

# G Pływy

## Gęstość mocy basenów pływowych

Jak oszacować moc sztucznego basenu pływowego? Wyobraźmy sobie, że w trakcie przypływu basen szybko wypełnia się wodą, a w trakcie odpływu – szybko opróżnia. Do wytwarzania energii wykorzystuje się zarówno przypływ, jak i odpływ (co zowie się produkcją bądź generacją dwukierunkową). Zmiana energii potencjalnej wody, na przestrzeni 6 godzin, wynosi  $mgh$ , gdzie  $h$  to zmiana wysokości środka masy układu (wody), równa połowie wysokości pływów (wysokość pływu to różnica wysokości pomiędzy przypływem a odpływem; rys. G.1). Masa na jednostkę powierzchni basenu pływowego wynosi  $\rho \times (2h)$ , gdzie  $\rho$  to gęstość wody ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). Stąd też moc generowana na jednostkę powierzchni basenu pływowego wyniesie:

$$\frac{2 \rho gh}{6 \text{ godzin}}$$

przy założeniu, że generatory mają doskonałą sprawność. Zakładając, że  $h = 2 \text{ m}$  (czyli wysokość pływu wynosi 4 m), otrzymujemy moc na jednostkę powierzchni basenu pływowego  $3,6 \text{ W/m}^2$ . Przyjmując, że energia ta jest zamieniana w elektryczność ze sprawnością 90%, dowiadujemy się, że:

$$\text{moc na jednostkę powierzchni basenu pływowego} \approx 3 \text{ W/m}^2$$

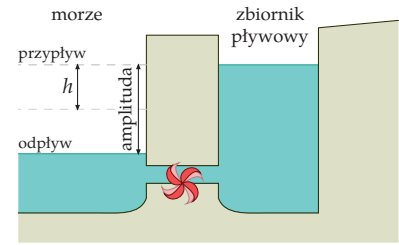
By wygenerować średnio 1 GW mocy, potrzebujemy basenu pływowego o powierzchni około  $300 \text{ km}^2$ . Mógłby to być okrągły basen o średnicy 20 km (dla porównania, powierzchnia ujścia Severn za planowaną zaporą wynosi około  $550 \text{ km}^2$ , a powierzchnia estuarium Wash – ponad  $400 \text{ km}^2$ ).

Jeżeli basen pływowy produkuje prąd tylko w jednym kierunku, moc na jednostkę powierzchni spada o połowę. Średnia gęstość mocy zapory pływowej La Rance (o przeciętnej wysokości pływu wynoszącej 10,9 m) przez dziesięciolecia wynosiła  $2,7 \text{ W/m}^2$  (str. 95).

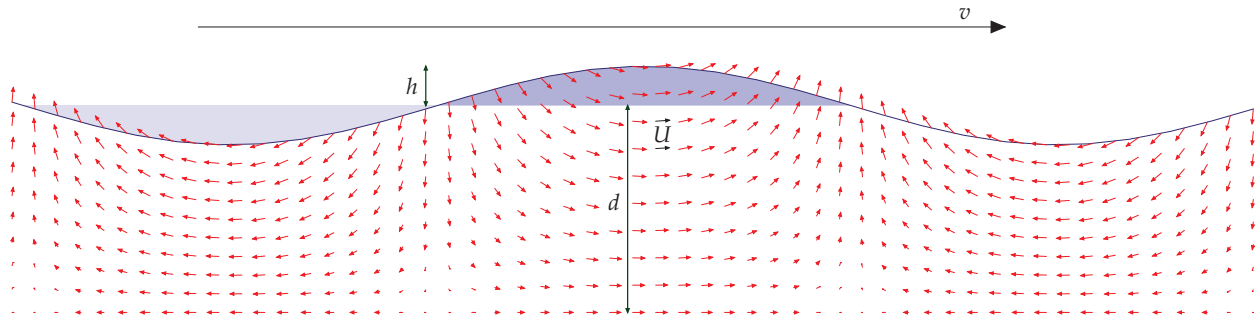
## Zasoby pływowe

Pływy wokół Wielkiej Brytanii to naturalne fale pływowe (fale tsunami, zwane „falami pływowymi” nie mają z pływami nic wspólnego – powodowane są podwodnymi obsunięciami i trzęsieniami ziemi). Fala przypływu (grzbiet fali pływowej) przemieszcza się znacznie szybciej niż prąd pływowy – np. z prędkością  $150 \text{ km/h}$ , podczas gdy sama woda porusza się z prędkością  $1,5 \text{ km/h}$ .

Energia, którą da się pozyskać z pływów przy pomocy basenów lub farm pływowych, nigdy nie będzie większa niż energia fal pływowych oceanu. Całkowitą moc wielkich atlantyckich fal pływowych obliczamy tak samo, jak moc zwykłych fal wywołanych wiatrem. W następnym akapicie prezentujemy standardowy model liczenia mocy zawartej w nadpływających falach w wodzie o głębokości  $d$ , płytkiej w stosunku do długości fal (rys. G.2).



Rys. G.1. Przekrój poprzeczny basenu pływowego. Basen napełnił się w trakcie przypływu, a teraz mamy odpływ. Spuszczamy wodę przez generator, który przekształca energię potencjalną wody w elektryczność.



