

УДК 537.322.11

**Лобунец Ю.Н.**



*Лобунец Ю.Н.*

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

### **ТЭГ ТЕПЛООБМЕННОГО ТИПА ДЛЯ СУДОВЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

---

*Проведен анализ характеристик термоэлектрических генераторов теплообменного типа, использующих теплоту выхлопных газов судовых двигателей. Очерчены перспективы применения подобных ТЭГ.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, низкопотенциальный источник теплоты, судовые установки.

*The characteristics of heat exchange-type thermoelectric generators using the exhaust gas heat of marine engines are analyzed. The prospects of using such TEG are outlined.*

**Key words:** thermoelectric generator, low-grade heat source, marine propulsion plants

#### **Введение**

Использованию термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для утилизации энергии выхлопных газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания посвящено большое количество работ. Это направление полагают одной из перспективных сфер внедрения ТЭГ [1-8]. В то же время применение ТЭГ в подобных схемах на водном транспорте является более привлекательным из-за отсутствия существенных ограничений, характерных для автомобильного транспорта. В [7] приведен перечень преимуществ такого применения:

- значительно большие мощности силовых установок;
- значительно больший масштаб экономии энергоресурсов;
- значительно лучшие условия охлаждения (заборная вода);
- отсутствие массо-габаритных ограничений;
- многочисленные варианты схем использования;
- возможность унификации ТЭГ, которая обеспечивает их использование для судов любого типа.

Условия использования ТЭГ на судах существенно отличаются от условий на автомобильном транспорте, поэтому эти применения нуждаются в отдельных разработках. Учитывая большую мощность силовых установок, обычные схемы автомобильных ТЭГ с размещением на выхлопной трубе для судовых установок непригодны. Рассматриваются схемы с применением термобатарей кассетного типа, которые размещены в потоке выхлопных газов [8], или схемы с промежуточным теплоносителем [4]. Довольно эффективными также представляются схемы с применением фазовых переходов для транспортировки тепловой энергии – тепловых труб [5] или двухфазных термосифонов [3], в которых термобатареи обогреваются парами теплоносителя, конденсирующимися на их поверхности (рис. 1).

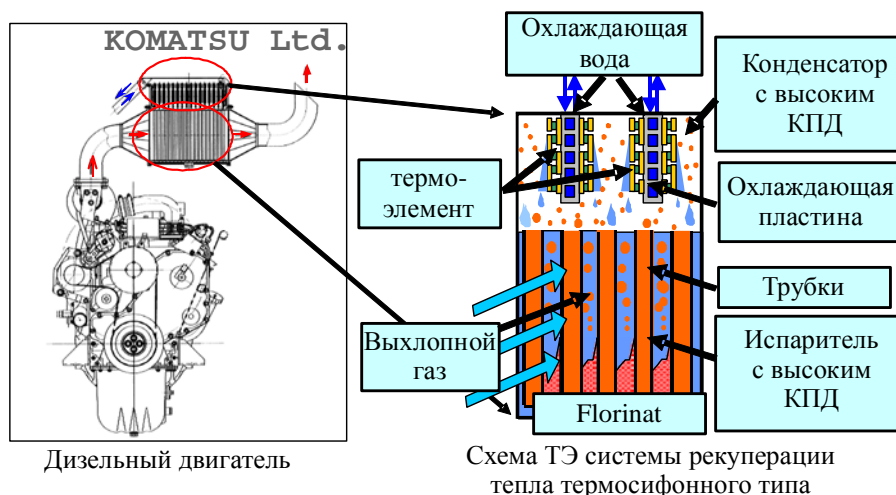


Рис. 1. Схема ТЭГ с использованием двухфазного термосифона [3].

На мой взгляд, наиболее эффективной для рассматриваемого применения, может быть схема ТЭГ теплообменного типа, предложенная в [9]. Она допускает использование, как жидкого теплоносителя, так и парообразного, обеспечивает наиболее высокую удельную мощность, хорошо адаптируется в технологическую схему силовой установки. Ниже рассмотрены основные особенности такого ТЭГ в сочетании с судовой силовой установкой, проведен анализ технико-экономических показателей схемы.

