

Лобунець Ю.М.



Лобунець Ю.М.

Інститут термоелектрики НАН і МОН молодьспорту України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОТЕС С ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

Розглянута можливість використання термоелектричних генераторів у системах перетворення теплової енергії океану (ОТЕС). Дано оцінку ефективності таких схем, показано можливість створення ОТЕС з прийнятими техніко – економічними характеристиками.

Ключові слова: тепла енергія океану; термоелектричний генератор; ОТЕС

The possibility of using thermoelectric generators in systems of ocean thermal energy conversion (OTEG) is considered. Performance evaluation of such configurations is made, the possibility of creating OTEG with acceptable technical and economic features is shown.

Key words: ocean thermal energy; thermoelectric generator; OTEC.

Вступ

Світовий океан є природним акумулятором сонячної енергії, тепловміст якого оцінюється в 20...25 кВт·ч/м³. Незначної частини енергії, що зберігається в океані, було б достатньо для покриття всіх потреб людства. Однак цей ресурс важкодоступний, оскільки сучасні технології перетворення теплової енергії океану ще не досягли рівня, достатнього для широкомасштабного застосування.

Незважаючи на те, що низка реалізованих пілотних проектів підтвердила можливість отримання цілком прийнятних техніко-економічних характеристик ОТЕС [1, 2] ця технологія не має комерційного розвитку. Причина цього – необхідність великих капіталовкладень у здійснення проектів ОТЕС – вони оцінюються сумою майже 1 млрд. \$ США для станції потужністю 200...300 МВт, що, природно, є серйозним стримуючим фактором на шляху використання джерела енергії. Тим не менше, дослідження і роботи в галузі ОТЕС не припиняються. Вони направлені, в першу чергу, на відпрацювання найбільш капіталоемних компонентів системи – теплообмінників, турбін, трубопроводів холодної і теплої води.

Як показує досвід, використання сучасних систем перетворення відтворюваних джерел енергії (фотоелектричні перетворювачі, вітродвигуни), їх широке запровадження стало можливим завдяки комерційному використанню малопотужних систем (майже 1...100 кВт) й введенню спеціальних поглинаючих тарифів, що забезпечують прибутковість експлуатації таких систем. Для перетворювачів теплової енергії океану використання малопотужних генераторів вважається неприйнятним, оскільки суттєвий вплив на економічність системи надає масштабний фактор – зі зниженням рівня

потужності, нижчої ніж, 10 МВт, питомі капіталовкладення в ОТЕС різко зростають (рис. 1.). Це пов'язано з особливостями використовуваної системи перетворення енергії, заснованої на використанні паротурбінного циклу на низькокиплячому теплоносієві.

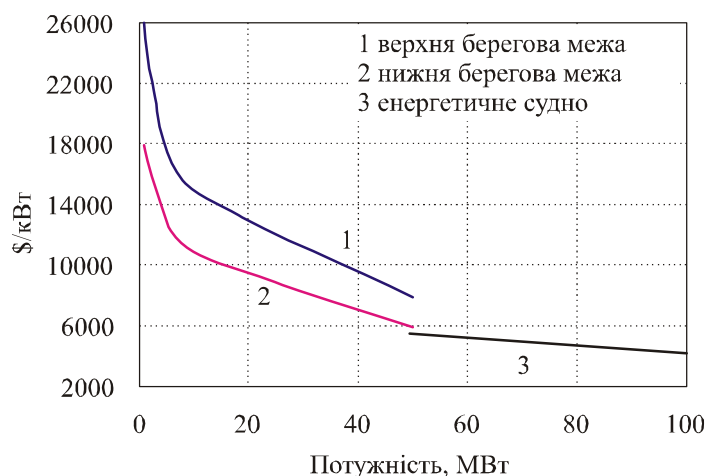


Рис. 1. Залежність питомої вартості ОТЕС від рівня потужності, [1].

У запропонованій роботі розглядається можливість використання в ОТЕС термоелектричного перетворювача теплової енергії; аналізуються можливості використання таких пристроїв у діапазоні потужностей майже 0.1 МВт.