Moc na jednostkę długości grzbietu fali na wodach płytkich wynosi:

$$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2 \quad (G.1)$$

W tabeli G.3. obliczamy moc na jednostkę długości grzbietu fali dla różnych wartości  $h$ . Jeżeli  $d = 100$  m, a  $h = 1$  lub  $2$  m, moc na jednostkę długości grzbietu fali wynosi odpowiednio  $150$  kW/m lub  $600$  kW/m. To imponujący wynik w stosunku do mocy na jednostkę długości zwykłej fali, na wodach głębokich Atlantyku, wynoszącej  $40$  kW/m (rozdział F). Fale i pływy na Atlantyku mają podobne amplitudy pionowe (około  $1$  m), ale moc zawarta w pływach jest około  $10$  razy większa niż moc fal wywoływanych wiatrem.

Taylor (1920) opracował bardziej szczegółowy model mocy pływów, uwzględniający istotne czynniki, takie jak efekt Coriolisa (wywołany dziennym ruchem obrotowym Ziemi), istnienie fal pływowych poruszających się w odwrotnym kierunku i bezpośredni wpływ Księżyca na przepływy energii w Morzu Irlandzkim. Od tamtej pory dzięki eksperymentalnym pomiarom i modelom komputerowym zweryfikowano i poszerzono analizę Taylora. Flather (1976) zbudował szczegółowy model numeryczny pływów morskich, krojąc szelf kontynentalny wokół Wysp Brytyjskich na około  $1000$  komórek w kształcie kwadratu. Flather oszacował, że całkowita średnia moc docierająca na ten obszar wynosi  $215$  GW. Zgodnie z tym modelem,  $180$  GW dociera na obszar pomiędzy Francją a Irlandią. Do rejonu między Irlandią Północną a Szetlandami dociera  $49$  GW. Pomiędzy Szetlandami a Norwegią dochodzi do straty netto rzędu  $5$  GW. Jak zilustrowano na rys. G.4, Cartwright i in. (1980) dowiedli, że średnia transmisja mocy pomiędzy Malin Head (Irlandia) and Florø (Norwegia) wynosiła  $60$  GW, a pomiędzy Valentia (Irlandia) a wybrzeżem brytyjskim w pobliżu Ouessant  $190$  GW. Obliczono, że moc docierająca na Morze Irlandzkie wynosi  $45$  GW, a docierająca na Morze Północne przez Cieśninę Kaletańską –  $16,7$  GW.

### Moc fal pływowych

W tym ustępie (który można bezpiecznie pominąć) uszczegóławiam wzór na moc pływową podany w poprzednim akapicie. Robię to, bo większość rządowych analiz dotyczących brytyjskich zasobów pływowych oparto na modelu, który uważam za błędny.

Rys. G.2. Fala płytkowodna. Podobnie jak fala głębokowodna, zawiera energię w dwóch formach: energię potencjalną związaną z wyniesieniem wody z jasnofioletowych dolin do ciemnofioletowych grzbietów oraz energię kinetyczną całej wody przemieszczającej się tak, jak wskazują małe strzałki. Prędkość fali, podróżującej z prawa na lewo, określa duża strzałka na górze. W przypadku fal pływowych typowa głębokość może wynosić  $100$  m, prędkość grzbietów  $30$  m/s, pionowa amplituda na powierzchni  $1$  lub  $2$  m, a amplituda prędkości wody  $0,3$  lub  $0,6$  m/s.

$h$ (m)	$\rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 / 2$ (kW/m)
0,9	125
1,0	155
1,2	220
1,5	345
1,75	470
2,0	600
2,25	780

Tabela G.3. Przepływy mocy (moc na jednostkę długości grzbietu fali) na głębokości  $d = 100$  m

Rys. G.2 ilustruje fale pływowe podróżujące po stosunkowo płytkich wodach. To szkic, który może ilustrować na przykład grzbiety fal przemieszczające się na północ kanałem La Manche lub na południe Morzem Północnym. Trzeba odróżnić prędkość  $U$ , z jaką przemieszcza się sama woda (np. 1,5 km/h) od prędkości  $v$ , z jaką podróżuje przyływ, wynoszącej zazwyczaj 150 lub 300 km/h.

Woda ma głębokość  $d$ . Grzbiety i doliny fal pływowych są wstrzykiwane po lewej przez 12-godzinne pływy oceaniczne. Grzbiety i doliny przemieszczają się z prędkością:

$$v = \sqrt{gd} \quad (\text{G.2})$$

Zakładamy, że długość fal jest znacznie większa niż głębokość. Pomijamy detale w rodzaju sił Coriolisa i różnic gęstości wody. Pionową amplitudę pływów nazwiemy  $h$ . Zgodnie ze standardowym założeniem, że wirowanie wody niemal nie oddziałuje na przepływ, pozioma prędkość wody nie zależy od głębokości i jest prawie stała. Pozioma prędkość  $U$  jest wprost proporcjonalna do prędkości wody na powierzchni i można ją wyprowadzić z prawa zachowania masy:

$$U = vh/d \quad (\text{G.3})$$

Wraz ze spadkiem głębokości, spada prędkość fal  $v$  (równanie G.2). Dla naszych potrzeb założymy stałą głębokość. Energia płynie z lewa na prawo w określonym tempie. Jak oszacować tę całkowitą moc pływów? Jaką moc *maksymalną* da się z tego pozyskać?