### Схема ТЭГ теплообменного типа для дизельной силовой установки

Распределение потоков энергии в судовом дизельном двигателе иллюстрирует рис. 2, где показано, что с выхлопными газами теряется приблизительно 25 % первичной энергии. Обычно температура газов равна примерно 500 °С.

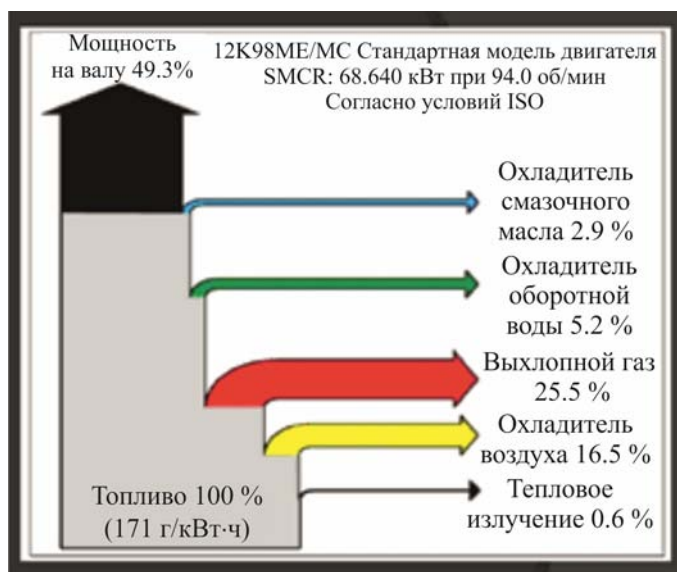


Рис. 2. Распределение потоков энергии в судовом дизельном двигателе [7].

Схема рассматриваемого ТЭГ, представлена на рис. 3.

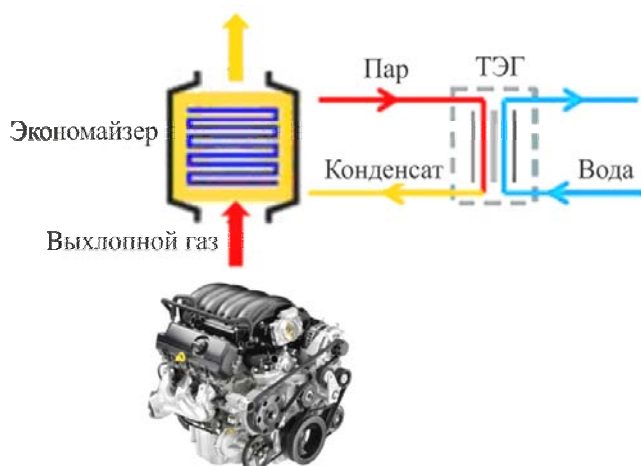


Рис. 3. Схема ТЭГ для судовой установки.

Выхлопные газы с температурой  $t_{hg} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  от двигателя поступают в теплообменник-экономайзер, в котором подогревают теплоноситель, поступающий из ТЭГ, до точки кипения. Пар с температурой  $t_{ho}$  поступает в каналы, образованные термобатареями, где конденсируется и возвращается в экономайзер. Охлаждение термобатарей осуществляется заборной водой с температурой  $t_{xo}$ , которая циркулирует сквозь каналы ТЭГ. Уплотнение термобатарей для предотвращения утечки теплоносителя осуществляется с помощью прокладок специальной формы, образующих каналы и коллекторы для прохода теплоносителя.

Рабочая температура теплоносителя на входе в ТЭГ  $t_{ho}$  легко регулируется путем поддержания необходимого давления в системе. От выбора этого параметра в доступном интервале температур  $t_{xo} < t_{ho} < t_{hg}$  в значительной степени зависит эффективность системы и мощность ТЭГ. Понятно, что с повышением  $t_{ho}$  уменьшается количество теплоты, отбираемой от выхлопных газов ( $Q_h$ ), то есть уменьшается КПД теплообменника  $K_{heat}$  и количество теплоносителя, который генерируется экономайзером ( $G_h$ ). При  $t_{ho} \rightarrow t_{hg}$   $Q_h \rightarrow 0$ , а  $K_{heat} \rightarrow 0$ . С другой стороны, одновременно возрастает рабочий перепад температур на термоэлементах и, соответственно, КПД ТЭГ. Под влиянием этих факторов мощность ТЭГ достигает максимума в пределах имеющегося интервала температур (рис. 4). Как видно из приведенных данных, в первом приближении оптимальной является рабочая температура  $t_{ho} = (t_{hg} - t_{xo}) / 2$ . В нашем случае это отвечает приблизительно  $t_{ho} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

