

**Лобунец Ю.Н.**



*Лобунец Ю.Н.*

Институт термоэлектричества НАН и МОНмолодежиспорта Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

## **ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОТЭС С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

---

*Рассмотрена возможность применения генераторов для океанических термоэлектрических систем (ОТЭС) преобразования тепловой энергии. Проведена оценка эффективности таких схем, показана возможность создания ОТЭС с приемлемыми технико-экономическими характеристиками.*

**Ключові слова:** тепловая энергия океана; термоэлектрический генератор; ОТЭС.

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

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

### **Введение**

Мировой океан является естественным аккумулятором солнечной энергии, тепло-содержание которого оценивается в 20...25 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Незначительной части запасаемой в океане энергии было бы достаточно для покрытия всех нужд человечества. Однако этот ресурс является труднодоступным, поскольку существующие в настоящее время технологии преобразования тепловой энергии океана еще не достигли уровня, достаточного для широкомасштабного применения.

Несмотря на то, что ряд реализованных пилотных проектов подтвердил возможность получения вполне приемлемых технико-экономических характеристик ОТЭС [1, 2], эта технология не получает коммерческого развития. Причиной является необходимость больших капиталовложений в осуществление проектов ОТЭС – они оцениваются суммой порядка 1 млрд. \$ для станции мощностью 200...300 МВт, что, естественно, является серьезным сдерживающим фактором на пути использования рассматриваемого источника энергии. Тем не менее исследования и работы в области ОТЭС не прекращаются. Они направлены в первую очередь на отработку наиболее капиталоемких компонентов системы – теплообменников, турбин, трубопроводов холодной и теплой воды.

Как показывает опыт использования современных систем преобразования возобновляемых источников энергии (фотоэлектрические преобразователи, ветродвигатели), их широкое внедрение стало возможным благодаря коммерческому применению маломощных (1...100 кВт) систем и введению специальных поглощающих тарифов, обеспечивающих прибыльность эксплуатации таких систем. Для преобразователей тепловой энергии океана

использование маломощных генераторов считается неприемлемым, поскольку существенное влияние на экономичность системы оказывает масштабный фактор – при снижении уровня мощности ниже 10 МВт удельные капиталовложения в ОТЕС резко возрастают (рис. 1) [1]. Это связано с особенностями используемой системы преобразования энергии, основанной на применении паротурбинного цикла на низкокипящем теплоносителе.

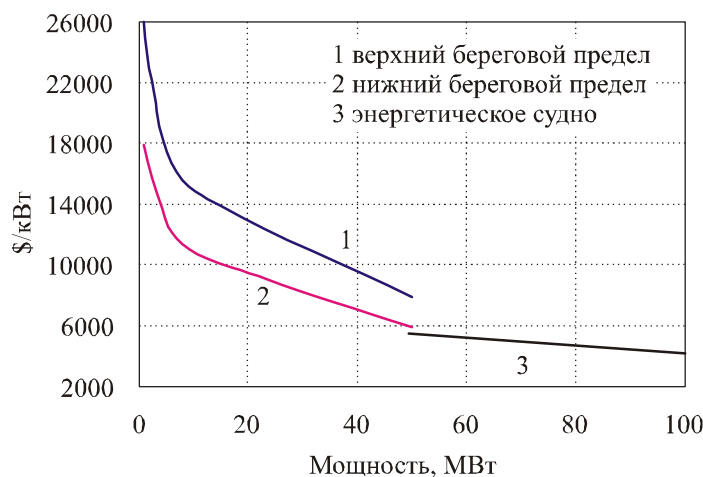


Рис. 1. Зависимость удельной стоимости ОТЕС от уровня мощности.

В настоящей работе рассматривается возможность применения в ОТЕС термоэлектрического преобразователя тепловой энергии; анализируются возможности применения таких устройств в диапазоне мощностей порядка 0.1 МВт.

### Схема ОТЕС с термоэлектрическим преобразователем энергии

Подобно классической схеме ОТЕС в рассматриваемой схеме в качестве источника тепловой энергии используется теплая вода поверхностных слоев океана, а в качестве стока теплоты – холодная вода глубинных слоев.

Основные элементы схемы:

- термоэлектрический генератор с системами подвода и отвода теплоты;
- трубопроводы холодной и теплой воды;
- насосы;
- преобразователь постоянного тока ОТЭГ в переменный ток промышленных параметров (сетевой инвертор).

