



Лобунец Ю.Н.

Лобунец Ю.Н.

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

## СОЛНЕЧНЫЙ ПРУД С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

*Проведен анализ характеристик схемы использования солнечной энергии на основе солнечного (соляного) пруда с термоэлектрическим преобразователем. Показана возможность создания солнечного термоэлектрического генератора с приемлемыми технико-экономическими характеристиками.*

**Ключевые слова:** солнечная энергия; солнечный пруд; термоэлектрический генератор.

*Analysis has been performed of solar energy recovery scheme based on a solar (saline) pond with thermoelectric converter. The feasibility of creating a thermoelectric generator with a solar pond as the energy source (STEG) with acceptable technical and economic features has been demonstrated.*

**Key words:** solar energy, solar pond, thermoelectric generator.

### Введение

Солнечный пруд (СП) – это водоем глубиной 2 – 3 м, заполненный соевым раствором. Благодаря тому, что растворимость солей в воде повышается с повышением температуры, возможны такие ситуации, когда происходит стратификация раствора – в придонном слое концентрация (и плотность) раствора повышается, а в поверхностном слое – понижается. При этом в водоеме возникают три ярко выраженные зоны – верхняя конвективная зона толщиной 0.1...0.3 м, состоящая из пресной воды, градиентный слой, в котором концентрация соли возрастает с увеличением глубины, и придонная конвективная зона с максимальной концентрацией солей (рис. 1).

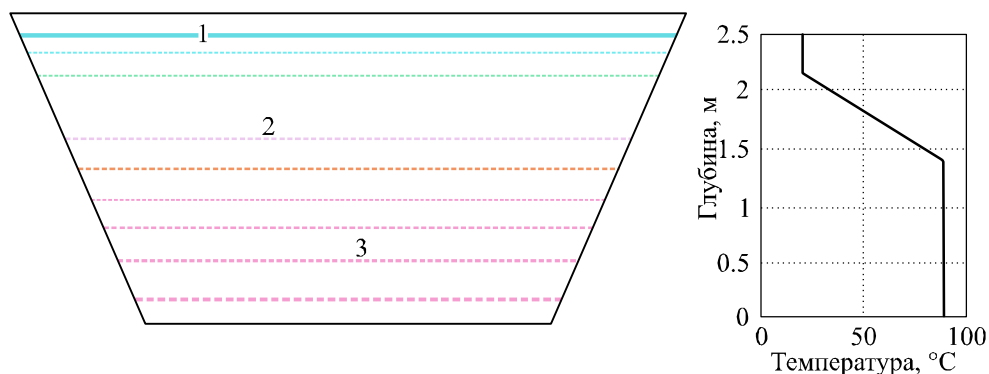


Рис. 1. Схема соляного пруда, [1].

1 – пресная вода; 2 – изолирующий слой с увеличивающейся к низу концентрацией рассола; 3 – слой горячего рассола.

Градиентный слой, благодаря подавлению естественной конвекции, обладает высоким термическим сопротивлением (примерно на три порядка выше термического сопротивления пресной воды в естественных условиях). В результате этого придонный слой оказывается теплоизолированным от поверхности и способен аккумулировать энергию солнечного излучения. Температура в придонном слое может достигать более 100 °С. Таким образом, соляной пруд является одновременно и концентратором, и аккумулятором солнечной энергии. По оценкам [2] солнечный пруд повышает плотность эксергии солнечного излучения в сотни тысяч раз, что делает эту технологию перспективной для создания систем использования солнечной энергии.

В настоящее время реализован ряд энергетических проектов на базе солнечных прудов с паротурбинными генераторами энергии [3]. В [4, 5] был проведен технико-экономический анализ таких установок, подтвердивший целесообразность использования этих систем. Удельная мощность таких установок составляет порядка 20 Вт/м<sup>2</sup> поверхности водоема, что в 5...7 раз выше, чем у существующих гидроэлектростанций. В свое время было проведено исследование возможных масштабов использования соленого залива Сиваш, по результатам которого энергетический потенциал этого залива оценен примерно в 10 ГВт пиковой электрической мощности. Рассматриваемая схема также хорошо вписывается в концепцию комплексного использования глубинной морской воды [6] – наличие в схеме низкотемпературного стока тепловой энергии способно существенно повысить эффективность системы преобразования солнечной энергии в целом.

Наряду с известными решениями использование в подобных системах термоэлектрических генераторов может расширить область применения таких источников энергии. В настоящей работе анализируются технико-экономические характеристики системы преобразования солнечной энергии типа «соляной пруд – термоэлектрический генератор».

### **Схема термоэлектрического генератора с солнечным прудом в качестве источника энергии**

Рассмотрим характеристики термоэлектрического генератора (ТЭГ), использующего в качестве источника тепловой энергии солнечный пруд, а в качестве стока – морскую воду. Аккумулируемая в придонном слое пруда тепловая энергия отводится теплоносителем, прокачиваемым через коллектор, уложенный на дне. Теплоноситель циркулирует через теплообменник солнечного термоэлектрического генератора (СТЭГ). Охлаждение генератора осуществляется водой, поступающей в технологическую схему центра по использованию глубинной морской воды [6].

Для анализа схемы используем методику расчета ТЭГ, изложенную в [7] и данные по характеристикам солнечных прудов [4, 5].

Исходные данные для анализа:

- полезная мощность СТЭГ  $N_0 = 100$  кВт;
- температура теплой воды  $t_{20} = 80$  °С;
- температура холодной воды  $t_{30} = 8$  °С;
- КПД солнечного пруда  $\eta = 30$  %;
- интегральный поток солнечной радиации  $E_0 = 2000$  кВтч/м<sup>2</sup> в год;
- 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 –  $250 \text{ \$/м}^2$ ;
- удельная стоимость солнечного пруда –  $30 \text{ \$/м}^2$  [5];
- цена сетевого инвертора –  $150 \text{ \$/кВт}$ .