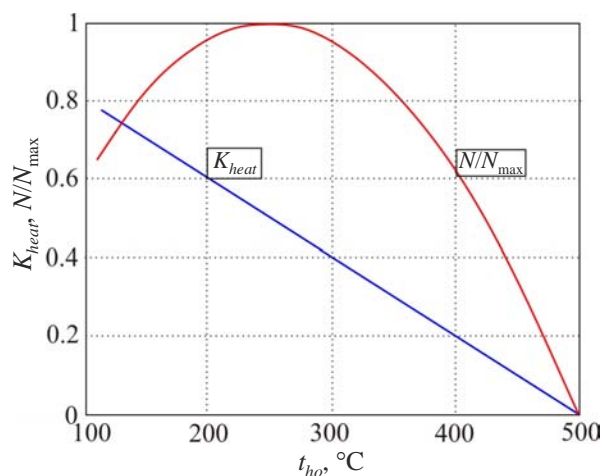


Рис. 4. Зависимость эффективности теплообменника  $K_{heat}$  и мощности ТЭГ  $N/N_{max}$  от температуры теплоносителя на входе  $t_{ho}$ .

Другим ограничением на температуру теплоносителя являются допустимые рабочие температуры термоэлектрического материала и элементов конструкции. Для рассматриваемой схемы на данный момент критической является максимально допустимая рабочая температура уплотняющих прокладок, которая для серийных изделий составляет 180 °С.

### Математическая модель ТЭГ

Учитывая то, что нагревание ТЭГ осуществляется за счет фазовых переходов (конденсация), температуру горячих спаев термоэлементов вдоль каналов можно считать постоянной. Наличие неограниченного источника воды для охлаждения позволяет принять предположение относительно незначительных изменений температуры вдоль холодных каналов ТЭГ. В таком случае довольно корректным будет использование математической модели термоэлемента в граничных условиях III рода, без учета изменений температуры вдоль термобатарей. Согласно [10], запишем уравнение для распределения температур в ТЭГ в виде:

$$\Theta(Y) = C_1 + C_2 Y - \frac{J^2}{2IoY^2}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} C_1(J + Bi_x) - C_2 &= Bi_x \vartheta_x, \\ C_1(Bi_h - J) + C_2(Bi_h - J + 1) &= Bi_h \vartheta_h + \frac{J^2}{Io} \left(1 + \frac{Bi_h - J}{2}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

а  $\Theta = \frac{T}{T_p}$  – безразмерная температура термоэлемента;  $\vartheta = \frac{t}{T_p}$  – безразмерная температура теплоносителя;  $Io = zT_p$  – критерий Иоффе;  $Bi = \frac{h}{\lambda Rt}$  – критерий Био;  $J = \frac{jeh}{\lambda}$  – безразмерная плотность тока.

Индексы  $h$  и  $x$  обозначают характеристики горячей и холодной стороны ТЭГ, соответственно.

В приведенном выше выражении для критерия Био коэффициент  $Rt$  характеризует сумму термических сопротивлений на пути теплового потока от поверхности термоэлемента к теплоносителю, то есть

$$Rt = \frac{1}{\alpha} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между теплоносителем и термобатареей;  $h_i$  и  $\lambda_i$  толщина и коэффициент теплопроводности каждого из слоев на пути теплового потока (коммутационные элементы, теплопереход, корпус термобатарей, прослойки припоя и т.п.).

Поскольку система уравнений (1 – 3) является нелинейной, ее решение находим числовыми методами.