Все элементы схемы, кроме термоэлектрического генератора, являются стандартными; их характеристики можно определить, зная исходные данные (мощность, расходы теплоносителей, гидравлическое сопротивление системы и т.п.).

Термоэлектрический генератор представляет из себя батарею, состоящую из  $n \times m$  стандартных модулей, оснащенную системами подвода и отвода теплоты в виде противоточного теплообменника. Особенностью схемы является существенная зависимость характеристик генератора от режима течения теплоносителей. Изменение массового расхода влияет как на располагаемый и рабочий перепад температур (т.е. на мощность и КПД генератора), так и на термическое и гидравлическое сопротивление теплообменников (т.е. на размеры и стоимость устройства, а также на затраты энергии на собственные нужды). Поэтому при анализе характеристик ОТЭГ необходимо использовать математическую модель, учитывающую

взаимосвязи между указанными параметрами с учетом особенностей реальной конструкции.

Для определения характеристик генератора используем математическую модель ТЭГ противоточного типа в виде [3]:

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

где  $C_1 = (a_2 \text{Bi}_x t_x - a_1) / (J - \text{Bi}_z + a_2 (J + \text{Bi}_x)), \quad (2)$

$$C_2 = C_1 (J + \text{Bi}_x) - \text{Bi}_x t_x, \quad (3)$$

$$a_1 = J^2 / I_0 - 0.5 J^2 (J - \text{Bi}_z) / I_0 + \text{Bi}_z t_z, \quad (4)$$

$$a_2 = J - \text{Bi}_z - 1. \quad (5)$$

Здесь  $\theta = T/t_0$  – безразмерная температура термоэлемента;  $Y$  – безразмерная координата;  $J = jeh/\lambda$  – безразмерная плотность тока;  $e$  – коэффициент термоЭДС;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\text{Bi} = \alpha h/\lambda$  – критерий Био;  $I_0 = zt_0$  – критерий Иоффе;  $z = e^2 \sigma/\lambda$  – термоэлектрическая добротность материала;  $h$  – высота термоэлемента;  $t_0 = t_z$  – определяющая температура;  $t_x$  – температура холодной воды;  $t_z$  – температура горячей воды.

Индексы «х» и «z» соответствуют холодной и горячей стороне термобатареи.

Для конкретизации текущего значения температур теплоносителей  $t_x$ ,  $t_z$  воспользуемся известным выражением для перепада температур теплоносителя в противоточном теплообменнике:

$$\Delta t = A(t_{z0} - t_{x0}), \quad (6)$$

где  $t_{z0}$  и  $t_{x0}$  – начальные температуры теплоносителей;

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

$W = G_o C_p$  – водяной эквивалент теплоносителя, кДж/с;  $K = 1/(1/\alpha_z + 1/\alpha_x + h/\lambda)$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $S$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>.

Считая изменение температур теплоносителя в пределах одного модуля пренебрежимо малым, получим выражения для температур теплоносителей:

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

$$t_z(x) = t_{z0} - dt, \quad (9)$$

где  $dt = \Delta t / n$ .

Решая систему уравнений (1 – 9), можно найти распределение температур в термобатареи и, соответственно, мощность термоэлектрического генератора.

Как отмечалось выше, параметры термоэлектрического генератора существенно зависят от расхода теплоносителей и интенсивности теплообмена на поверхностях модулей. Существенное влияние на экономичность ОТЭГ также оказывает гидравлическое сопротивление теплообменника, от которого зависят затраты мощности на собственные нужды. Все эти параметры взаимосвязаны; вид этих связей определяется в основном конструкцией теплообменника.

Для конкретизации исходных данных используем характеристики стандартного

пластинчатого теплообменника типа Funke FP-10 мощностью 100 кВт (рис. 2).

Приведенные на рисунке данные аппроксимируются зависимостями типа

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

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

где  $G_o$  – расход теплоносителя, кг/с.

В качестве исходных используем также такие данные:

- температура горячей воды  $t_{20} = 27$  °С;
- температура холодной воды  $t_{30} = 5$  °С;
- добротность термоэлектрического модуля  $z = 0.003$ ;
- высота термоэлементов  $h = 0.5$  мм;
- размеры модуля  $40 \times 40$  мм;
- стоимость одного модуля – 3 \$;
- удельная стоимость теплообменника – 250 \$/м<sup>2</sup>;
- суммарная длина трубопроводов 3000 м;
- цена трубопровода – 10 \$/м;
- стоимость насосов – 75 \$/(кг/с);
- цена инвертора – 150 \$/кВт.

