



Лобунец Ю.Н.

Лобунец Ю.Н.

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

ТЭГ ТЕПЛООБМЕННОГО ТИПА ДЛЯ КОРАБЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК. ЧАСТЬ II.

Проведен анализ характеристик термоэлектрических генераторов теплообменного типа, использующих теплоту системы охлаждения корабельных двигателей. Показаны перспективы их применения.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, низкопотенциальный источник теплоты, корабельные установки

The characteristics of heat exchange-type thermoelectric generators using the heat of marine engine cooling system are analyzed. The prospects of their using.

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

Введение

В работе [1] был проведен анализ схемы термоэлектрического генератора (ТЭГ) теплообменного типа, использующего теплоту выхлопных газов корабельных дизельных двигателей. Было показано, что технико-экономические показатели такой схемы позволяют рассчитывать на их широкое использование на водном транспорте. Вместе с тем в этой схеме существует еще один источник вторичной энергии – теплота системы охлаждения двигателя, на которую приходится до 10...15% затрат топлива. Несмотря на сравнительно низкий температурный потенциал, использование этого источника может быть не менее привлекательным из-за простоты схемы применения – практически она нуждается лишь в замене штатного теплообменника термоэлектрическим генератором, который, выполняя функции теплообменника, одновременно генерирует дополнительную электрическую мощность. Ниже рассмотрены особенности такого ТЭГ и приведены оценки его технико-экономических характеристик.

Схема ТЭГ теплообменного типа для системы охлаждения дизельной силовой установки

В общем случае система охлаждения корабельной дизельной установки (рис. 1) включает два контура теплоносителя, в одном из которых циркулирует охлаждающая

жидкость (пресная вода или антифриз), а во втором – забортная вода. Оптимальная температура охлаждающей жидкости составляет $90\text{...}100\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура забортной воды колеблется в пределах $5\text{...}30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разность температур теплоносителя на входе и выходе системы охлаждения не должна превышать $5\text{...}10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затраты теплоносителей в контурах определяются мощностью силовой установки и эффективностью теплообменника. Наиболее эффективные системы охлаждения используют пластинчатые теплообменники [2].

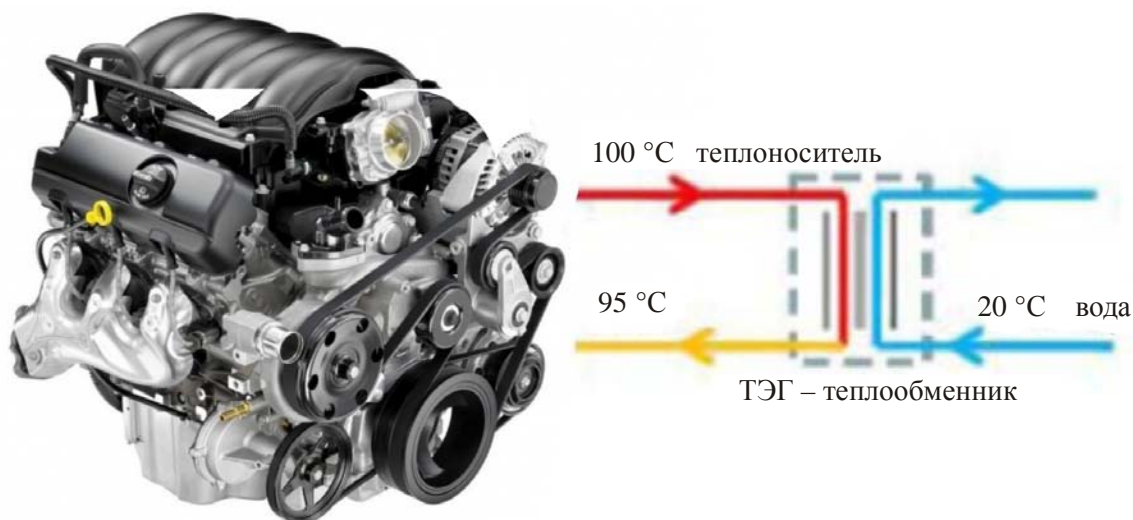


Рис. 1. Схема ТЭГ для корабельной установки.