Благодаря тому, что в схеме обеспечиваются изотермические условия на поверхностях термобатарей, для ее расчетов и анализа достаточно рассмотреть характеристики одного модуля с определенными свойствами и в условиях, приведенных выше. Максимальная мощность такого модуля в общем случае равняется

$$N_m = \frac{E^2}{4R}, \quad (4)$$

где  $E = n_v e (T_h - T_x)$  – ЭДС модуля;  $R = n_v \frac{\rho h}{s}$  – его электрическое сопротивление.

С учетом изложенного выше, определим характеристики схемы рассматриваемого ТЭГ при таких исходных данных:

- мощность дизельной установки  $P = 1$  МВт (энтальпия газов  $Q_h = 500$  кВт);
- температура греющего теплоносителя на входе в ТЭГ  $t_{ho} = 180$  °С;
- температура воды в системе охлаждения  $t_{xo} = 15$  °С;
- скорость воды в каналах охлаждения ТЭГ  $V_x = 2$  м/с;
- КПД теплообменника определяем исходя из известной  $t_{ho}$  как  $K_{heat} = (t_{hg} - t_{ho})/t_{hg} = 0.64$ ;
- добротность термоэлектрического материала  $z = 0.0026$  К<sup>-1</sup>;
- количество термоэлементов в модулях  $n_v = 526$ ;
- сечение термоэлемента  $s = 0.026$  см<sup>2</sup>;
- термическое сопротивление  $Rt_x = 1.7$  см<sup>2</sup>К/Вт;  $Rt_h = 1.5$  см<sup>2</sup>·К/Вт.

Как следует из (1 – 4), характеристики схемы ТЭГ определяются имеющимся перепадом температур  $\Delta t_o = t_{ho} - t_{xo}$ , свойствами термоэлектрического материала  $I_o$ , условиями теплообмена  $Rt$  и характеристиками модуля –  $n_v$ ,  $h$ ,  $s$ . Из обозначенных параметров большинство является определенными по условиям постановки задачи и имеют фиксированные значения. Лишь характеристики модуля можно рассматривать как независимые параметры, которые можно изменять в довольно широких пределах. Учитывая то, что влияние  $n_v$  и  $s$  имеет экстенсивный характер, к независимым параметрам следует отнести только высоту термоэлементов  $h$ . Влияние высоты заключается в том, что она определяет термическое ( $R_o = h/\lambda$ ) и электрическое ( $R$ ) сопротивления термоэлементов. Увеличение  $h$  приводит к росту термического сопротивления и увеличению полезного перепада температур, в то же время возрастает и электрическое сопротивление модуля, что отрицательно влияет на его мощность. Вследствие этого всегда можно найти оптимальное значение  $h$ , которое обеспечивает максимум мощности модуля (рис. 5 а). Зависимость КПД модуля от  $h$  имеет монотонный характер, поскольку рост термического сопротивления термоэлемента одновременно приводит к росту перепада температур и уменьшению теплового потока сквозь термоэлементы (рис. 5, б).

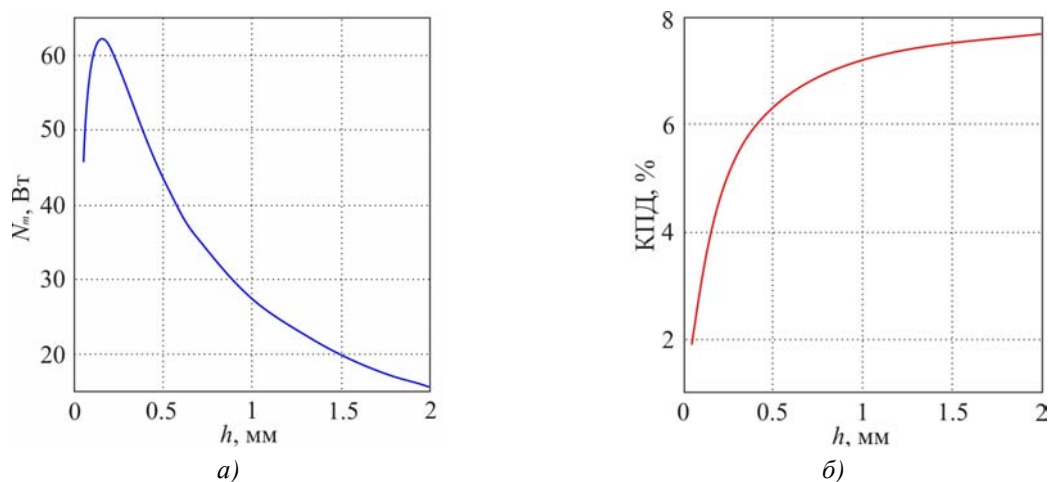


Рис. 5. Зависимости мощности (а) и КПД (б) модуля от высоты термоэлементов.