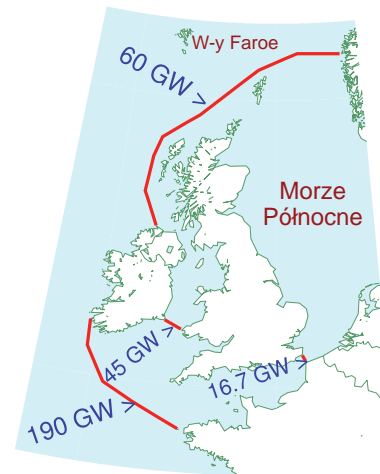
Można posłużyć się przekrojem poprzecznym i oszacować średni *strumień energii kinetycznej* na tym obszarze, a potem twierdzić, że tyle właśnie mocy da się uzyskać. Metodą strumienia energii kinetycznej posłużyli się konsultanci Black and Veatch dla oszacowania brytyjskich zasobów pływowych. W naszym szkicu wyprowadzimy moc całkowitą w inny sposób. Udowodnimy, że metoda strumienia energii kinetycznej daje wynik zaniżony.

Szczytowy strumień energii kinetycznej w każdym sektorze wynosi:

$$K_{BV} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (\text{G.4})$$

gdzie  $A$  to pole przekroju poprzecznego (to wzór na strumień energii kinetycznej, który napotkaliśmy w rozdziale B).

Rzeczywista całkowita moc napływająca nie jest równa strumieniowi energii kinetycznej. Rzeczywistą całkowitą moc napływającą na płytkich wodach obliczamy standardowym, podręcznikowym wzorem – należy określić całkowitą energię zawartą w jednej długości fali i podzielić ją przez jej okres. Całkowita energia w długości fali jest sumą energii potencjalnej i kinetycznej. Energia kinetyczna i potencjalna często są sobie równe (to typowe dla niemalże wszystkich obiektów, które się chyboczą – nieważne, czy to ciężarki na sprężynie, czy dzieci na huśtawce). By oszacować energię całkowitą wystarczy policzyć jedną z nich (albo energię potencjalną jednej długości fali, albo jej energię kinetyczną), a potem ją podwoić. Energia



Rys. G.4. Średnie moce pływów zmierzone przez Cartwrighta i in. (1980)

potencjalna fali (na długość fali i na jednostkę szerokości czoła fali), wypro-  
wadzona poprzez całkowanie, wynosi:

$$\frac{1}{4}\rho gh^2\lambda \quad (\text{G.5})$$

Stąd też, po podwojeniu i podzieleniu przez okres, rzeczywista moc naszej  
modelowej płytkowodnej fali pływowej wynosi:

$$\text{moc} = \frac{1}{2}(\rho gh^2\lambda) \times w/T = \frac{1}{2}\rho gh^2v \times w \quad (\text{G.6})$$

gdzie  $\omega$  to szerokość czoła fali. Zastępując  $v = \sqrt{gd}$ ,

$$\text{moc} = \rho gh^2 \sqrt{gd} \times w/2 = \rho g^{3/2} \sqrt{d} h^2 \times w/2 \quad (\text{G.7})$$

Porównajmy tę moc ze strumieniem energii kinetycznej  $K_{\text{BV}}$ . Uderza fakt,  
że te dwa równania inaczej reagują na zmianę amplitudy  $h$ . Posługując się  
równaniami G.2 i G.3, oraz związkiem  $A = \omega d$ , możemy wyrazić strumień  
energii kinetycznej jako:

$$K_{\text{BV}} = \frac{1}{2}\rho AU^3 = \frac{1}{2}\rho wd(vh/d)^3 = \rho \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3 \times w/2 \quad (\text{G.8})$$

A zatem metoda strumienia energii kinetycznej sugeruje, że całkowita moc  
fal płytkowodnych rośnie jako *sześcian* amplitudy (równanie (G.8)); niemniej  
jednak zgodnie z prawidłowym wzorem moc rośnie wraz z *kwadratem*  
amplitudy (równanie (G.7)).

Stosunek jest następujący:

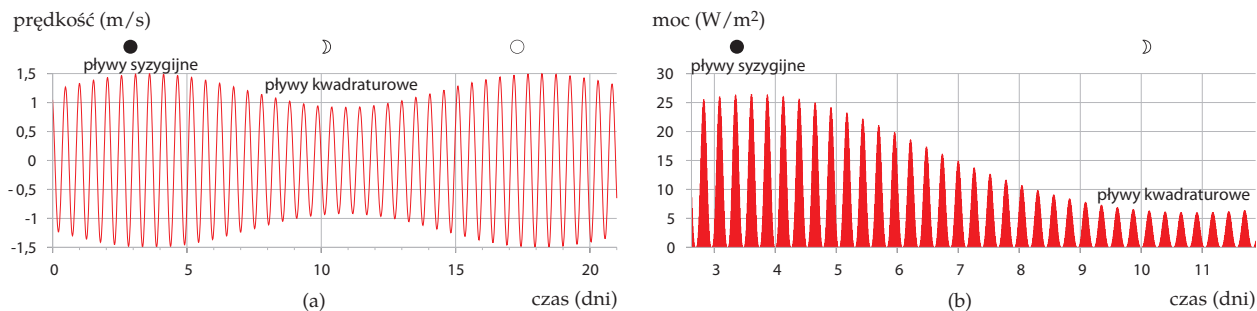
$$\frac{K_{\text{BV}}}{\text{moc}} = \frac{\rho w \left(g^{3/2}/\sqrt{d}\right) h^3}{\rho g^{3/2} h^2 \sqrt{d} w} = \frac{h}{d} \quad (\text{G.9})$$