Схема ОТЕС з термоелектричним перетворювачем енергії (ОТЕС)

Подібно до класичної схеми ОТЕС в розглядуваній схемі як джерело теплової енергії використовується тепла вода поверхневих шарів океану, а як сток тепла – холодна вода глибинних шарів.

Основні елементи схеми:

- термоелектричний генератор із системами підведення й відведення тепла;
- трубопроводи холодної і теплої води;
- помпи;
- перетворювач постійного струму ОТЕС у змінний струм промислових параметрів (мережевий інвертор).

Усі елементи схеми, крім термоелектричного генератора, є стандартними; їх характеристики можна визначити, знаючи вихідні дані (потужність, витрати теплоносіїв, гідравлічний опір системи і т.п.).

Термоелектричний генератор являє собою батарею, яка складається з $n \times m$ стандартних модулів, оснащених системами підведення й відведення тепла у вигляді протиструмного теплообмінника. Особливістю схеми є суттєва залежність характеристик генератора від режиму протікання теплоносіїв. Зміна масової витрати впливає як на наявний та робочий перепад температур (тобто на потужність і ККД генератора), так і на термічний й гідравлічний опір теплообмінників (тобто на розміри та вартість пристрою, а також на затрати енергії на власні потреби). Тому при аналізі характеристик ОТЕС необхідно використати математичну модель, що враховує взаємозв'язок між вказаними параметрами з урахуванням особливостей реальної конструкції.

Для визначення характеристик генератора використаємо математичну модель ТЕГ протиструмного типу у вигляді [3]

$$\theta(J, Y) = C_1 + C_2 Y - 0.5 J^2 Y^2 / I_0, \quad (1)$$

де $C_1 = (a_2 Bi_x t_x - a_1) / (J - Bi_2 + a_2 (J + Bi_x));$ (2)

$$C_2 = C_1 (J + Bi_x) - Bi_x t_x; \quad (3)$$

$$a_1 = J^2 / I_0 - 0.5 J^2 (J - Bi_2) / I_0 + Bi_2 t_2; \quad (4)$$

$$a_2 = J - Bi_2 - 1. \quad (5)$$

Тут $\theta = T/t_0$ – безрозмірна температура термоелемента; Y – безрозмірна координата; $J = jeh/\lambda$ – безрозмірна густина струму; e – коефіцієнт термоЕРС; λ – коефіцієнт теплопровідності; α – коефіцієнт тепловіддачі; $Bi = \alpha h/\lambda$ – критерій Біо; $I_0 = z t_0$ – критерій Іоффе; $z = e^2 \sigma/\lambda$ – термоелектрична добротність матеріалу; h – висота термоелемента; $t_0 = t_2$ – визначальна температура; t_x – температура холодної води; t_2 – температура теплої води.

Індекси «x» і «2» відповідають холодній і теплій стороні термобатарей.

Для конкретизації поточного значення температур теплоносіїв t_x, t_2 скористаємося відомим виразом для перепаду температур теплоносія в протиструмному теплообміннику

$$\Delta t = A(t_{20} - t_{x0}), \quad (6)$$

де t_{20} і t_{x0} – початкові температури теплоносіїв;

$$A = 1 / (1 + W / KS); \quad (7)$$

$W = G_0 C_p$ – водяний еквівалент теплоносія, кДж/сек; $K = 1 / (1/\alpha_2 + 1/\alpha_x + h/\lambda)$ – коефіцієнт теплопередачі. Вт/м²К; S – поверхня теплообміну, м².

Вважаючи зміну температур теплоносія в межах одного модуля настільки малою, що нею можна знехтувати, отримуємо вирази для температур теплоносіїв

$$t_x(x) = t_{x0} + dt; \quad (8)$$

$$t_2(x) = t_{20} - dt; \quad (9)$$

де

$$dt = \Delta t / n;$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1 – 9), можна знайти розподіл температур в термобатарей й, відповідно потужність термоелектричного генератора.

