

## ЕНЕРГІЯ ОКЕАНУ

### Енергія хвиль

З точки зору енергетики морські хвилі є концентрованою формою вітрової енергії. Вітри, що дмуть над океаном, розводять хвилювання, сила якого залежить від швидкості вітру і довжини пробігу. До берегів Чукотки доходять хвилі, що зародилися біля берегів Антарктиди. У хвилях частки води здійснюють кругові рухи. Висота хвилі дорівнює діаметру кругової орбіти частки на поверхні. З глибиною діаметри орбіт швидко убувають. Накочувавшись на мілководді, хвиля зростає по висоті і зменшується по довжині (відстані між гребенями). Біля дна частки рухаються зворотно-поступально. Хвилі в морі мають різну довжину і швидкість, висоти окремих хвиль при накладенні підсумовуються.

Величезні кількості енергії можна отримати від морських хвиль. Потужність, переносима хвилями на глибокій воді, пропорційна квадрату їх амплітуди і періоду. Тому найбільший інтерес представляють довгоперіодні ( $T \sim 10$  с) хвилі великої амплітуди ( $a \sim 2$  м), що дозволяють знімати з одиниці довжини гребеня в середньому від 50 до 70 кВт/м.

Механічна енергія хвилі пропорційна довжині і квадрату висоти. Енергія хвилі шестиметрової висоти перевищує 100 кВт на 1 погонний метр фронту хвилі. Середня для океанських хвиль енергія оцінюється в 50 кВт/м. Фахівці підрахували, що з врахуванням неминучих втрат використання хвильової енергії біля берегів Англії дало б 120 ГВт - це більше, ніж сумарна потужність електростанцій країни. Сумарна хвильова потужність Світового океану оцінюється в 2700 ГВт. У Росії можливе освоєння енергії морських хвиль на побережжі тихоокеанських морів і Баренцева моря.

Можливість перетворення енергії хвиль в електроенергію доведена вже давно. Існує безліч технічних рішень, що дозволяють реалізувати цю можливість. Останніми роками інтерес до хвильової енергетики різко посилюється, особливо в Японії, Великобританії, країнах Скандинавії, внаслідок чого експерименти переросли в стадію реалізації проектів. Сучасна тенденція розробки таких установок, як і взагалі установок на поновлюваних видах енергії, орієнтується на одиничні модулі помірної потужності (близько 1 МВт) розміром порядку 50 м уздовж фронту хвилі. Подібні пристрої вже зараз можуть принести певні економічні вигоди в разі заміни дизельних генераторів, що забезпечують енергією віддалені селища, особливо на островах.

Переваги та недоліки хвильової енергетики.

Унаслідок непостійності морського хвилювання необхідно передбачати системи акумуляції енергії (ГАЕС і тому подібне)

Розвиток хвильової енергетики зв'язаний із значними труднощами. Їх детальний аналіз дан нижче, але в основному вони зводяться до наступного.

1) Хвилі нерегулярні по амплітуді, фазі і напрямку руху. Проектувати ж пристрої для ефективного витягання енергії в широкому діапазоні величин, що варіюються, не просто.

2) Завжди є вірогідність виникнення екстремальних штормів і ураганів, під час яких утворюються хвилі дуже великої інтенсивності. Конструкції хвилеенергетичних пристроїв повинні, зрозуміло, їм протистояти. Приблизно раз в 50 років виникають хвилі, амплітуда яких в 10 разів перевищує середню. Отже, під час штормів конструкції повинні витримувати навантаження, приблизно в 100 разів більші, ніж при нормальній роботі.

3) Подібні пікові величини потужності властиві головним чином саме хвилям на глибокій воді, що проходять з боку відкритого моря. Труднощі, пов'язані із створенням енергетичних пристроїв для таких хвильових режимів, їх обслуговуванням, утриманням в заданому положенні, передачею енергії на берег, викликають побоювання.

4) Зазвичай період хвиль  $T \approx 5 + 10$  с (частота порядку 0,1 Гц). Досить важко пристосувати цей нерегулярний повільний рух до генерування електроенергії промислової частоти, яка в 500 разів вище.

5) Вибрати відповідний тип пристрою для перетворення енергії зі всього їх різноманіття — складне, часто просто непосильне завдання.