Схема ТЭГ теплообменного типа аналогична схеме пластинчатого теплообменника, в котором вместо пластин установлены термобатареи [3]. Термобатареи состоят из термоэлектрических модулей, размещенных между двумя металлическими пластинами с четырьмя отверстиями, образующими коллекторы для теплоносителей. Батареи разделены эластичными прокладками, формирующими каналы для прохода теплоносителей и уплотняющими всю конструкцию, которая зажимается между двумя торцевыми пластинами (рис. 2).

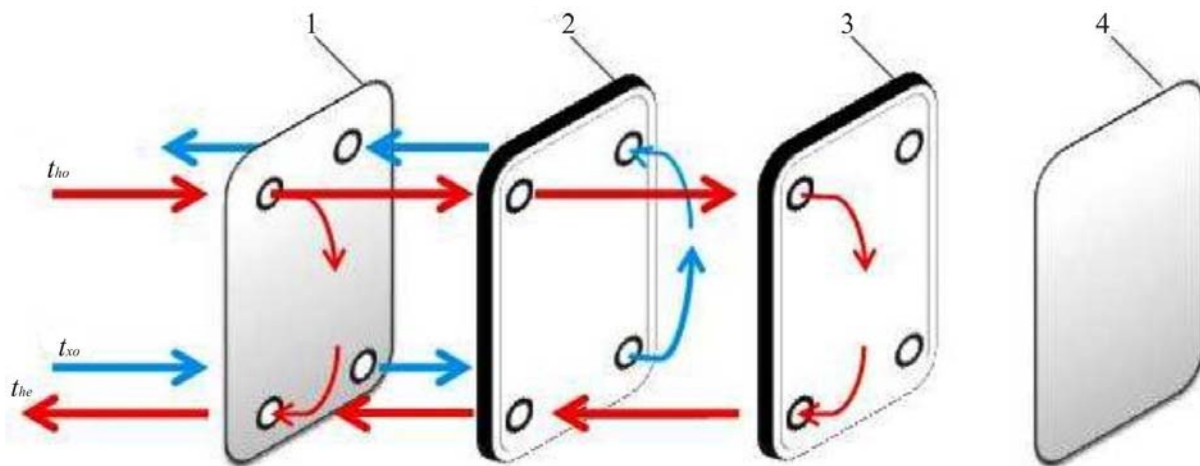


Рис. 2. Схема ТЭГ теплообменного типа 1, 4 – торцевые пластины (корпус ТЭГ); 2, 3 – термобатареи.

Главная функция ТЭГ теплообменного типа в рассматриваемой схеме, состоит в обеспечении охлаждения теплоносителя до заданной температуры. Одновременно необходимо оптимизировать параметры ТЭГ с целью получения максимальной электрической мощности.

Исходными параметрами задачи являются:

Q_o – тепловая мощность теплообменника (в приведенных ниже расчетах принято

$Q_o = 10$ кВт);

$t_{ho} = 100$ °С – температура теплоносителя на входе в ТЭГ;

$t_{he} = 95$ °С – температура теплоносителя на выходе из ТЭГ;

$t_{xo} = 30$ °С – температура забортной воды.

Математическая модель ТЭГ

Расчетная схема ТЭГ представлена на рис. 3.

