

УДК 537.322.11



Лобунец Ю.Н.

Лобунец Ю.Н.

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

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛООБМЕННОГО ТИПА

Проведен анализ характеристик термоэлектрического генератора, интегрированного в компактный пластинчатый теплообменник. Определены зависимости технико-экономических характеристик генератора от режимных и геометрических параметров. Приведены рекомендации по проектированию подобных устройств.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, низкопотенциальный источник.

Performance analysis of a thermoelectric generator integrated into a compact plate heat exchanger is performed. The dependences of the generator technical and economic characteristics on the regime and geometrical parameters are determined. Design recommendations for such devices are given.

Key words: thermoelectric generator, low-grade heat source.

Введение

Распространенной тепловой схемой для термоэлектрических генераторов (ТЭГ) является такая, в которой термобатареи оснащаются теплообменниками с прямоточным или противоточным движением теплоносителей, осуществляющих подвод и отвод тепла. Основным требованием к ТЭГ рассматриваемого типа является обеспечение минимальных массо-габаритных характеристик устройства при максимально возможной эффективности. Весьма перспективной для решения этих задач представляется схема ТЭГ, в которой термоэлектрические батареи интегрированы в конструкцию компактного пластинчатого теплообменника [1]. В этой конструкции роль пластин теплообменника выполняют термобатареи, между которыми с помощью уплотняющих прокладок организованы каналы для прохода теплоносителей. Такая конструкция позволяет существенно снизить массу и габариты ТЭГ по сравнению с традиционными устройствами за счет обеспечения высокой интенсивности теплообмена в целевых каналах между термобатареями и отказа от громоздких и металлоемких теплообменников.

В данной работе анализируются особенности рассматриваемой конструкции ТЭГ, а также приводится оценка возможных технико-экономических характеристик.

Постановка задачи

Задача заключается в создании математической модели устройства, корректно описывающей взаимосвязь режимных и геометрических параметров ТЭГ, и в анализе, с ее помощью, характеристик рассматриваемой системы. Расчетная схема задачи представлена на рис. 1.



Рис. 1. Расчетная схема ТЭГ.

Нагревающий и охлаждающий теплоносители, проходя через щелевые каналы между термобатареями, обтекают поверхность последних, обеспечивая поддержание перепада температур (ΔT) на термоэлементах. Очевидно, что за счет необратимых потерь при теплообмене, а также изменения температур теплоносителей вдоль термобатареи, рабочий перепад температур на термоэлементах будет всегда меньше располагаемого перепада:

$$\Delta T < dt_o = t_{zo} - t_{xo}. \quad (1)$$

Здесь t_{zo} и t_{xo} – начальные температуры теплоносителей; индексы z и x относятся к нагревающему и охлаждающему теплоносителям, соответственно.

Кроме того часть энергии, генерируемой ТЭГ, расходуется на привод циркуляционных насосов для прокачки теплоносителей. Необходимо минимизировать эти потери и определить условия, при которых полезная мощность ТЭГ достигает максимальных значений при заданных ограничениях.

Как известно из теории теплообмена, при противоточном движении теплоносителей с одинаковой удельной теплоемкостью разность температур между теплоносителями остается постоянной вдоль поверхности теплообмена, т.е.

$$dt = t_z - t_x = const. \quad (2)$$

Поскольку для режима ТЭГ влиянием тепла Пельтье на распределение температур в теплоносителях можно пренебречь, в первом приближении температурный напор между теплоносителями можно также считать постоянным и равным:

$$dt = \frac{dt_o}{1 + \frac{KF}{W}}, \quad (3)$$

где $W = Gc_p$ – теплоемкость массового расхода (водяной эквивалент) теплоносителя, Вт/К; F – площадь поверхности теплообмена, см²;

$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{1}{\alpha_z} + \frac{h}{\lambda}}$ – коэффициент теплопередачи, Вт/см²К [2]. Здесь α_x и α_z – эффективные

коэффициенты теплоотдачи с холодной и горячей стороны, учитывающие плотность упаковки термоэлементов в модуле и наличие керамических теплопереходов:

$$\alpha_x = \frac{S_m}{S_t} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{xo}} + \frac{\delta}{\lambda_k}}; \quad \alpha_z = \frac{S_m}{S_t} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{zo}} + \frac{\delta}{\lambda_k}};$$