Анализ задачи показывает, что оптимальное соотношение термических сопротивлений термоэлемента  $R_o$  и теплопередачи  $Rt$  является постоянным и всегда равняется  $R_o/Rt = 2$  (рис. 6). Вследствие этого режим максимальной мощности реализуется при перепаде

температур, равном половине имеющегося (рис. 7). Понятно, что увеличение  $Rt$  приводит к соответствующему уменьшению максимальной мощности.

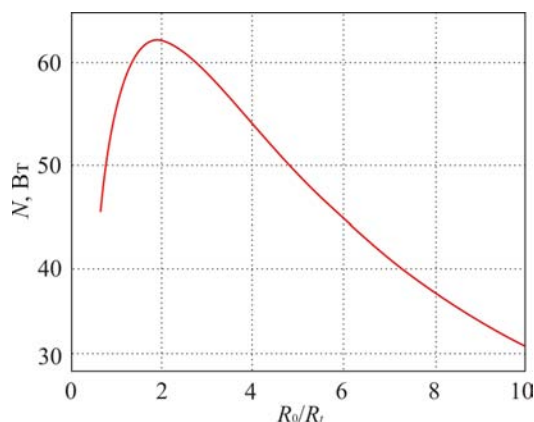


Рис. 6. Зависимость мощности модуля от соотношения термических сопротивлений термоэлемента  $R_0$  и теплопередачи  $Rt$ .

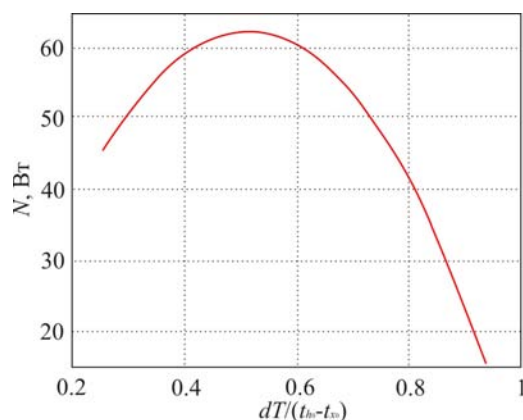


Рис. 7. Соотношение между мощностью модуля  $N$  и перепадом температур, являющимся функцией высоты  $\Delta T = f(h)$ .

Зная тепловой поток сквозь модуль  $Q_m$ , общее количество модулей в ТЭГ можно определить как

$$n_m = Q_n K_{heat} / Q_m. \quad (5)$$

Суммарная мощность ТЭГ равняется, соответственно,

$$NS = n_m N. \quad (6)$$

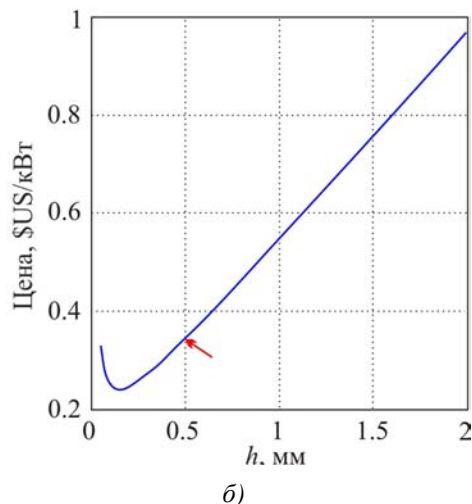
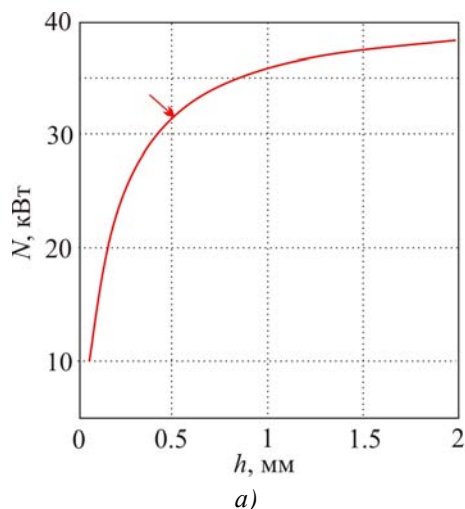


Рис. 8. Зависимости мощности (а) и удельной стоимости ТЭГ (б) от высоты термоэлементов.

