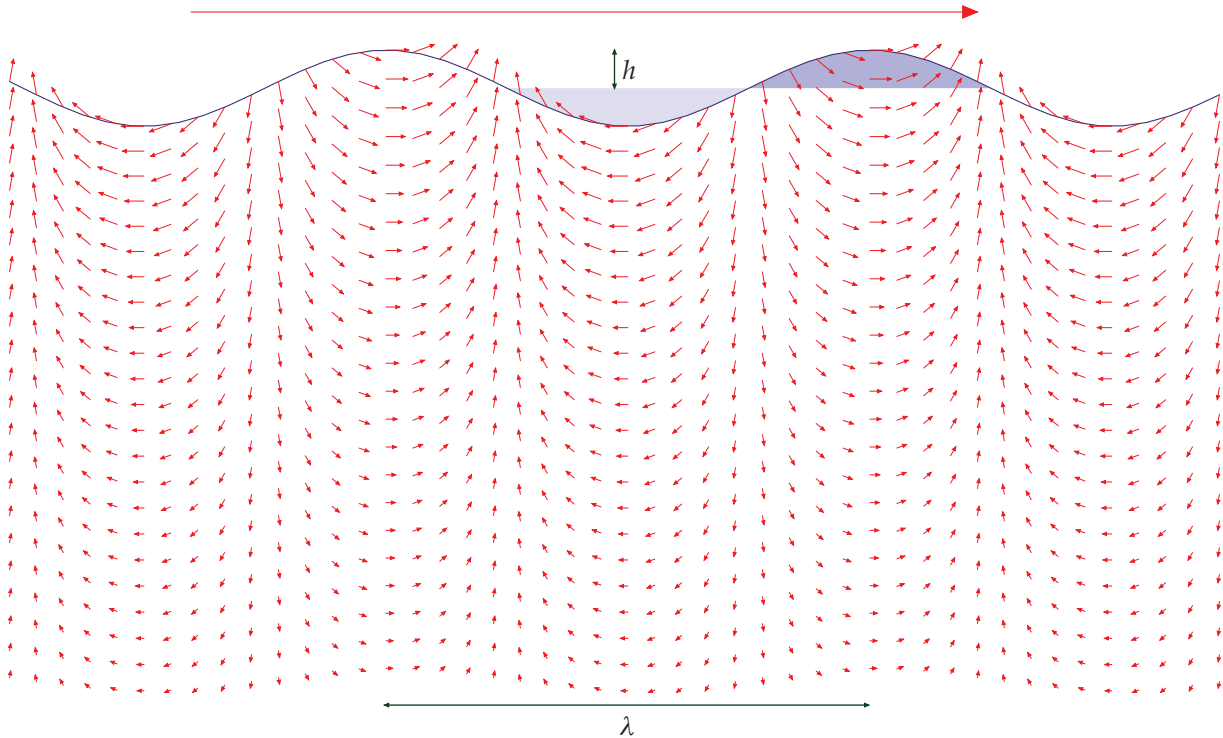
gdzie  $g$  to przyspieszenie ziemskie ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Dla przykładu, jeżeli  $T = 10$  sekund, wówczas  $v = 16 \text{ m/s}$ . Długość takiej fali (odległość między grzbiecami) wynosi  $\lambda = vT = gT^2/2\pi = 160 \text{ m}$ .

W przypadku fali o długości  $\lambda$  i okresie  $T$ , o ile wysokość każdego grzbietu i głębokość każdej doliny wynosi  $h = 1 \text{ m}$ , energia potencjalna przepływająca na jednostkę czasu, na jednostkę długości, wynosi:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx m^* g \bar{h} / T \tag{F.1}$$



Rys. F.1. Co nieco o falach głębokowodnych. Na wszystkich czterech wykresach oś pozioma określa prędkość fali w m/s. Poczynając od góry, wykresy ilustrują: prędkość wiatru (w m/s) konieczną do wzbudzenia fali o określonej prędkości; okres fali (w sekundach); długość fali (w metrach) i gęstość mocy (w kW/m) dla fali o amplitudzie 1 m.



gdzie  $m^*$  to masa na jednostkę długości, wynosząca mniej więcej  $\frac{1}{2}\rho h(\lambda/2)$  (po przybliżeniu zacięzionego grzbietu na rys. F.2 powierzchnią trójkąta), a  $h$  to zmiana wysokości środka masy układu (tutaj: wznoszącej się masy wodnej), z grubszą równającą się  $h$ . Stąd też:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx \frac{1}{2}\rho h \frac{\lambda}{2} gh / T \quad (\text{F.2})$$