α_{xo} и α_{zo} – коэффициенты теплоотдачи на поверхности термобатареи с холодной и горячей

стороны; S_m – площадь модуля; S_t – площадь сечения термоэлементов в модуле; h – высота термоэлементов, см; λ – коэффициент теплопроводности термоэлектрического материала, Вт/смК; δ – толщина керамического теплоперехода, см; λ_k – коэффициент теплопроводности керамики, Вт/смК;

Выражение (3) позволяет определить температурные условия для задания граничных условий при расчете ТЭГ. Зависимость температурного напора dt от расхода теплоносителя (W) и условий теплообмена (KF) иллюстрирует рис. 2. Как следует из рисунка, при возрастании расхода теплоносителя, температурный напор стремится к своему предельному значению, $dt \rightarrow dt_o$. Это обусловлено уменьшением изменения температуры теплоносителя вдоль канала. Интенсификация теплообмена (рост KF) с одной стороны приводит к снижению потерь температурного напора при теплообмене, а с другой – к возрастанию тепловых потоков и, соответственно, к изменению температур теплоносителя вдоль термобатареи. Последний фактор оказывает существенное влияние на уменьшение температурного напора.

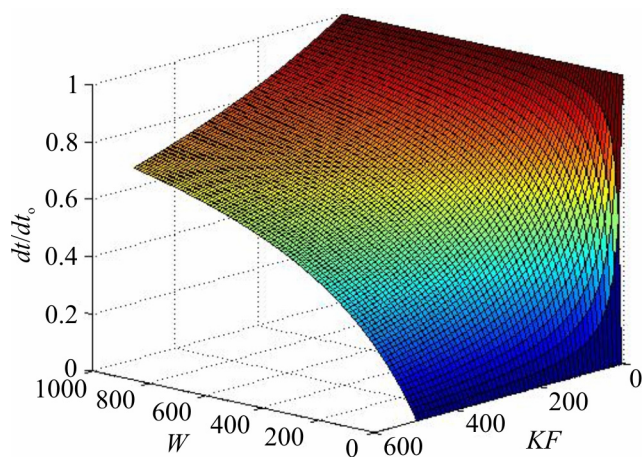


Рис. 2. Влияние условий теплообмена W и KF на температурный напор dt .

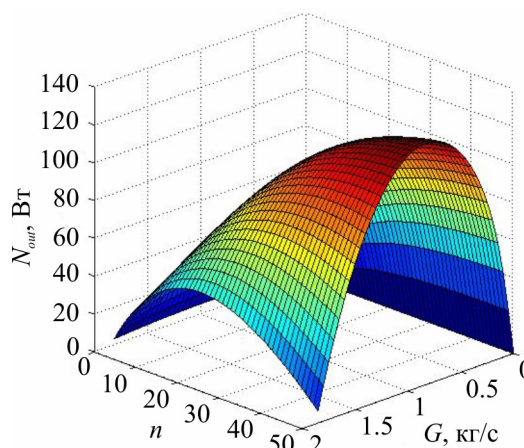


Рис. 3. Зависимость полезной мощности ТЭГ от расхода теплоносителя (G) и площади термобатареи, выраженной через количество модулей n .

В то же время при увеличении расхода теплоносителя возрастают гидравлические потери в каналах, в результате чего снижается полезная мощность генератора. Таким образом, можно предположить, что существуют оптимальные соотношения режимных (расход теплоносителя, режим нагрузки ТЭГ) и геометрических параметров (размеры каналов, количество и размеры модулей в термобатареях), которые обеспечивают наилучшие технико-экономические показатели ТЭГ. Это предположение хорошо иллюстрирует рис. 3, на котором представлена зависимость полезной мощности термобатареи ТЭГ, как функция расхода теплоносителя и площади термобатареи (площадь батареи выражена через количество модулей n , расположенных вдоль потока теплоносителя).