Как следует из приведенных на рис. 8 а данных, несмотря на наличие экстремума на кривой  $N = f(h)$ , зависимость суммарной мощности ТЭГ от высоты термоэлементов имеет монотонный характер, подобный зависимости КПД. Вместе с тем нужно иметь в виду, что при  $h > h_{opt}$  значительно возрастает необходимое количество модулей, и, соответственно, стоимость ТЭГ (рис. 8, б). Очевидно, что компромиссным должен быть выбор  $h$  в зоне приемлемой стоимости ТЭГ, вблизи линии предельного значения  $N$ , так как это обозначено стрелками на рис. 8. При таком подходе схема рассматриваемого ТЭГ, обеспечивает вполне приемлемые значения удельной стоимости (на уровне 350 \$US/кВт), и эффективности (около 5 %). Следует отметить также высокую удельную мощность такого генератора – по нашим оценкам

рассмотренный выше ТЭГ будет иметь габариты около 250×700×300 мм. Эти данные не учитывают стоимость и габариты теплообменника-экономайзера. Для оценки возможных масштабов применения подобных ТЭГ можно заметить, что морские суда среднего класса имеют силовые установки мощностью 10...15 МВт. То есть, например, использование рассмотренной схемы ТЭГ на судне типа «Мистраль» позволило бы получить дополнительно 400...500 кВт электрической мощности и обеспечить экономию топлива около 100 литров в час.

## **Выводы**

1. Рассмотрена схема ТЕГ теплообменного типа, использующего как источник теплоты выхлопные газы судовых силовых установок.
2. Показано, что максимум мощности отдельно взятого модуля в рассмотренной схеме соответствует условию  $R_o/R_t = 1$ , в то время как общая мощность ТЕГ может монотонно возрастать к пределу лимитируемому теоретическим КПД, то есть определяется лишь свойствами термоэлектрического материала.
3. Техничко-экономические показатели рассмотренной схемы позволяют рассчитывать на широкое использование подобных ТЕГ для водного транспорта.

## **Литература**

1. Анатычук Л.И., Кузь Р.В. Теория и компьютерное моделирование автомобильных термоэлектрических генераторов // XIII Межгосударственный Семинар “Термоэлектрики и их применения”, 13-14 ноября 2012 г., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург.
2. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, 2011.
3. J.W. Fairbanks. Thermoelectric developments for vehicular applications // Diesel Engine Efficiency and Emission Research Conference, Detroit, August 24, 2006.
4. Sumeet Kumar, Stephen D. Heister, Xianfan Xu, James R. Salvador and Gregory P. Meisner. Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems. Part I: Numerical Modeling and Baseline Model Analysis // Journal of Electronic Materials, DOI: 10.1007/s11664-013-2471-9, 2013
5. Jorge Martins, Francisco P. Brito, L.M. Goncalves, Joaquim Antunes. Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes // Universidade do Minho, Portugal, 2011-01-315
6. Aleksanderkushch, Madhav Karri, Brian Helenbrook, Clayton J. Richter. The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck // 2004 DEER Conference. August 29-september 2, 2004, Coronado, California.
7. Travis. T. Wallace. Development of Marine thermoelectric Heat recovery Systems. // 2011 DOE Thermoelectric Applications Workshop, January 5, 2011.
8. <http://www.alphabetenergy.com/product/e1/>
9. Лобунец Ю.М. Термоелектричний генератор // Патент України №8357 від 27.08.2013 р.
10. Лобунец Ю.М. Про критерії ефективності термоелектричних перетворювачів енергії // Термоелектрика. – 2014, №2. – С. 68 – 84.

Поступила в редакцію 20.11.2014.