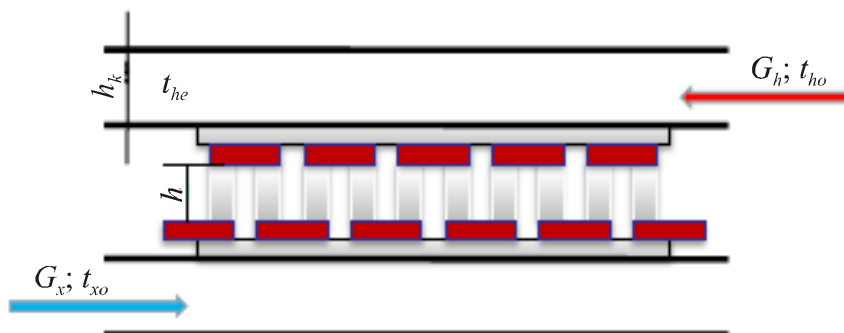


Рис. 3. Расчетная схема ТЭГ.

В общем случае математическая модель ТЭГ состоит из системы уравнений, позволяющих определить распределение температур в теплоносителях и термоэлементах [4]:

- уравнение для распределения температур в термоэлементах для граничных условий III рода:

$$\Theta(Y) = C_1 + C_2 Y - \frac{J^2}{2I_0} Y^2, \quad (1)$$

где постоянные интегрирования C_1, C_2 определяются как:

$$C_1(J + Bi_x) - C_2 = Bi_x \vartheta_x, \quad (2)$$

$$C_1(Bi_h - J) + C_2(Bi_h - J + 1) = Bi_h \vartheta_h + \frac{J^2}{I_0}(1 + 0.5Bi_h - J), \quad (3)$$

- уравнение для определения коэффициентов теплоотдачи:

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.43}, \quad (4)$$

- уравнение для определения распределения температур теплоносителей вдоль канала:

$$\frac{d\vartheta_h}{dX} = \frac{dKi_h}{W_h}, \quad (5a)$$

$$\frac{d\vartheta_x}{dX} = \frac{dKi_x}{W_x}, \quad (5б)$$

$$Ki_h = Bi_h(\vartheta_h - \Theta_h), \quad (6a)$$

$$Ki_x = Bi_x(\vartheta_x - \Theta_x). \quad (6б)$$

В приведенных выше уравнениях критерий Bi представляет собой соотношение термического сопротивления термоэлектрического материала и суммы термических сопротивлений на пути теплового потока от поверхности термоэлемента к теплоносителю, то есть

$$Bi = Ro / R_t, \quad (7)$$

где $R_t = \frac{1}{\alpha} + \sum_i \frac{h_i}{\lambda_i}$, h_i и λ_i толщина и коэффициент теплопроводности каждого из слоев на пути теплового потока (коммутационные элементы, теплопереход, корпус термобатареи, прослойки припоя и т.п.).

Поскольку система уравнений (1 – 7) является нелинейной, ее решение находим числовыми методами.

Результаты анализа

Постановка рассматриваемой задачи, жестко регламентирует параметры теплоносителя в первом контуре и, соответственно, определяет его общие затраты:

$$G_o = Q_o / [Cp(t_{ho} - t_{he})]. \quad (8)$$

Целью расчетов является определение общей площади ТЭГ, которая удовлетворяет исходным условиям задачи. Поскольку ТЭГ состоит из одинаковых термобатарей, на первом этапе нужно определить условия, при которых обеспечивается заданный температурный режим теплоносителя системы охлаждения в пределах одной термобатареи. То есть, для заданной конструкции термобатареи следует определить необходимые затраты теплоносителя G_i через один канал ТЭГ, при которых горячий теплоноситель охлаждается до заданной температуры. Это дает возможность определить необходимое количество термобатарей n_b , а также температурный режим каждого модуля в термобатареях, его мощность N_m , а также мощность термобатареи N_S и генератора в целом N_T :

$$N_m = \frac{E^2}{4R}; NS = \Sigma N_m; N_T = n_b NS, \quad (9)$$

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

Распределение температур теплоносителей и спаев термоэлементов вдоль термобатареи, составляющей из 10 модулей, иллюстрирует рис. 4.