Математическая модель ТЭГ

Для получения расчетных данных использовалась математическая модель ТЭГ, включающая:

– решение задачи теплоэлектропреноса в термоэлементах при граничных условиях III рода в виде [3-5]:

$$\Theta(J, Y) = C_1 + C_2 Y - \frac{J^2}{2I_o} Y^2, \quad (4)$$

где

$$C_1 = \frac{(b_2 Bi_x \theta_x - b_1)}{(J - Bi_2 + b_2(J + Bi_x))},$$

$$C_2 = C_1 \frac{(J + Bi_x) - Bi_x \theta_x}{J^2 (J - Bi_2)};$$

$$b_1 = \frac{J^2}{I_o} - 2I_o + Bi_2 \theta_x;$$

$$b_2 = J - Bi_2 - 1.$$

Здесь $\Theta = T/t_o$ – безразмерная температура термоэлемента; $\theta_{x,z} = t/t_o$ – безразмерная температура теплоносителя; $Y = y/h$ – безразмерная координата; $J = jeh/\lambda$ – безразмерная плотность тока; $Bi = \alpha h/\lambda$ – критерий Био; $I_o = zt_o$ – критерий Иоффе; $z = (e^2 \cdot \sigma)/\lambda$ – термоэлектрическая добротность материала; h – высота термоэлемента; $t_o = 300$ К – определяющая температура.
– критериальные уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи [2]

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (5)$$

и коэффициентов трения при течении жидкости в плоском канале:

– для ламинарного режима течения ($Re < 2300$)

$$\xi = \frac{96}{Re}; \quad (6)$$

– для турбулентного режима течения ($Re > 2300$)

$$\xi = \frac{\left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0.333}}{1.82 \log(Re - 1.64)}. \quad (7)$$

Здесь $Nu = \alpha d/\lambda$ – критерий Нуссельта; $Re = Vd/\nu$ критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; d – эквивалентный диаметр канала.

Поскольку свойства теплоносителей существенно зависят от температуры, то при расчете коэффициентов переноса производилась интерполяция табличных данных с помощью кубических сплайнов.

Система уравнений (2 – 7) позволяет рассчитать распределения температур в термоэлементах и теплоносителях и, соответственно, определить характеристики ТЭГ, как функцию основных режимных и геометрических параметров при заданных свойствах термоэлектрического материала и теплоносителей. В общем виде мощность ТЭГ равна

$$N = \frac{E^2}{R} \frac{m}{(m+1)^2}. \quad (8)$$

Здесь $E = ne\Delta T$ – ЭДС ТЭГ; n – количество последовательно соединенных пар; R – внутреннее сопротивление ТЭГ; m – коэффициент нагрузки.

Полезная мощность ТЭГ равна:

$$N_{out} = N - N_{pump}, \quad (9)$$

где $N_{pump} = \frac{G_x dP_x}{0.9\rho_x} + \frac{G_z dP_z}{0.9\rho_z}$ – затраты энергии на прокачку; $dP = \xi \frac{L\rho V^2}{d \cdot 2}$ – потери давления в каналах; L – длина канала; $\rho_{x,z}$ – плотность теплоносителей; $V = G/f$ – скорость теплоносителей; f – площадь сечения каналов.

КПД преобразования ТЭГ и общий КПД генератора равны, соответственно,

$$\eta = \frac{N}{Q} \quad (10)$$

и

$$\eta_{out} = \frac{N_{out}}{Q}, \quad (11)$$

где $Q = KSdt$ – тепловой поток через батареи генератора; S – эффективная площадь термобатарей ТЭГ.

Результаты анализа

Основными параметрами задачи, влияющими на характеристики ТЭГ, являются размеры и количество термоэлектрических модулей, их свойства, размеры каналов между термобатареями, свойства, расход и температуры теплоносителей. Возможности варьирования большинства из этих параметров ограничены. К независимым переменным рассматриваемой задачи, допускающим изменение в достаточно широких пределах, можно отнести расход теплоносителей G , размеры каналов h_k и, в меньшей степени, высоту термоэлементов h .

С точки зрения обеспечения эффективности ТЭГ интерес в первую очередь представляет влияние этих переменных на распределение температур в системе. Очевидно, что целью оптимизации параметров ТЭГ в первом приближении является обеспечение максимально возможного рабочего перепада температур на термоэлементах. Предельное изменение температур в системе ограничено располагаемым перепадом $dt_o = t_{zo} - t_{xo}$. Поэтому для придания общности результатам в анализе оцениваются изменения определяющих температур относительно максимально возможного перепада dt_o . Влияние режимных параметров на температурный режим ТЭГ иллюстрирует рис. 4. Интервалы изменения режимных параметров соответствуют области определения рассматриваемой задачи. В данном конкретном случае рассматривался ТЭГ, включающий термобатареи размером 150×800 мм. Батареи состоят из трех продольных рядов по 16 модулей; всего 48 стандартных модулей размером 40×40 мм.