Как было показано в [7], характеристики подобной системы для преобразователя тепловой энергии океана (ОТЭГ) существенно зависят от гидравлического сопротивления теплообменников термоэлектрического генератора. В рассматриваемом же случае, в связи с более высоким коэффициентом полезного действия ТЭГ, эта зависимость не является определяющей. Оценка стоимости ТЭГ для рассматриваемой схемы приведена на рис. 2, 3.

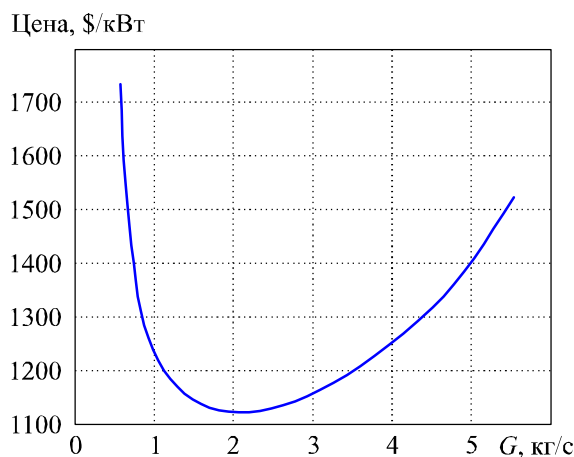


Рис. 2. Зависимость удельной стоимости ТЭГ от расхода теплоносителя  $G$ .

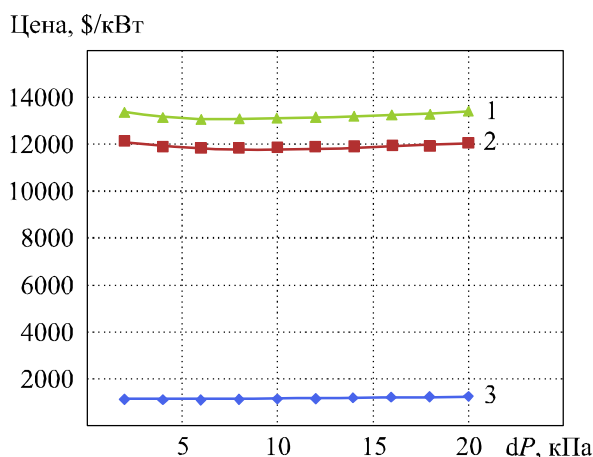


Рис. 3. Зависимость удельной стоимости компонентов СТЭГ от гидравлического сопротивления теплообменников.

1 – цена СТЭГ; 2 – цена СП; 3 – цена ТЭГ.

Наиболее капиталоемкой частью СТЭГ является источник теплоты, включающий солнечный пруд и коллектор. Для обеспечения круглосуточной работы СТЭГ пруд должен обладать необходимой теплоемкостью. При указанных выше условиях необходимая площадь солнечного пруда составляет  $300...350 \text{ м}^2/\text{кВт}$ . Удельная стоимость источника теплоты, соответственно, –  $10...12 \text{ тыс. \$/кВт}$ , а удельная стоимость устройства в целом – порядка  $13 \text{ тыс. \$/кВт}$  (без учета стоимости участка земли, необходимого для создания пруда). Таким

образом, для СТЭГ мощностью 100 кВт потребуется соляной пруд площадью порядка 3.5 гектар; стоимость такого устройства составит порядка 1.3 млн.\$.

Приведенные выше данные предусматривают использование СТЭГ в базовом режиме, т.е. при постоянной круглосуточной нагрузке. При полной загрузке СТЭГ выработка электроэнергии составит около 900 тыс. кВтч/год, что для стандартных сроков амортизации в 20 лет дает себестоимость электроэнергии порядка 0.07 \$/кВтч. С учетом эксплуатационных расходов, налоговых отчислений и прибыли эксплуатирующей организации эта цифра может возрасти максимум до 0.1 \$/кВтч. Опыт эксплуатации подобных систем показывает, что при эксплуатации в пиковом режиме мощность преобразователя может быть повышена в 3...5 раз при неизменных размерах солнечного пруда. При использовании СТЭГ в пиковом режиме с коэффициентом загрузки 50...70 %, необходимая площадь пруда (и капитальные затраты) снижаются в несколько раз, и, соответственно, стоимость электроэнергии может быть снижена до уровня 0.03...0.06 \$/кВтч. Для сравнения следует отметить, что современный feed-in tariff для систем фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в рассматриваемом диапазоне мощностей составляет 0.3...0.6 \$/кВтч, [8]. Т.е. существующие тарифы в 5...10 раз превышают полученные для СТЭГ значения, что подтверждает высокую конкурентоспособность проанализированной схемы.

## **Выводы**

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

## **Литература**

1. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
2. Янговский Е.И. Поток энергии и эксергии / Е.И. Янговский – М.: Наука, 1988. – 144 с.
3. <http://soilwater.com.au/solarponds/history.HTM>
4. Kayali R. Economic Analysis and Comparison of Two Solar Energy Systems with Domestic Water Heating Systems / R. Kayali // J. of Physics. – 1998. – Vol. 22. – P. 489 – 496.
5. <http://soilwater.com.au/solarponds/costs.htm>
6. Deep Seewater “Kumejima model” // <http://www.okinawab2b.jp/misc6.html>
7. Лобунец Ю.Н. Оценка характеристик ОТЭС с термоэлектрическим преобразователем энергии / Ю.Н. Лобунец // Термоэлектричество. – 2013. – №1. – С. 62 – 67.
8. <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/06/japan-approves-feed-in-tariffs>

Поступила в редакцию 01.02.2013.