6) Звичка мислити категоріями великомасштабної енергетики промислово розвинених районів веде до спокуси створювати лише крупні хвильові електростанції в місцях з високими хвильовими потенціалами. При цьому існує тенденція ігнорувати зони помірних потенціалів, де часто використання хвильової енергії виявляється економічно більш виправданим.

Переваги хвильової енергії полягають в тому, що вона досить сильно сконцентрована, доступна для перетворення і на будь-який момент часу може прогнозуватися залежно від погодних умов. Створюючись під дією вітру, хвилі добре зберігають свій енергетичний потенціал, поширюючись на значні відстані. Наприклад, крупні хвилі, що досягають побережжя Європи, зароджуються під час штормів в центрі Атлантики і навіть в Карибському морі. Важливою перевагою хвильової енергетики є можливість вживання модульного принципу - послідовне спорудження блоків обмеженої потужності, без великих початкових витрат на капітальне будівництво, властивих приливним електростанціям.

### **Енергія приливів. Посилення приливів**

Приливні коливання рівня у величезних океанах планети сповна передбачені. Основні періоди цих коливань – добові, тривалістю близько 24 год. і півдобові — близько 12 год. 25 хв. Різниця рівнів між послідовними найвищим і найнижчим рівнями води – висота приливу. Діапазон зміни цієї величини складає 0,5 – 10 м. Перша цифра найбільш характерна, друга досягається і навіть перевищується лише в деяких особливих місцях поблизу побережжя континентів. Під час приливів і відливів переміщення водних мас утворює приливні течії, швидкість яких в прибережних протоках і між островами може досягати приблизно 5 м/с.

Підняту на максимальну висоту під час приливу воду можна відокремити від моря греблею або греблею в басейні площею  $S$ . Якщо потім під час відливу пропустити цю масу води через турбіни, то можна отримати потужність

$$P = \rho g S R^2 / 2, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність води,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $R$  – перепад рівнів, м;  
 $S$  – площа приливної басейну,  $\text{м}^2$ .

Вочевидь, що місця з великими висотами приливів мають і великі потенціали приливної енергії. Перетворення енергії приливів використовувалося для приведення в дію порівняно малопотужних пристроїв ще в середньовічній Англії і в Китаї. З сучасних ПЕС найбільш відомі великомасштабна електростанція Ране потужністю 240 МВт, розташована в естуарії річки Ла Ране, що впадає в затоку Сіна Мало (Бретань, Франція), і невелика, але принципово важлива дослідна станція потужністю 400 кВт в Кислій губі на побережжі Баренцева моря в Росії. Поведінка приливів може бути передбачена досить точно, з погрешністю менше 4%. Таким чином, приливна енергія виявляється вельми надійною формою поновлюваної енергії.

Аналізом поведінки приливів займалися багато відомих математиків і фізиків минулого, включаючи Ньютона, Ері, Лапласа, Джорджа Дарвіна, Кельвіна. Проте треба мати на увазі, що сучасний аналіз і передбачення приливів, засновані на математичних методах гармонійного аналізу, базуються на основоположних роботах лорда Кельвіна, виконаних в Глазго. Повне фізичне розуміння всіх деталей динаміки приливів все ще не досягнуто у зв'язку із складною топологією океанських басейнів.

Рідина в океанах стримується на поверхні Землі, що обертається, силами гравітації. Гравітаційна ж взаємодія Землі з Місяцем і Сонцем обурює ці сили, утворюючи приливи. Приливна енергія, знята з турбін ПЕС, через які протікає вода в процесі приливів, відбирає, таким чином, частину кінетичної енергії Землі, що обертається. Якщо залучити у всьому світі всі скільки-небудь значні місця з досить високими приливами, то згідно розрахункам це приведе до скорочення періоду обертання Землі на одну добу за 2000 років: це не так вже страшно для довкілля.

Відомо, що приливна хвиля рухається з швидкістю

$$c = \sqrt{gh}, \quad (2)$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння, рівне  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  
 $h$  – глибина затоки (моря), м.

Резонанс для приливної хвилі, що насувається з боку відкритого моря, настає за умов, коли

$$L = j\lambda / 4 \quad (3)$$

де  $j$  непарне ціле;

$L$  – протяжність затоки у бік материка, м;

$\lambda$  – довжина хвилі вимушених коливань у відкритому морі, м.