Для заданного интервала температур теплоносителей (вода при $t_{xo} = 5$ °С, $t_{zo} = 95$ °С) допустимый расход составляет $G = 0...1$ кг/с. Высота канала варьируется в пределах $h_k = 1...20$ мм. При указанных условиях относительный температурный напор между теплоносителями изменяется в пределах

$$dt = (0.22 \dots 0.97) dt_o;$$

потери температурного напора вдоль канала составляют

$$t_{in} - t_{out} = (0.03 \dots 0.78) dt_o;$$

перепад температур на термоэлементах варьируется в пределах

$$\Delta T = (0.002 \dots 0.79) dt_o.$$

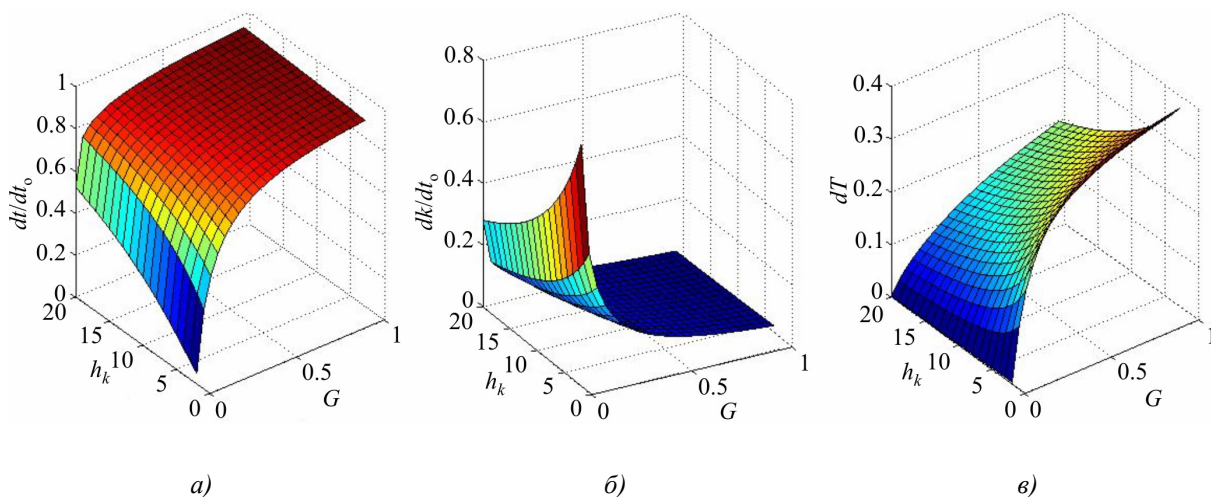


Рис. 4. Влияние режимных параметров (h_k и G) на температурный режим ТЭГ.

а) – температурный напор между теплоносителями; б) – перепад температур вдоль канала; в) – перепад температур на термоэлементах.

Полезный перепад температур ΔT монотонно возрастает с ростом расхода G и уменьшением высоты канала h_k , так как при этом возрастает скорость потока и снижается перепад температур вдоль канала; одновременно интенсифицируется теплообмен и уменьшаются потери температурного напора между теплоносителями и спаями термоэлементов. Однако при возрастании скорости потока возрастают и затраты энергии на прокачку теплоносителей, что предопределяет наличие оптимальных значений параметров G и h_k , обеспечивающих достижение максимума мощности и КПД ТЭГ. Влияние режимных параметров на мощность и КПД ТЭГ иллюстрируют рис. 5 и рис. 6.