Як зазначалося вище, параметри термоелектричного генератора суттєво залежать від витрати теплоносіїв та інтенсивності теплообміну на поверхнях модулів. Суттєвий вплив на економічність ОТЕС також чинить гідравлічний опір теплообмінника, від якого залежать затрати потужності на власні потреби. Всі ці параметри взаємопов'язані, вигляд цих зв'язків визначається в основному конструкцією теплообмінника.

Для конкретизації вихідних даних використовуємо характеристики стандартного пластинчастого теплообмінника типу Funke FP-10 потужністю 100 кВт (рис. 2).

Наведені на рисунку дані апроксимуються залежностями типу

$$S(G_o, dP) = (aG_o - b) dP^c; \quad (10)$$

$$\alpha(G_o, dP) = d G_o dP^e, \quad (11)$$

де G_o – витрата теплоносія, кг/сек.

Як вихідні використовуємо також такі дані:

- температура теплої води $t_{zo} = 27$ °С;
- температура холодної води $t_{xo} = 5$ °С;
- добротність термоелектричного модуля $z = 0.003$;
- висота термоелементів $h = 0.5$ мм;
- розміри модуля 40×40 мм;
- вартість одного модуля – 3 \$;
- питома вартість теплообмінника – 250 \$/м²;
- сумарна довжина трубопроводів 3000 м;
- ціна трубопроводу – 10 \$/м;
- вартість насосів – 75 \$/(кг/сек);
- ціна інвертора – 150 \$/кВт;

Усі цінові характеристики взято з каталогів виробників [4].

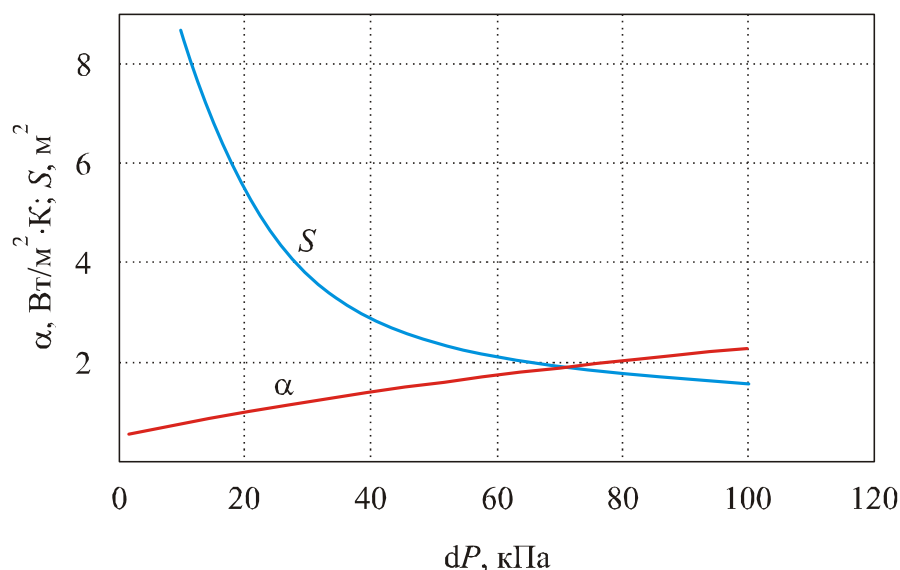


Рис. 2. Взаємозв'язок між інтенсивністю теплообміну α , Вт/см²К площею теплообмінника S , м², і гідралічним опором dP теплообмінника потужністю 100 кВт (відповідає ОТЕС потужністю 1 кВт).

Аналіз математичної моделі ОТЕС показав, що в розглянутих умовах визначальним режимним параметром, який суттєво впливає на вартість системи в цілому, є гідралічний опір теплообмінників, який можна варіювати в досить широких межах заданій потужності теплообмінника й витрати теплоносія (відповідно до принципу гідротеплової аналогії при цьому відповідно змінюється й термічний опір). Питома вартість ТЕГ, оптимізованого за витратою теплоносія для різних значень гідралічного опору теплообмінників, ілюструє рис. 3.