Z uwagi na to, że  $h$  jest zazwyczaj znacznie mniejsze niż  $d$  ( $h$  najczęściej  
wynosi 1 lub 2 m, a  $d$  to 100 lub 10 m), szacunki odnośnie zasobów mocy  
pływów oparte na metodzie strumienia energii kinetycznej mogą być  
*znacznie niedoszacowane*. Przynajmniej w tych miejscach, do których pasuje  
nasz szkic płytkowodnych fal pływowych.

Co więcej, w oszacowaniach opartych na metodzie strumienia energii  
kinetycznej twierdzi się mylnie, że całkowita moc dostępna w trakcie pły-  
wu maksymalnego (syzygijnego) jest osiem razy większa niż w przypadku  
pływu minimalnego (kwadraturowego). Zakłada się, że stosunek amplitud  
pływów wysokich do niskich wynosi dwa do jednego, tymczasem praw-  
dziwe jest twierdzenie, że całkowita dostępna moc podróżującej fali rośnie  
wraz z kwadratem jej amplitudy, stąd też stosunek całkowitej mocy napły-  
wającej dla pływów wysokich i niskich wynosi cztery do jednego.

### Wpływ opadania dna morskiego i siły Coriolisa

Jeżeli głębokość  $d$  zwiększa się stopniowo, a szerokość zbiornika pozostaje  
stała, wówczas napływająca moc zostanie odbita lub zaabsorbowana tylko  
minimalnie i moc fali będzie stała. Oznacza to, że  $\sqrt{d}h^2$  jest stałą, stąd też  
wysokość pływu rośnie wraz z głębokością jako  $[h \sim 1/d^{1/4}]$ .



To bardzo ogólny model, pomijający efekt Coriolisa. Siła Coriolisa sprawia, że grzbiety i doliny fal preferują ruch prawostronny – na przykład wędrując w górę kanału La Manche, przyływy są wyższe, a odpływy niższe po francuskiej stronie kanału. Pomijając ten efekt, mogłem do oszacowań wprowadzić pewien błąd.

### Gęstość mocy farm pływowych

Wyobraźmy sobie, że wbijamy w dno morskie podwodne wiatraki. Porusza je strumień wody. Ponieważ woda jest około 1000 razy gęstsza niż powietrze, moc strumienia wody jest 1000 razy większa niż moc wiatru o tej samej prędkości.

Ile mocy mogą wychwycić farmy pływowe? Kluczowe jest, czy da się zsumować produkcję energii z farm pływowych na *przylegających* fragmentach dna morskiego. W przypadku wiatru, to całkiem możliwe – dopóki turbiny są rozmieszczone w odpowiedniej odległości od siebie, całkowita moc dostarczona przez 10 sąsiadujących farm wiatrowych jest sumą mocy dostarczonych przez pojedyncze farmy.

Czy tak samo będzie z farmami pływowymi? A może podwodne wiatraki wpływają jakoś na pozyskiwanie mocy u sąsiada? O ile mi wiadomo, odpowiedzi na to pytanie jeszcze nie ma. Możemy za to poczynić dwa alternatywne założenia i stworzyć modelowe sytuacje, w których te założenia będą prawdziwe. Zgodnie z założeniem „pływy są jak wiatr” możemy rozrzucić turbiny pływowe po całym dnie morskim, w odstępach około 5 średnic, i nie będą na siebie wzajemnie wpływać. Niezależnie od tego, jak duży obszar dna morskiego pokryjemy takimi farmami pływowymi.

Zgodnie z założeniem „może być tylko jeden rząd” jest wręcz przeciwnie – maksymalna moc możliwa do pozyskania w regionie to moc dostarczona przez *pojedynczy* rząd turbin wystawionych na pływy. To założenie jest prawdziwe w specjalnym przypadku zapory z hydroelektrownią – jeżeli woda przepływa przez pojedynczą, prawidłowo zaprojektowaną turbinę, nie ma sensu stawiać za nią kolejnych. Nie da się uzyskać stukrotnie więcej mocy stawiając jeszcze 99 turbin poniżej tej pierwszej. Miodek (czyli moc) jest spijany przez pierwszą turbinę i nie ma już więcej miodku dla pozostałych. Założenie „może być tylko jeden rząd” jest prawidłowe, jeżeli szacujemy potencjał mocy w miejscu, w którym woda przepływa przez wąski kanał ze zbiornika na górze, z wodą niemalże stojącą, do innego zbiornika na dole (przypadek zanalizowany przez Garretta i Cummins (2005, 2007)).

Rys. G.5. (a) Prąd pływowy na przestrzeni 21 dni w miejscu, gdzie maksymalny prąd w trakcie pływy syzygijskiej wynosi 2,9 węzła (1,5 m/s), a maksymalny prąd w trakcie pływy kwadraturowego – 1,8 węzła (0,9 m/s).