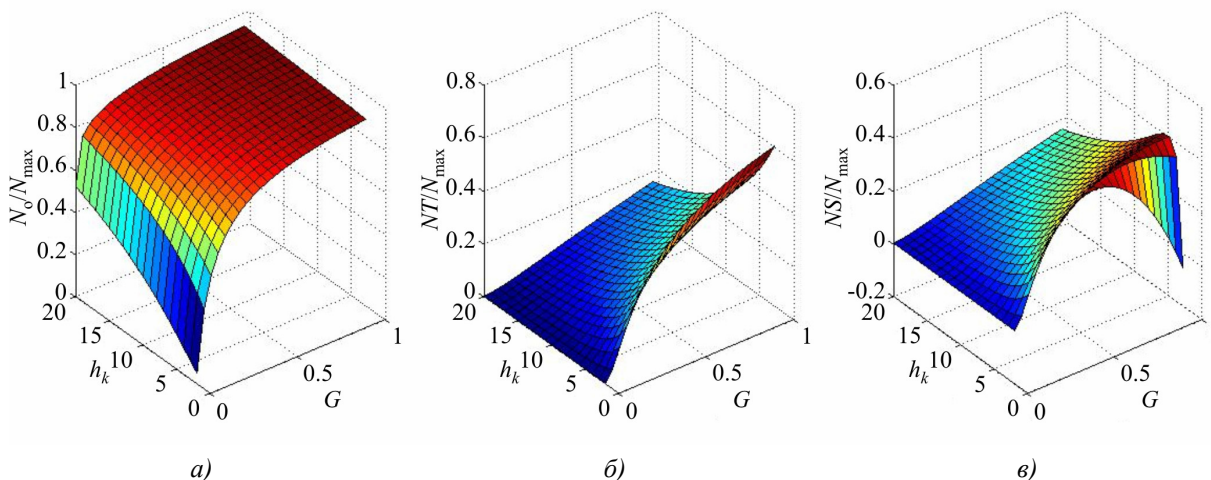


Рис. 5. Влияние режимных параметров (h_k и G) на мощность ТЭГ. а) – влияние потерь при теплообмене на спаях; б) – влияние перепада температур вдоль канала; в) – влияние затрат на прокачку теплоносителя.

Потери мощности из-за необратимости теплообмена между теплоносителем и спаями термоэлементов составляют порядка 7%; потери от снижения температурного напора вдоль канала могут достигать 30%; потери на прокачку теплоносителя составляют – 15 %...20 % от максимально возможной мощности генератора. В итоге максимальная полезная мощность ТЭГ составляет порядка 40 % от теоретически возможной.

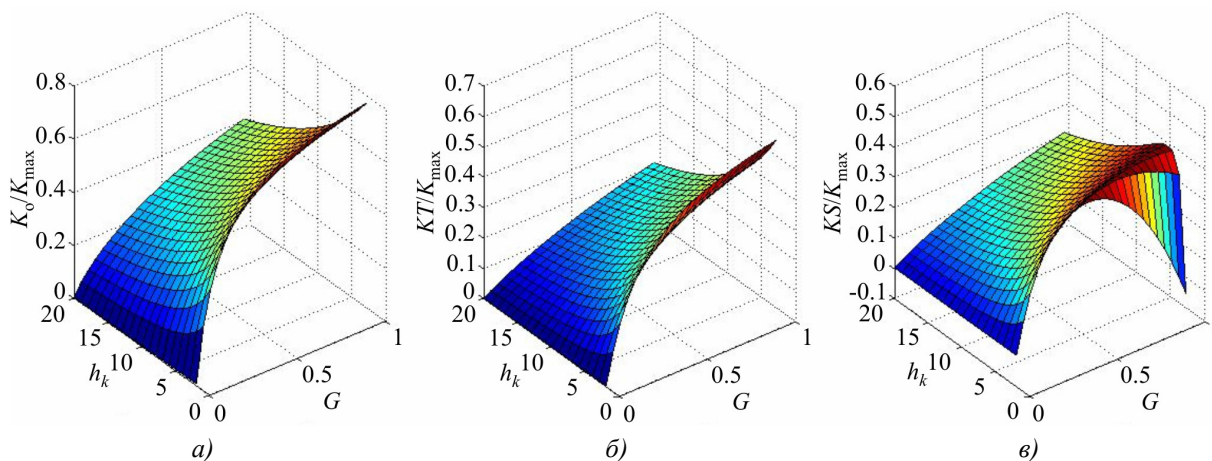


Рис. 6. Влияние режимных параметров (h_k и G) на КПД ТЭГ. а) – влияние потерь при теплообмене на спаях; б) – влияние перепада температур вдоль канала; в) – влияние затрат на прокачку теплоносителя.