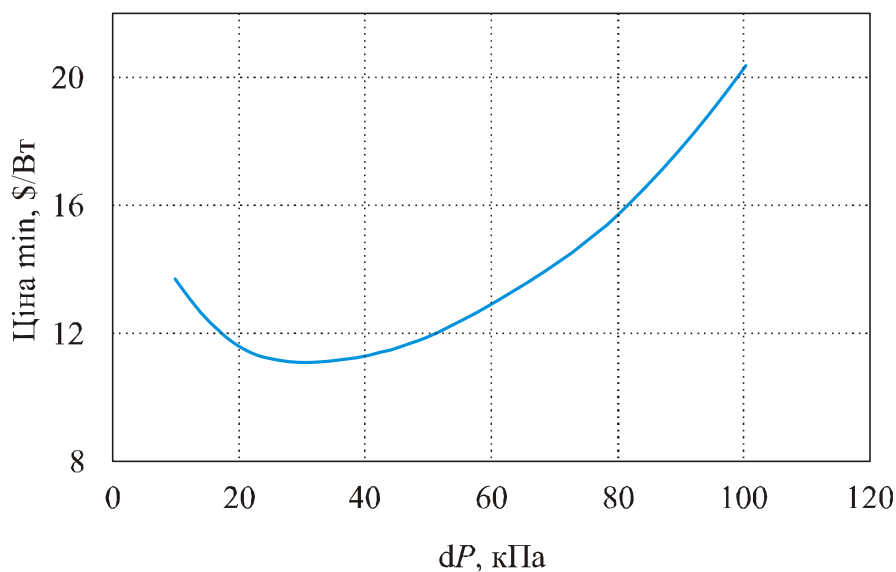


Рис. 3. Залежність питомої вартості ТЕГ (\$/Вт корисної потужності) від гідравлічного опору теплообмінника.

На рис. 4. показано залежності відносної корисної потужності (N_{net}/N_o), повної потужності N_o , відносної потужності живильних насосів (N_{pump}/N_o) і питомої вартості ОТЕГ (\$/Вт) від витрати теплоносія (кг/сек) для генератора з корисною потужністю 100 кВт.