Відповідна резонансна частота  $f_r$ , Гц, і період  $T_r$ , с, зв'язані між собою таким чином:

$$f_r = 1/T_r = c/\lambda \quad (4)$$

Звідси

$$T_r = \lambda / c = 4L / j(gh)^{1/2} \quad (5)$$

Резонанс виникає, коли період власних коливань відповідного басейну виявляється рівним (кратним) періоду вимушених коливань приливу у відкритому морі  $T_f$  в цьому випадку

$$T_f = \frac{4L}{(gh)^{1/2}}; \frac{L}{h^{1/2}} = \frac{j}{4}(g)^{1/2}T_f \quad (6)$$

Півдобовий період приливу рівний 12 год. 25 хв. (45000 с.), таким чином, для випадку  $j=1$  (основна гармоніка) резонанс настає, коли

$$L / h^{1/2} = (45\,000 \text{ с}) 9,8 \text{ м/с}^2)^{1/2} / 4 = 36\,000 \text{ м}^{1/2} \quad (7)$$

В даному прикладі видно близький збіг власної частоти естуарію з характерною частотою приливу, внаслідок чого у вказаному естуарії досягаються значні амплітуди приливної руху, висота приливу тут доходить до 10 – 14 м.

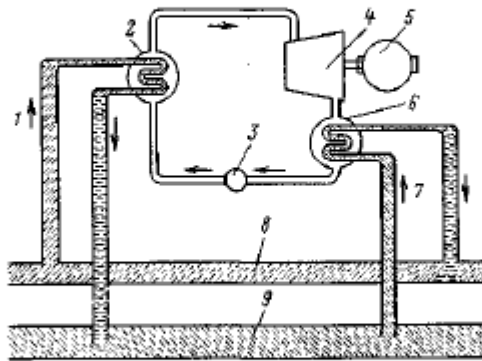
На практиці естуарії і затоки, звичайно, не мають таких однозначно певних розмірів, які використані в прикладі. Тому аналіз резонансних умов сильно ускладнюється. Стало необхідним проводити моделювання природних умов в лабораторних хвильових басейнах з використанням відповідної техніки масштабування і шляхом теоретичного аналізу. Це дуже важно у зв'язку з тим, що одним з основних питань при проектуванні приливних енерговузлів є з'ясування того, як дамба і гребля впливатимуть на резонансні умови в басейні. Деякі розрахунки, виконані для естуарію р. Северн, показали можливість зменшення і збільшення висоти приливів залежно від розміщення ПЕС. Будівництво ПЕС дуже дороге, аби дозволити розробникам помилятися.

За відповідних умов висота приливу може посилюватися до 10 м. Малоприсадними для розміщення ПЕС вважаються затоки і естуарії, висота приливу в яких не перевищує 2 м. Але незалежно від цього у всіх випадках потрібний ретельний аналіз місцевих умов.

### Теплова енергія океану. ОТЕС

Світовий океан — найбільший природний колектор сонячного випромінювання. У ньому між теплими, поглинаючими сонячне випромінювання поверхневими водами і холоднішими придонними досягається різниця температур в  $20^{\circ}\text{C}$ . Це забезпечує безперервно поповнюваний запас теплової енергії, яка принципово може бути перетворена в інші види. Сам термін перетворення теплової енергії океану ОТЕС— ocean thermal energy conversion— означає перетворення деякої частини цієї теплової енергії в роботу і далі в електроенергію.

На рисунку 1 приведена схема однієї з установок, що дозволяють здійснити процес такого перетворення. По суті — це теплова машина, що наводиться в дію різницею температур між «холодною»  $T_c$ -водою, піднятою з відповідної глибини, і «гарячою» водою з температурою  $T_h = T_c + \Delta T$ , забраною з поверхні. Робоча рідина (робоче тіло), циркулюючи за замкнутою схемою, відбирає тепло від гарячої води в теплообміннику випарника, в паровій фазі наводить в дію турбіну, пов'язану з генератором, а потім конденсується в охолоджуваному холодною водою конденсаторі. На цьому цикл завершується.



1 — подача теплої води; 2 — випарник; 3 — насос подачі робочого тіла; 4 — турбіна; 5 — генератор; 6 — конденсатор; 7 — подача холодної води; 8 — поверхня океану; 9 — океанські глибини.