Все ценовые характеристики взяты из каталогов производителей [4].

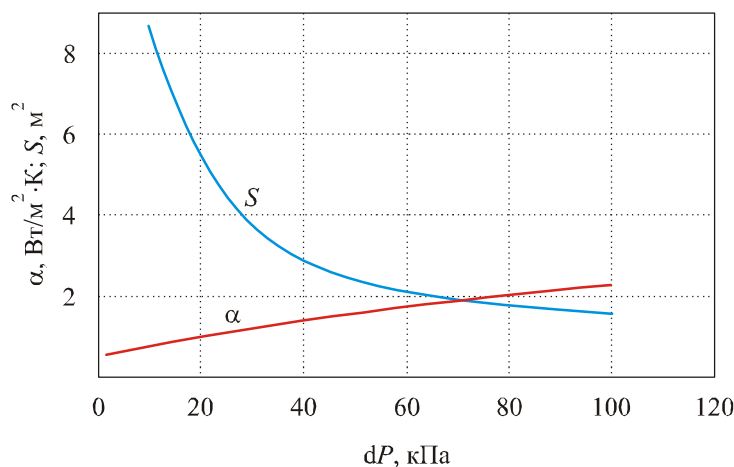


Рис. 2. Взаимосвязь между интенсивностью теплообмена  $\alpha$ , площадью теплообмена  $S$ , и гидравлическим сопротивлением  $dP$  теплообменника мощностью 100 кВт (соответствует ОТЭС мощностью 1 кВт).

Анализ математической модели ОТЭС показал, что в рассматриваемых условиях определяющим режимным параметром, существенно влияющим на стоимость системы в целом, является гидравлическое сопротивление теплообменников, которое можно варьировать в довольно широких пределах при заданных мощности теплообменника и расходе теплоносителя (в соответствии с принципом гидротепловой аналогии при этом соответственно изменяется и термическое сопротивление). Удельную стоимость ТЭГ, оптимизированного по расходу теплоносителя для различных значений гидравлического сопротивления теплообменников, иллюстрирует рис. 3.

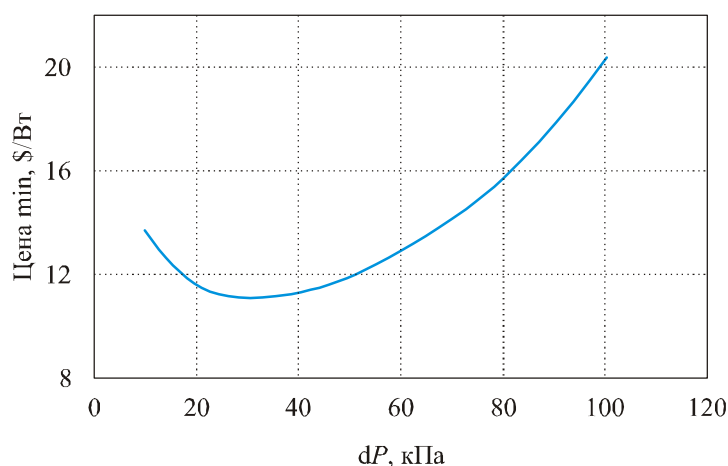


Рис. 3. Зависимость удельной стоимости ТЭС (\$/Вт полезной мощности) от гидравлического сопротивления теплообменника.

На рис. 4 представлены зависимости относительной полезной мощности ( $N_{net}/N_o$ ), полной мощности  $N_o$ , относительной мощности питающих насосов ( $N_{pump}/N_o$ ) и удельной стоимости ОТЭС (\$/Вт) от расхода теплоносителя (кг/с) для генератора полезной мощностью 100 кВт.