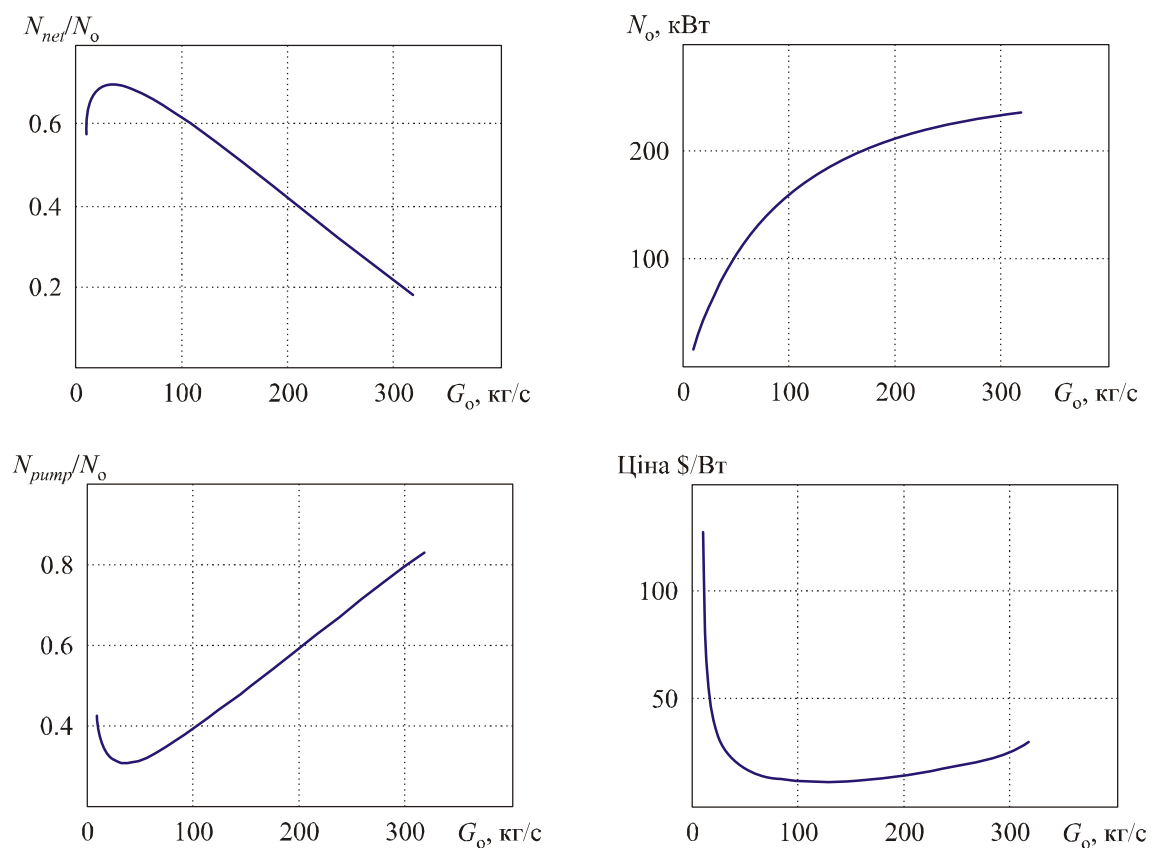


Рис. 4. Залежності характеристик ОТЕС потужність 100 кВт від витрати теплоносія (кг/с). N_o – повна потужність; N_{net}/N_o – відносна корисна потужність; N_{pump}/N_o – відносна потужність живлень носіїв; ціна – питома вартість ОТЕС, \$/кВт.

Отримані дані дають можливість визначити основну техніко-економічну характеристику розглянутої схеми ОТЕС – собівартість виробленої електроенергії. Для генератора потужністю 100 кВт із зазначеними вище вихідними даними вартість проекту становить:

- генеруюча частина – 1 млн. 110 тис. \$США;
- трубопроводи – 50 тис. \$США;
- насоси – 20 тис. \$США;
- інвертор – 15 тис. \$США;
- інші витрати (50%) – 600 тис. \$США;
- Усього: 1 млн. 795 тис. \$США;

За 100% завантаженні ОТЕС вироблення електроенергії становить майже 900 тис.кВтг/рік, що для стандартних строків амортизації в 20 років дає собівартість електроенергії майже 0.1 \$/кВтч. З урахуванням експлуатаційних витрат, податкових відрахувань і прибутки експлуатуючої організації ця цифра може зрости ще максимум на 50%, тобто до 0.15 \$/кВтг.

Для порівняння можна зазначити, що сучасний feed-in tariff для систем фотоелектричного перетворення сонячної енергії в розглянутому діапазоні потужностей становить 0.3...0.6 \$/кВтчг [4-6]. Тобто існуючі тарифи в 2...4 рази перевищують отримані для ОТЕСзначення, що підтверджує високу конкурентоспроможність проаналізованої схеми ОТЕС.

Висновки

Аналіз термоелектричної системи перетворення теплової енергії океану показав принципову можливість створення ОТЕС у діапазоні потужностей 100 кВт із техніко-економічними характеристиками, прийнятними для широкого комерційного використання.

Література

1. Luis A. Vega Ph.D, Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): An Update, 2010 *Offshore Technology Conference* (Houston, Texas, USA, 3-6 May 2010).
2. G.C. Nihous and M.A. Syed, A Financing Strategy for Small OTEC Plants, *Energy Convers. Mgmt.* 38(3), 201-211 (1997).
3. Лобунец Ю.Н. Методы расчета и проектирования термоэлектрических преобразователей энергии / Ю.Н. Лобунец – Киев: Наук. Думка, 1989. – 175 с.
4. <http://pv.energytrend.com/pricequotes>
5. <http://www.nerc.gov.ua/?id=4225>
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/06/japan-approves-feed-in-tariffs>

Надійшла до редакції 04.01.2013