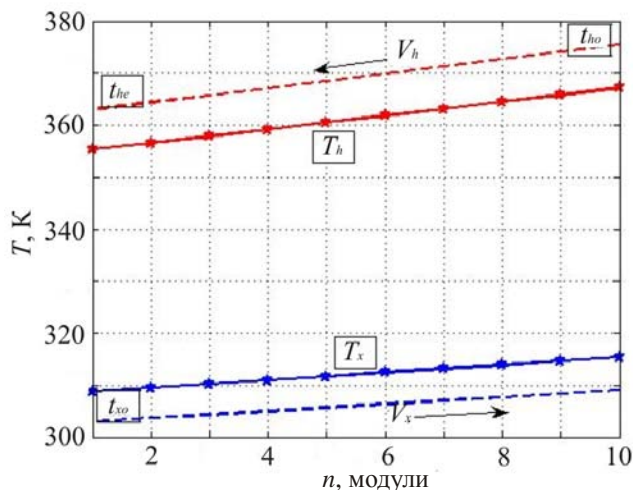


Рис. 4. Распределение температур вдоль термобатареи.

Следующей задачей является оптимизация параметров термоэлектрических модулей с целью обеспечения наилучшей экономичности ТЭГ. Учитывая то, что габариты термобатареи лимитированы размерами корпуса штатного теплообменника ДВС, практически единственным независимым параметром остается высота термоэлементов h , которая определяет термическое сопротивление термобатареи и, соответственно, все технические параметры ТЭГ – необходимое количество термобатареи и модулей, условия теплообмена в каналах, перепад температур на термоэлементах, мощность генератора и его стоимость.

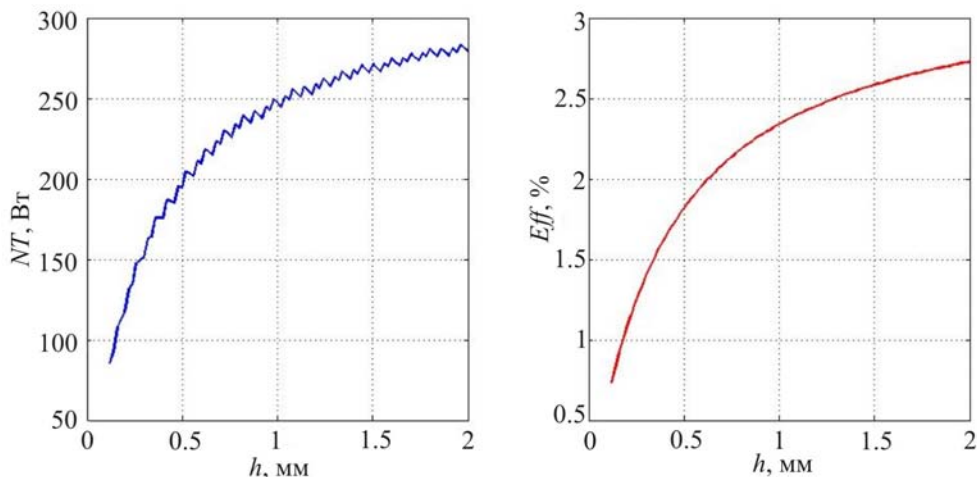


Рис. 5. Зависимости мощности (NT) и КПД (Eff) ТЭГ от высоты термоэлементов h .

Зависимость мощности и КПД ТЭГ от высоты термоэлемента приведены на рис. 5. Очевидно, что увеличение высоты термоэлементов обеспечивает возможность более полного использования имеющегося перепада температур и соответствующего роста КПД термоэлементов и общей мощности ТЭГ. Однако рост термического сопротивления термоэлементов приводит к снижению коэффициента теплопередачи, что вызывает необходимость увеличения поверхности теплообмена, то есть увеличение количества термобатарей и рост стоимости ТЭГ. Зависимость необходимого количества модулей от высоты термоэлемента приведена на рис. 6 (колебания кривых обусловлены дискретным характером математической модели – размеры ТЭГ могут меняться только на целочисленные значения количества модулей).