(b) Moc na jednostkę powierzchni dna morskiego na przestrzeni 9 dni obejmujących pływy syzygijskie i kwadraturowe. Szczyt mocy ma miejsce 4 razy dziennie, a jego wartość maksymalna to około 27 W/m<sup>2</sup>. Średnia moc farmy pływowej wynosi 6,4 W/m<sup>2</sup>.

Czas na deklarację. Uważam, że w wielu miejscach u wybrzeży Wielkiej Brytanii „pływy są z grubsza jak wiatr”. Zapewne jest też kilka miejsc o cechach wąskiego kanału i dla nich moje szacunki będą zawyżone.

Założmy, że zasady stawiania sensownej farmy pływowej i wiatrowej są zbliżone i że sprawność wiatraków pływowych będzie taka sama, jak najlepszych turbin wiatrowych, czyli około ½. Możemy podkraść wzór na moc farmy wiatrowej (na jednostkę powierzchni gruntu) ze str. 281. Moc na jednostkę powierzchni dna morskiego wynosi

$$\frac{\text{moc na wiatrak pływowy}}{\text{powierzchnia na wiatrak pływowy}} = \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (\text{G.10})$$

Stosując ten wzór, w tabeli G.6 prezentujemy moc farm pływowych dla prądów pływowych o kilku prędkościach.

No dobrze, a jakie są typowe prądy pływowe? Wykresy pływów zazwyczaj podają prądy związane z pływami o największej amplitudzie (zwane pływami syzygijnymi) i o najmniejszej amplitudzie (zwane kwadraturowymi). Pływy syzygijne mają miejsce krótko po pełni i krótko po nowiu księżyca. Pływy kwadraturowe mają miejsce krótko po pierwszej i trzeciej kwadrze księżyca. Moc farmy pływowej zmieniałaby się w ciągu dnia w całkowicie przewidywalny sposób. Rys. G.5 ilustruje zmiany gęstości mocy farmy pływowej o maksymalnym prądzie rzędu 1,5 m/s. Średnia gęstość mocy tej farmy wyniosłaby 6,4 W/m<sup>2</sup>. W wielu miejscach u wybrzeży Wielkiej Brytanii moc na jednostkę powierzchni farmy pływowej wyniosłaby 6 W/m<sup>2</sup> i więcej. To gęstość mocy podobna, jak w naszych szacunkach gęstości mocy farm wiatrowych (2–3 W/m<sup>2</sup>) i farm fotowoltaicznych (5–10 W/m<sup>2</sup>).

Teraz posłużymy się teorią „farmy pływowe są jak farmy wiatrowe”, by oszacować potencjał pozyskania mocy ze strumieni pływowych w dobrze rokujących akwenach wokół Wysp Brytyjskich. Kontrolnie oszacujemy moc całkowitą pływów obserwowanych w tych regionach. W oparciu o „teorię fal pływowych” sprawdzimy, czy moc naszej farmy pływowej nie jest przypadkiem większa niż całkowita dostępna moc. Miejsca o dużych pływach u wybrzeży Wysp Brytyjskich pokazano na rys. G.7.

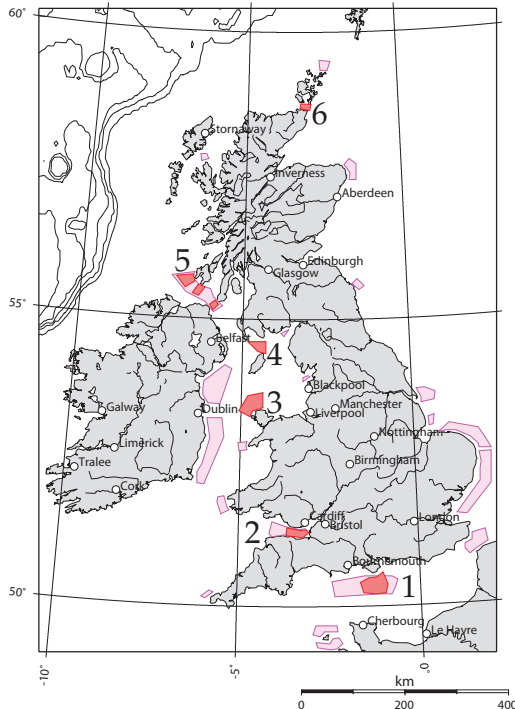
Typowy prąd szczytowy w sześciu lokalizacjach o silnych pływach oszacowałem na podstawie wykresów z *Almanachu żeglugi Reeda* (margines błędu w moich szacunkach może wynosić nawet 30%). A może przeszacowałem lub niedoszacowałem powierzchnię tych obszarów? Nie badałem dna morskiego, nie wiem więc, czy nie ma tam jakichś przeszkód – gdzieś może być za płytko, za głęboko lub zbyt niebezpiecznie, by posadzić tam elektrownię.

Uznając te obszary niepewności, całkowitą moc z farm pływowych szacuję na **9 kWh na osobę dziennie**. To 9% mocy napływającej, wzmiankowanej na str. 91, a wynoszącej 100 kWh na osobę dziennie (pozyskiwanie 1,1 kWh/d/o w Kanale Bristolskim, w obszarze 2, mogłoby się kłócić z produkcją energii na zaporze Severn; zależałoby to od tego, czy farma pływowa znacząco zwiększa naturalne tarcie w kanale czy też je zastępuje).