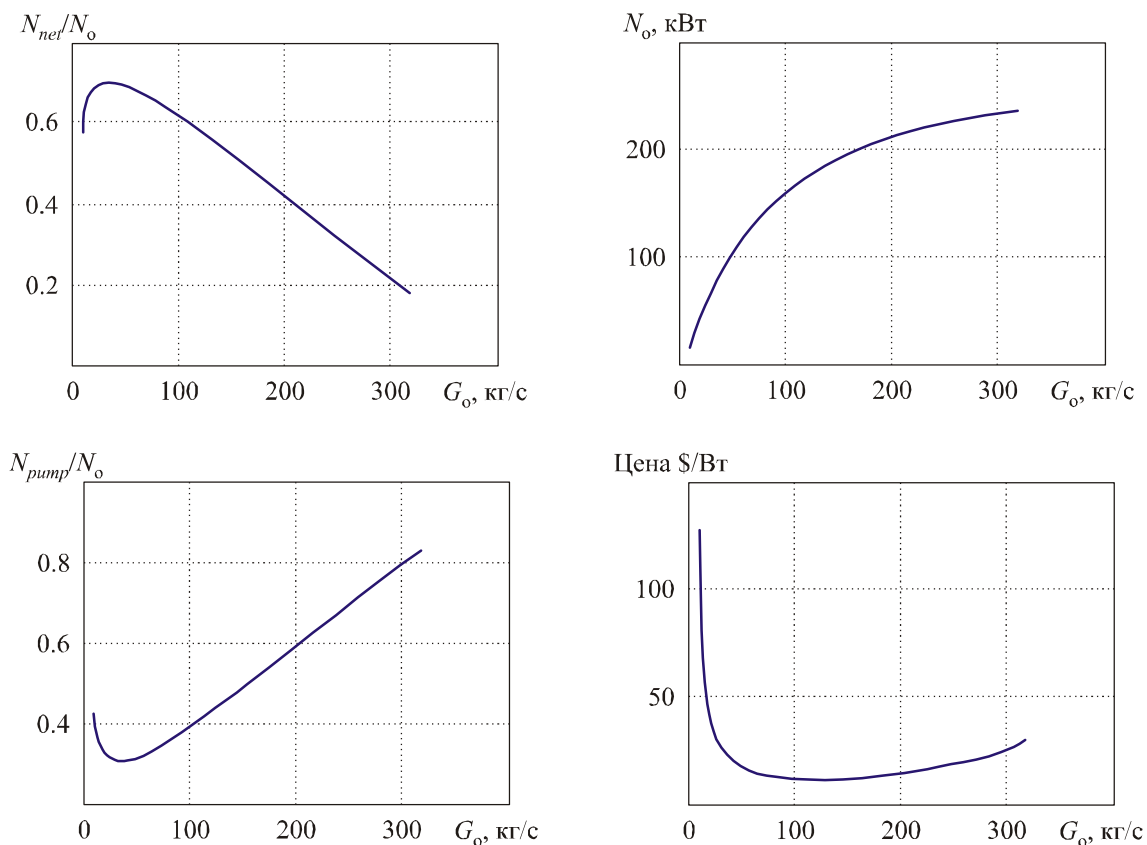


Рис. 4. Зависимости характеристик ОТЭС мощностью 100 кВт от расхода теплоносителя (кг/с).  $N_o$  – полная мощность;  $N_{net}/N_o$  – относительная полезная мощность;  $N_{pump}/N_o$  – относительная мощность питающих насосов; цена – удельная стоимость ОТЭС, \$/кВт.

Полученные данные позволяют определить основную технико-экономическую характеристику рассматриваемой схемы ОТЭС – себестоимость производимой электроэнергии.

Для генератора мощностью 100 кВт при указанных выше исходных данных стоимость проекта составляет:

- генерирующая часть – 1 млн. 110 тыс. \$;
- трубопроводы – 50 тыс. \$;
- насосы – 20 тыс. \$;
- инвертор – 15 тыс. \$;
- прочие расходы (50%) – 600 тыс. \$.
- Всего: 1 млн. 795 тыс. \$.

При 100 % загрузке ОТЭС выработка электроэнергии составит около 900 тыс. кВт·ч/год, что для стандартных сроков амортизации в 20 лет дает себестоимость электроэнергии порядка 0.1 \$/кВт·ч. С учетом эксплуатационных расходов, налоговых отчислений и прибыли эксплуатирующей организации эта цифра может возрасти еще максимум на 50 %, т.е. до 0.15 \$/кВт·ч.

Для сравнения можно отметить, что современный поглощающий тариф для систем фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в рассматриваемом диапазоне мощностей составляет 0.3...0.6 \$/кВт·ч, [4-6]. Т.е. существующие тарифы в 2...4 раза превышают полученные для ОТЭС значения, что подтверждает высокую конкурентоспособность проанализированной схемы ОТЭС.

## Выводы

Проведенный анализ термоэлектрической системы преобразования тепловой энергии океана показал принципиальную возможность создания ОТЭС в диапазоне мощностей 100 кВт с технико-экономическими характеристиками, приемлемыми для широкого коммерческого использования.

## Литература

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>
6. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/06/japan-approves-feed-in-tariffs>

Поступила в редакцию 04.01.2013.