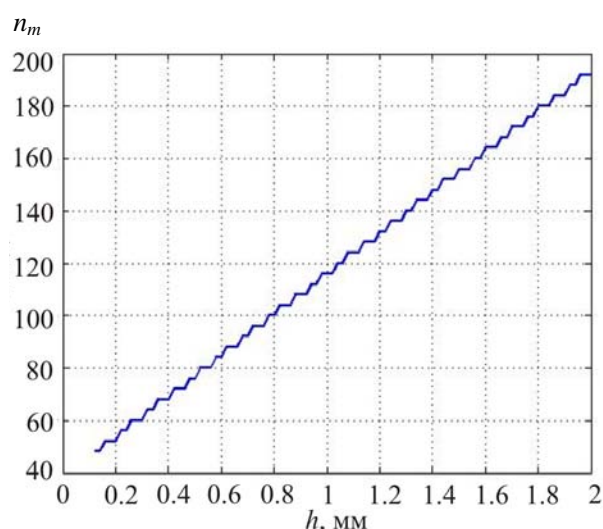


Рис. 6. Зависимость необходимого количества модулей n_m от высоты термоэлементов h .

Следует отметить, что стоимость отдельного модуля также зависит от высоты термоэлемента, поскольку меняется необходимое количество термоэлектрического материала. Зависимость удельной стоимости установленной мощности ТЭГ от высоты термоэлементов с учетом этого фактора, и без него, приведена на рис. 7 (базовой ценой принята розничная стоимость модуля 40×40 мм с высотой термоэлементов 2 мм – $P_s = 5$ \$US; стоимость термоэлектрического материала в цене модуля составляет 20%).

Видно, что минимальная удельная стоимость ТЭГ достигается в зоне относительно небольших мощностей, то есть, стремление обеспечить максимальную мощность ТЭГ приводит к существенному росту капитальных затрат. Для преодоления этого противоречия необходимо найти компромиссное решение, которое обеспечит наилучшие технико-экономические характеристики ТЭГ. В качестве критериев для такого решения могут быть использованы показатели экономии топлива, или срок окупаемости ТЭГ, который можно рассчитать как:

$$T_0 = \frac{Price}{\tau g P_f}, \text{ лет,} \quad (10)$$

где $Price$ – удельная стоимость ТЭГ, $\$/\text{кВт}$; g – удельные затраты топлива на производство 1 кВт·часа электроэнергии корабельной установкой (0.2 кг/кВт·час); P_f – стоимость топлива (ориентировочно 1 $\$/\text{кг}$); $\tau = 8640$ часов/год).

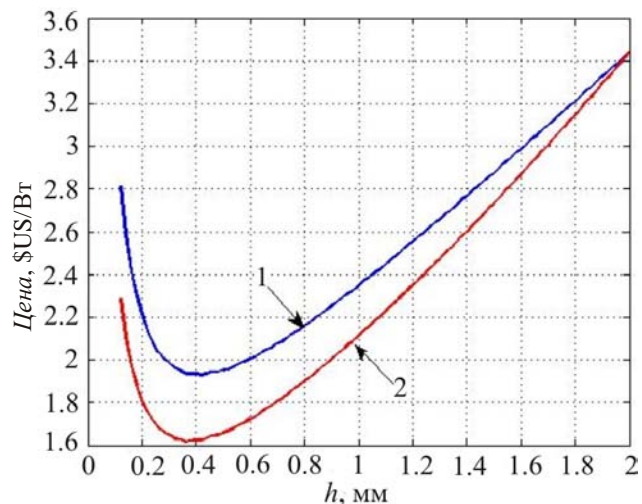


Рис. 7. Зависимость удельной стоимости ТЭГ, $\$/\text{Вт}$, от высоты термоэлементов h .

1 – без учета влияния h на количество материала;

2 – с учетом влияния h на количество материала.

Зависимость сроков окупаемости ТЭГ от высоты термоэлементов иллюстрирует рис. 8.