U (m/s)	U (węzły)	farma pływowa moc (W/m <sup>2</sup> )
0,5	1	1
1	2	8
2	4	60
3	6	200
4	8	500
5	10	1000

Tabela G.6. Gęstość mocy farmy pływowej (w watach na metr kwadratowy dna morskiego) w funkcji prędkości przepływu  $U$  (1 węzeł = 1 mila morska na godzinę = 0,514 m/s.) Gęstość mocy obliczamy przy pomocy wzoru  $(\pi/200)^{1/2} \rho U^3$  (równanie (G.10)).





Rys. G.7. Obszary wokół Wysp Brytyjskich, gdzie szczytowe pływy przekraczają 1 m/s. Sześć obszarów zaznaczonych na ciemnoczerwono opisujemy w tabeli G.8:

kanal La Manche (na południe od Wyspy Wight);

1. Kanał Bristolki;
2. na pn. od Anglesey;
3. na pn. od Wyspy Man;
4. pomiędzy Irlandią Pn, Mull of Kintyre i wyspą Islay;
5. cieśnina Pentland Firth (między Orkadami i Szkocją) i sam archipelag Orkadów.

Potężne pływy charakteryzują również okolice Wysp Normandzkich, ale te nie są częścią Zjednoczonego Królestwa. Drugie miejsce zajmują regiony na Morzu Północnym, od ujścia Tamizy (Londyn) po Wash (Kings Lynn). Bładoróżowe obszary wyznaczają wody głębsze niż 100 m. Dane dotyczące pływów pochodzą z Almanachu żeglugi Reeda i Atlasu DTI Brytyjskich Zasobów Morskiej Energii Odnawialnej (2004).

Region	U (węzły)		gęstość powierzchni mocy (W/m <sup>2</sup> )	powierzchnia średnia (km <sup>2</sup> )	moc średnia (kWh/d/o)	moc napływająca			
	PK	PS				d (m)	w (km)	PK (kWh/d/o)	PS (kWh/d/o)
1	1,7	3,1	7	400	1,1	30	30	2,3	7,8
2	1,8	3,2	8	350	1,1	30	17	1,5	4,7
3	1,3	2,3	2,9	1000	1,2	50	30	3,0	9,3
4	1,7	3,4	9	400	1,4	30	20	1,5	6,3
5	1,7	3,1	7	300	0,8	40	10	1,2	4,0
6	5,0	9,0	170	50	3,5	70	10	24	78
Suma					9				

(a)

(b)

Tabela G.8.

(a) Oszacowania mocy pływów przy założeniu, że farmy pływowe działają podobnie, jak wiatrowe.

Gęstość mocy to średnia moc na jednostkę powierzchni dna morskiego. Sześć regionów wymieniono na rys. G.7

PK = pływy kwadraturowe.

PS = pływy syzygijne.

(b) Dla porównania, tabela podaje moc docierającą, oszacowaną przy pomocy równania (G.1) (str. 326).

v (m/s)	v (węzły)	gęstość mocy tarcia (W/m <sup>2</sup> )		gęstość mocy farmy pływowej (W/m <sup>2</sup> )
		R <sub>1</sub> = 0,01	R <sub>1</sub> = 0,003	
0,51	1	1,25	0,4	1
1	2	10	3	8
2	4	80	24	60
3	6	270	80	200
4	8	640	190	500
5	10	1250	375	1000

Tabela G.9. Gęstość mocy tarcia  $R_{1pt}^3$  (w watach na metr kwadratowy dna morskiego) w funkcji prędkości przepływu, przy założeniu  $R_1 = 0,01$  lub  $0,003$ . Flather (1976) zakłada  $R_1 = 0,0025-0,003$ ; Taylor (1920) przyjmuje  $0,002$ . (1 węzeł = 1 mila morska na godzinę =  $0,514$  m/s.) Ostatnia kolumna przypominia moce farmy pływowej oszacowane w tabeli G.6.

Więcej na ten temat w: Kowalik (2004), Sleath (1984).

## Szacowanie zasobów pływowych na podstawie tarcia przydenne

Można oszacować dostępną moc pływów sprawdzając, ile mocy już zostało rozproszone na tarcie na dnie morza. Warstwa turbin rozmieszczonych tuż przy dnie może stanowić dno zastępcze, stawiając przepływającej wodzie podobny opór, jaki wcześniej stawiało dno i pozyskując moc zbliżoną do mocy wcześniej rozpraszanej na opór, nie zmieniając istotnie pływów.

Jaka jest więc ta moc rozproszona na tarcie przydenne? Niestety, nie istnieje prosty model tarcia przydenne. Zależy ono od szorstkości dna i materiału, z jakiego się składa. Nawet kiedy znamy te parametry, nie dysponujemy dobrym wzorem. Według powszechnie stosowanego modelu, wielkość naprężenia (siły na jednostkę powierzchni) wynosi  $R_1 \rho U^2$ , gdzie  $U$  to średnia prędkość przepływu, a  $R_1$  to bezwymiarowa wartość zwana współczynnikiem tarcia. Moc rozproszoną na jednostkę powierzchni otrzymamy mnożąc naprężenie przez prędkość. Tabela G.9 prezentuje moc rozproszoną na tarcie,  $R_1 \rho U^3$ , przy założeniu, że  $R_1 = 0,01$  lub  $R_1 = 0,003$ . Przy takich wartościach współczynnika tarcia, moc tarcia jest bardzo zbliżona do oczekiwanej mocy farmy pływowej. To dobra wiadomość, oznacza bowiem, że obsadzenia dna morskiego lasem podwodnych wiatraków, rozmieszczonych co 5 średnic, nie zmieni istotnie przepływu. Naturalne tarcie działa przecież podobnie.