(Wyznaczając energię kinetyczną zgodnie z regułami, powinniśmy dokonać całkowania, jednakże wynik byłby taki sam). Teraz  $\lambda/T$  to po prostu prędkość, z jaką podróżuje fala  $v$ , stąd też:

$$P_{\text{potencjalna}} \approx \frac{1}{4}\rho gh^2 v \quad (\text{F.3})$$

Fale zawierają zarówno energię kinetyczną, jak i potencjalną. Co niezwykle, obie te energie są sobie dokładnie równe, aczkolwiek nie będę tego tutaj obliczał. Stąd też całkowita moc fal to dwukrotność mocy potencjalnej.

$$P_{\text{suma}} \approx \frac{1}{2}\rho gh^2 v \quad (\text{F.4})$$

Jest tylko jeden szkopuł. Nasze obliczenia są zbyt hojne, bo nie uwzględniają pewnej dziwnej właściwości, związanej z dyspersją fal. Energia w fali nie podróżuje z tą samą prędkością, co grzbiet; przemieszcza się z tzw. prędkością grupową, która dla fal głębokowodnych wynosi *połowę* prędkości  $v$ . Kto chce zobaczyć, że energia podróżuje wolniej, niech wrzuci kamyk do

Rys. F.2. Fala zawiera energię w dwóch postaciach: potencjalną (związaną z podnoszeniem wody z jasno pokolorowanych dolin do ciemno pokolorowanych grzbietów) oraz energię kinetyczną całej wody do głębokości kilku długości fal od powierzchni wody – prędkość wody zaznaczono przy pomocy małych strzałek. Prędkość fali, podróżującej z lewa na prawo, zaznaczono za pomocą znacznie większej strzałki na górze.

stawu i uważnie obserwuje rozchodzące się fale. Oznacza to, że równanie (F.4) jest nieprawidłowe i musimy podzielić je na pół. Prawidłowy wzór na moc na jednostkę długości czoła fali będzie następujący:

$$P_{\text{suma}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v \quad (\text{F.5})$$

Podstawiając do wzoru  $v = 16 \text{ m/s}$  i  $h = 1 \text{ m}$ , dowiadujemy się, że:

$$P_{\text{suma}} = \frac{1}{4} \rho g h^2 v = 40 \text{ kW/m} \quad (\text{F.6})$$

To zgrubne oszacowanie zgadza się z rzeczywistymi pomiarami na Atlantyku (Mollison, 1986). (Więcej na str. 83).

Straty związane z lepkością są minimalne – fala o okresie 9 sekund musiałaby trzykrotnie opłynąć Ziemię, by stracić 10% amplitudy.

## Istniejące elektrownie falowe

### Generatory głębokowodne

Jaka jest sprawność pozyskiwania energii fal w istniejących urządzeniach? Dużo wiemy o „kaczce” Stephena Saltera: rząd kaczek o średnicy 16 m, żywiących się falami Atlantyku o średniej mocy 45 kW/m, dostarczyłby 19 kW/m, z uwzględnieniem przesyłu do Szkocji centralnej (Mollison, 1986).

Instalacja Pelamis, stworzona przez Ocean Power Delivery, przejęła od kaczki Saltera prowadzenie w segmencie pływających głębokowodnych elektrowni falowych. Urządzenie w kształcie węża ma 130 m długości i składa się z łańcucha czterech odcinków, o średnicy 3,5 m każdy. Maksymalna moc wyjściowa wynosi 750 kW. Pelamisy cumuje się na głębokości około 50 m. Na farmie falowej 39 urządzeń w trzech rzędach stawiałoby czoła falom, zajmując obszar oceanu długi na 400 m i szeroki na 2,5 km (powierzchnia 1 km<sup>2</sup>). Według producenta taka farma falowa dostarczy około 10 kW/m.

### Generatory płytkowodne

Wraz ze zmniejszeniem głębokości ze 100 do 15 m, przeciętnie 70% energii fal morskich jest tracone na tarcie denne. Stąd też średnia moc fal na jednostkę długości wybrzeża na wodach płytkich spada do około 12 kW/m. Urządzenie zwane Ostrygą (Oyster), stworzone w Queen’s University w Belfaście oraz Aquamarine Power Ltd [[www.aquamarinepower.com](http://www.aquamarinepower.com)], to ruchoma platforma, wsparta na silnikach hydraulicznych, wysoka na 12 m, z przeznaczeniem na wody o głębokości 12 m, o średniej mocy nadciągających fal przekraczającej 15 kW/m. Moc szczytowa wynosi 600 kW. Pojedyncze urządzenie ma produkować około 270 kW przy falach wyższych niż 3,5 m. Przewiduje się, że Ostryga będzie oferować większą moc na jednostkę masy urządzenia niż Pelamis.

Ostryga może bezpośrednio zasilać instalacje odsalania wody w procesie odwróconej osmozy. „Szczytowa produkcja wody pitnej odsalarki Ostrygi wynosi między 2000 a 6000 m<sup>3</sup> dziennie”. Wartość tej produkcji, uzyskanej w instalacji w Jersey (zużywającej 8 kWh na m<sup>3</sup>), to równowartość 600–2000 kW prądu.