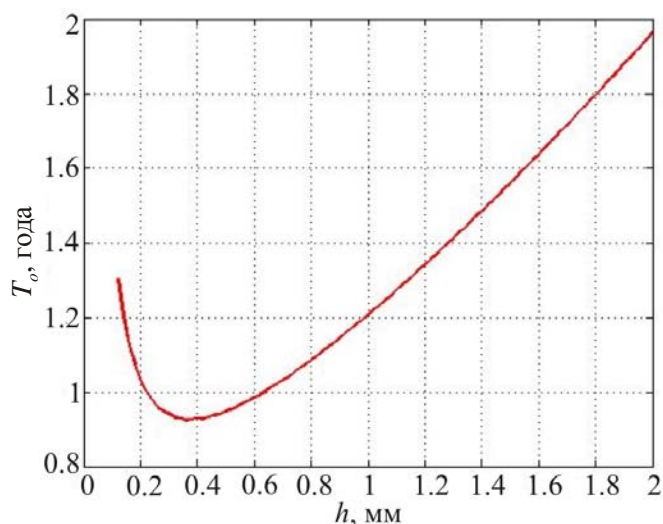


Рис. 8. Зависимость сроков окупаемости ТЭГ от высоты термоэлементов h .

Как видно из приведенных данных, рассмотренная схема ТЭГ обеспечивает вполне приемлемые технико-экономические показатели в широком диапазоне возможных конструктивных решений.

Выводы

1. Рассмотрена схема ТЭГ теплообменного типа, использующих как источник энергии теплоту системы охлаждения корабельных силовых установок.
2. Показано, что рассмотренная схема обеспечивает вполне приемлемые сроки окупаемости, что позволяет рассчитывать на широкое использование подобных ТЭГ на водном транспорте.

Условные обозначения

L – длина термобатареи, см;

b – ширина термобатареи, см;

F – площадь термобатареи, см²;

h – высота термоэлемента, см;

n_v – количество термоэлементов в модуле;

n_m – количество модулей в термобатарее;

P_s – стоимость модуля, \$US;

$X = \frac{x}{L}$, $Y = \frac{y}{L}$, – безразмерные координаты;

G – затраты теплоносителя, кг/с;

C_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К;

$W = \frac{GC_p}{b\lambda}$ – безразмерный водный эквивалент;

T – температура термоэлемента;

t – температура теплоносителя;

$\Theta = \frac{T}{T_p}$ – безразмерная температура термоэлемента;

$\vartheta = \frac{t}{T_p}$ – безразмерная температура теплоносителя;

T_p – определяющая температура;

σ – коэффициент электропроводности, (Ом·см)⁻¹;

e – коэффициент термоЭДС, В/К;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/см·К;

j – плотность тока, А/см²;

$R_o = \frac{h}{\lambda}$ – термическое сопротивление термоэлектрического материала, см²К/Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/см²К;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/см²К ;

$z = e^2\sigma/\lambda$ – термоэлектрическая добротность, К⁻¹;

$Io = zT_p$ – критерий Иоффе;

$Bi = \frac{h}{\lambda R_i}$ – критерий Био;

Ki – критерий Кирпичова;

Nu – критерий Нуссельта;

Re – критерий Рейнольдса;

Pr – критерий Прандтля;

$J = \frac{jeh}{\lambda}$ – безразмерная плотность тока;

Индексы:

h – горячий;

x – холодный.

Литература

1. Лобунец Ю.М. ТЭГ теплообмінного типу для суднових силових установок. Частина I// Термоелектрика. – 2014, №5. – С. 31 – 38.
2. <http://www.alfalaval.com/industries/marine/cooling-heating/pages/cooling-and-heating.aspx>
3. Лобунец Ю.М. Термоелектричний генератор // Патент України №8357 від 27.08.2013р.
4. Лобунец Ю.М. Аналіз характеристик термоелектричного генератора теплообмінного типу// Термоелектрика. – 2014, №1. – С. 54 – 61.

Поступила в редакцію 15.12.2014.