## Baseny pływowe z dopompowaniem

Trik z pompowaniem sztucznie podwyższa amplitudę pływów w basenie, co zwiększa pozyskiwaną moc. Koszt energetyczny *wpompowania* dodatkowej ilości wody w trakcie przyływu zwraca się z nawiązką, kiedy wypuści się tę wodę w czasie odpływu. Podobnie, dodatkowe ilości wody można *wypompować* w trakcie odpływu, a potem wpuścić je z przyływem. Triku z pompowaniem używa się czasem w instalacji La Rance, podnosząc moc generowaną netto o jakieś 10% (Wilson i Balls, 1990). Wypracujmy teoretyczne wartości graniczne dla tej technologii.

amplituda pływów (pół wysokości) $h$ (m)	optymalne podniesienie wysokości $b$ (m)	moc z dopompo- waniem (W/m <sup>2</sup> )	moc bez dopompo- wania (W/m <sup>2</sup> )
1,0	6,5	3,5	0,8
2,0	13	14	3,3
3,0	20	31	7,4
4,0	26	56	13

Tabela G.10. Teoretyczna gęstość mocy elektrowni pływowej z dopompowaniem, przy braku ograniczeń co do wysokości ścian basenu.

Zakładam, że sprawność generacji wynosi  $\epsilon_g = 0,9$ , a sprawność pompowania  $\epsilon_p = 0,85$ . Przyjmijmy, że wysokość pływu wynosi  $2h$ . W uproszczeniu założymy, że ceny zakupu i sprzedaży prądu są stałe, stąd też optymalne podniesienie wysokości lustra wody  $b$  powyżej linii naturalnego przyływu



wynika z równania (koszt marginalny pompowania = marginalny zwrot na dodatkowych ilościach wody):

$$b/\epsilon_p = \epsilon_g (b+2h)$$

Definiując sprawność generacji w obie strony  $\epsilon = \epsilon_g \epsilon_p$ , dowiadujemy się, że:

$$b = 2h \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$$

Dla przykładu, przy wysokości pływu  $2h = 4$  m, i sprawności w obie strony  $\epsilon = 76\%$ , optymalne podniesienie wysokości wynosi  $b = 13$  m. To maksymalne podwyższenie uzasadnione kosztowo, o ile cena prądu jest stała.

Założmy, że taki trick stosujemy również w trakcie odpływu (oznacza to, że basen musi mieć w pionie 30 m!). Moc dostarczona na jednostkę powierzchni wyniesie wówczas:

$$\left( \frac{1}{2} \rho g \epsilon_g (b + 2h)^2 - \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\epsilon_p} b^2 \right) / T$$

gdzie  $T$  to czas pomiędzy przyływem i odpływem. Możemy to wyrazić jako maksymalną możliwą gęstość mocy bez pompowania,  $\epsilon_g 2\rho g h^2 / T$ , pomnożoną przez współczynnik podniesienia wysokości:

$$\left( \frac{1}{1 - \epsilon} \right)$$

wynoszący w przybliżeniu 4. Tabela G.10 wskazuje, jaką teoretyczną gęstość mocy można uzyskać dzięki pompowaniu. Niestety, potencjał pompowania rzadko można w pełni wykorzystać, z uwagi na koszty budowy basenu. Pełna eksploatacja pomp wymaga basenu 4-krotnie przewyższającego wysokość pływu i zwiększa moc dostarczoną czterokrotnie. Niestety ilość materiału do wybudowania przegrody w morzu o wysokości  $H$  rośnie jako  $H^2$ , stąd też koszt wybudowania ściany czterokrotnie wyższej wzrośnie bardziej niż czterokrotnie. Zapewne lepiej przeznaczyć te pieniądze na powiększenie basenu w poziomie niż w pionie.

Niemniej jednak z triku z pompowaniem można skorzystać za darmo zawsze wtedy, gdy wysokość naturalnych pływów jest mniejsza od maksymalnej – wówczas wodę w czasie przyływu można dopompować do poziomu maksymalnego.

amplituda pływów (połowa wys.) $h$ (m)	optymalne podniesienie wysokości $b$ (m)	moc z dopompowaniem (W/m <sup>2</sup> )	moc bez dopompowania (W/m <sup>2</sup> )
1,0	1,0	1,6	0,8
2,0	2,0	6,3	3,3
3,0	3,0	14	7,4
4,0	4,0	25	13

Tabela G.11. Gęstość mocy systemu z dopompowaniem, przy ograniczeniu wysokości do maksymalnej wysokości pływów (syzygijnych). Sprawdza się to np. w trakcie pływów kwadraturowych, kiedy dopompowanie zwiększa wysokość pływu do wysokości pływu syzygijnego.