Снижение КПД из-за рассматриваемых потерь в сумме составляет около 60 % по сравнению с теоретическим КПД для располагаемого перепада температур. Оптимальная высота канала для заданных условий равна $h_k \approx 5$ мм, оптимальный расход теплоносителя $G = 0.9$ кг/сек. Зависимости мощности и КПД ТЭГ от высоты термоэлементов при оптимальных G и h_k представлены на рис. 7.

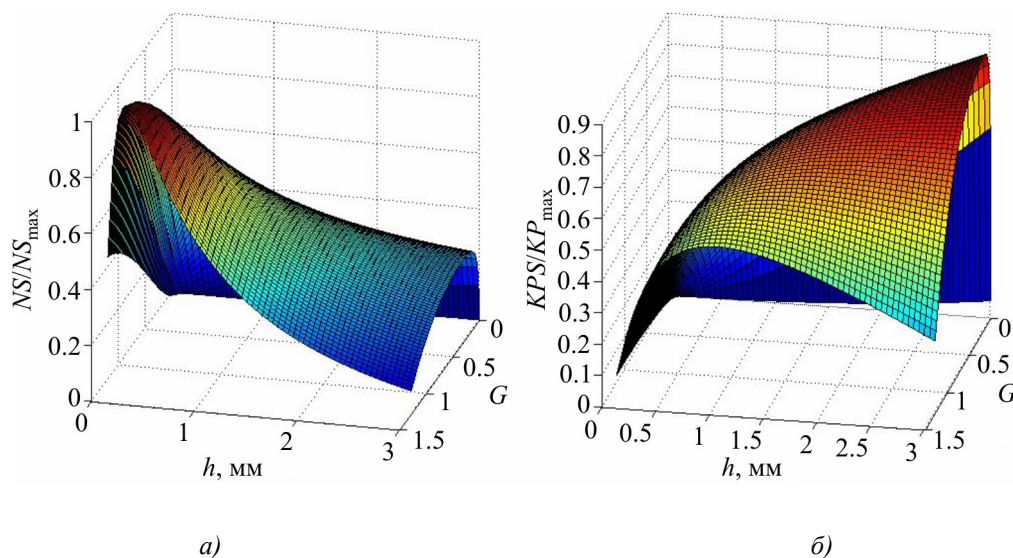


Рис. 7. Влияние высоты термоэлементов h на характеристики ТЭГ.

а) – безразмерная мощность ТЭГ (NS/NS_{max}); б) – относительный КПД ТЭГ (KPS/KP_{max}).

Как видно из приведенных данных, существует оптимальное значение h , обеспечивающее максимум мощности ТЭГ (в рассматриваемом случае $h_{opt} \approx 0.3$ мм). КПД же генератора при росте h возрастает монотонно. Отсюда следует, что оптимальное с точки зрения

обеспечения максимальной экономичности устройства значение h необходимо выбирать с учетом стоимостных характеристик как генератора, так и источника тепловой энергии.

Выводы

Представлена математическая модель термоэлектрического генератора теплообменного типа, обеспечивающая возможность расчета и оптимизации параметров подобных устройств.

Проведен анализ характеристик ТЭГ, интегрированного в конструкцию пластинчатого теплообменника, конкретизирована область определения задачи, получены оценки оптимальных параметров ТЭГ.

Литература

1. Лобунец Ю.М. Термоелектричний генератор // Патент України №8357 від 27.08.2013р.
2. Исаченко В.П. Теплопередача. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
3. Лобунец Ю.Н. Методы расчета и проектирования термоэлектрических преобразователей энергии. / Ю.Н. Лобунец – Киев: Наукова думка, 1989. – 176 с.
4. Лобунец Ю.Н. Оценка характеристик ОТЕС с термоэлектрическим преобразователем энергии / Ю.Н. Лобунец // Термоэлектричество. – 2013. – № 1. – С. 62 – 67.
5. Лобунец Ю.Н. Солнечный пруд с термоэлектрическим преобразователем энергии / Ю.Н. Лобунец // Термоэлектричество. – 2013, – № 2. – С. 95 – 99.

Поступила в редакцию 15.01.2014.