Рисунок 1 – Схема перетворення теплової енергії океану. Теплова машина використовує перепад температур між поверхневими і глибинними водами океану

Нижче в деталях обговорюються лише системи, що працюють по замкнутому циклу. Можна уявити собі і інші системи, що наприклад використовують як робоче тіло саму морську воду і що працюють по відкритому циклу. Проте викладені тут і в наступному параграфі фізичні і географічні відомості можуть бути застосовані до будь-яких систем ОТЕС.

Почнемо з визначення  $P_0$  — потужності, що віддається теплою водою в ідеальній системі. Допустимо, що потік теплої води з об'ємною витратою  $Q$  поступає в систему при температурі  $T_h$  і покидає її при температурі  $T_c$  (температура холодних глибинних вод). При визначенні  $P_0$  ми, вочевидь,

робимо припущення про ідеальний теплообмінник. У такій системі, що ідеалізується, при  $\Delta T = T_h - T_c$

$$P_0 = \rho c Q \Delta T. \quad (8)$$

На основі другого початку термодинаміки максимальна механічна потужність, яку можна отримати від перетворення теплового потоку,

$$P_1 = \eta_k P_0, \quad (9)$$

де

$$\eta_k = \Delta T / T_h \quad (10)$$

є ККД ідеальної теплової машини Карно, що працює при перепаді температур між  $T_h$  і  $T_c = T_h - \Delta T$ . Безумовно, вихід в разі реальної системи буде істотно нижчий, ніж  $P_1$ . Реальні теплові машини працюють не по циклу Карно, швидше, їх цикл ближче до ідеального циклу парової турбіни Ренкіна. Проте ці вирази дозволяють проілюструвати можливості і обмеження ОТЕС. Згідно (8) — (10) ідеальна механічна вихідна потужність перетворювача теплової енергії рівна

$$P_1 = (Qc\rho / T_h)(\Delta T)^2. \quad (11)$$

Таким чином, для здобуття значних потужностей потрібні істотні потоки води навіть для випадку максимально можливого в океані перепаду температур. Це у свою чергу вимагає вживання громіздких і відповідно дорогих технічних засобів.

Зважаючи на те що  $P_1$  залежить від квадрата  $\Delta T$  досвід підказує економічну привабливість ідеї ОТЕС лише в районах, де  $\Delta T \geq 15^\circ \text{C}$ . Такі райони лежать в тропіках. Активно ведуться дослідження з проблеми ОТЕС на острові Гавайї ( $20^\circ$  північної широти,  $160^\circ$  західної довготи), на острові Науру ( $0^\circ$  північної широти,  $166^\circ$  східної довготи), в течії Гольфстрім поблизу півострова Флорида. У тропічних районах  $T_h$  і  $T_c$  мало змінюються від сезону до сезону, що повинне забезпечувати стабільне вироблення енергії протягом всього року.

Безумовно, стабільність і незалежність від капризів погоди — головні переваги ОТЕС як поновлюваного джерела енергії. Нижче перераховані інші важливі переваги ОТЕС.

1) У відповідних для розміщення перетворювачів районах обмеження на значення перетворюваних ресурсів накладають лише розміри установок.

2) Створення економічно виправданих установок вимагає лише деякого доопрацювання таких широко апробованих пристроїв, як теплообмінники і турбіни. Жодних абсолютно нових або технічно неможливих пристроїв не потрібно.

Головні недоліки — вартість і масштаби установок. Якби удалось досягти фактичної потужності  $P_1$ , то вартість стала б мінімальною, але принципові обмеження накладають необхідність враховувати в'язкість рідин і недосконалість теплообмінників. Приведені питомі витрати на створення однієї не так давно запущеної експериментальної океанської термальної електростанції (ОТЕС, не плутати з латинською ОТЕС) склали 40000 долл/кВт встановленої потужності. Проте аналіз, показує, що великомасштабні серійні ОТЕС будуть значно економічнішими, що робить саму концепцію ОТЕС гідною уваги. Відповідні роботи активно ведуться в США, Франції і Японії.

Один з чинників збільшення вартості систем ОТЕС — дорожнеча їх обслуговування у відкритому морі і передачі енергії на берег. Проте існують прибережні райони, де дно різко падає і устаткування ОТЕС може бути розміщене на суші. Одне з таких місць — острів Науру в південній частині Тихого океану.