Tabela G.11 pokazuje, ile mocy dostarczy basen, gdzie podwyższenie wysokości wynosi  $h$ , czyli wysokość pływów w basenie to zaledwie dwukrotność wysokości na zewnątrz. Podwojenie wysokości jest łatwe przy pływach kwadraturowych, jako że najczęściej są one o połowę niższe niż syzygijne. Dopompowywanie wody w trakcie pływu kwadraturowego do wysokości pływu syzygijnego sprawia, że pływ kwadraturowy dostarcza aż dwa razy więcej mocy niż bez pompowania. Taki system z dopompowaniem, w cyklu dwutygodniowym, dawałby różnice w produkcji mocy nie cztero-, lecz dwukrotne.

### Nieprzerwana produkcja dzięki dwóm basenom

Oto zgrabny pomysł: budujemy dwa baseny, z których jeden jest „pełny”, a drugi „pusty”. Z każdym przyplływem basen „pełny” jest dopełniany, z każdym odpływem basen „pusty” jest opróżniany. Tego dopełniania i opróżniania można dokonywać albo pasywnie za pomocą śluz, albo aktywnie, za pomocą pomp (stosując opisany powyżej trik). Kiedy tylko pojawia się zapotrzebowanie na moc, woda płynie z basenu pełnego do basenu pustego lub też (co daje lepsze wykorzystanie energii) między jednym z basenów a morzem. Koszty inwestycyjne takiej instalacji dwubasenowej mogą być wyższe, bo trzeba zbudować więcej ścian, ale za to moc jest dostępna bez przerwy i podaż energii podąża za popytem.

Możemy wykorzystać energię wyprodukowaną w pustym basenie na wypompowanie wody do basenu pełnego w trakcie przyplwy. Podobnie w czasie odpływu możemy przy pomocy energii z pełnego basenu wypompować wodę z basenu pustego. To samopompowanie mogłoby zwiększyć moc dostarczoną bez konieczności zakupu energii z sieci. Instalacja dwubasenowa ma pewną rozkoszną cechę. Otóż przyplływ, który jest optymalnym momentem na *dopompowanie* wody do basenu wyższego, jest jednocześnie optymalnym momentem *produkcji* energii w basenie niższym. Analogicznie, odpływ jest idealnym momentem na wypompowanie wody z basenu niższego i produkcję prądu w basenie wyższym. Z prostego rachunku wychodzi mi, że dwulagunowy system zlokalizowany w miejscu o naturalnej wysokości pływu 4 m może – przy właściwym schemacie pompowania – dostarczać *stabilnej* mocy rzędu  $4,5 \text{ W/m}^2$  (MacKay, 2007a). W jednej z lagun poziom wody jest stale utrzymywany powyżej średniego poziomu morza, w drugiej – zawsze poniżej. Gęstość mocy  $4,5 \text{ W/m}^2$  jest o 50% większa niż maksymalna średnia gęstość mocy zwykłego basenu pływowego w tym samym miejscu ( $3 \text{ W/m}^2$ ). Stabilna moc dostarczona przez system lagun miałaby większą wartość niż niestabilna i mniej elastyczna moc ze zwykłego basenu pływowego.



Rys. G.12. Różne sposoby na dopompowanie. Dwa baseny ulokowane są na poziomie morza. (a) Prostą metodą ich wykorzystania jest przeznaczenie jednego na basen „wysoki”, a drugiego na „niski”. Kiedy zbliża się pora przyplwy, wpuszcza się lub wpompowuje (przy użyciu prądu ze źródeł zewnętrznych) wodę do basenu wysokiego. Kiedy zbliża się odpływ, z basenu niskiego wodę wypuszcza się lub wypompowuje. Kiedy tylko energia jest wystarczająco droga, można generować moc na zawołanie, wypuszczając wodę z basenu wysokiego do niskiego. (b) Inne rozwiązanie, które może dostarczyć więcej mocy na jednostkę powierzchni, nie przewiduje przepływu wody między basenami. Kiedy jeden basen napełnia się po brzegi lub zupełnie opróżnia przy pomocy pompy, drugi basen dostarcza prąd sieci stabilnej, podążającej za zapotrzebowaniem mocy. Pompy może zasilać energia ze źródeł niestabilnych (takich jak wiatr), zbędna moc z sieci (np. z elektrowni jądrowych) lub też energia z drugiej części instalacji – prąd z jednego basenu pozwala dopompować lub wypompować wodę z drugiego basenu.

System dwubasenowy mógłby również służyć jako szczytowo-pompo-  
wy magazyn energii.

## Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 325 **Sprawność turbin pływowych 90%...** Turbiny osiągają sprawność 90% i wyższą dla głowic 3,7 m lub większych. Baker i in. (2006).
- 334 **Nieprzerwana produkcja dzięki dwóm basenom.** Dwubasenową elektrownię pływową zbudowano w Chinach, w Haishan na wyspie Maoyan. Pojedynczy generator umieszczony między basenami – co pokazuje rys. G.12(a) – dostarcza moc nieprzerwanie i generuje średnio 39 kW. [2bqap].

Zalecana lektura: Shaw i Watson (2003b); Blunden i Bahaj (2007); Charlier (2003a,b). Więcej nt. tarcia przydennego i zmian przepływów wraz z głębokością w: Sleath (1984). Więcej nt. oszacowań zasobów pływowych w Wielkiej Brytanii w: MacKay (2007b). Więcej nt. lagun pływowych w: MacKay (2007a).