



Анатычук Л.И.

**О ВЛИЯНИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ  
СИСТЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРИБОРОВ**

Анатычук Л.И., Прибыла А.В.  
(Институт термoeлектричества,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина)



Прибыла А.В.

- Исследованы обобщенные модели термoeлектрических преобразователей энергии в режимах генерации и охлаждения с учетом влияния теплообменных систем на их энергетические характеристики. Показано, что недостаточно качественные и не специализированные теплообменные устройства снижают энергетические характеристики на 30–50%. Анализируются возможности улучшения такой ситуации.

**Введение**

*Общая характеристика проблемы.* Деятельность, направленная на улучшение эффективности термoeлектрической аппаратуры [1], в первую очередь, сосредоточена на самих термoeлектрических преобразователях энергии и сводится к повышению добротности [2] термoeлектрических материалов для таких преобразователей. Однако эффективность термoeлектрических приборов зависит не только от качества термoeлектрических преобразователей энергии. Не в меньшей мере она зависит и от теплообменных приборов и систем, которыми подводятся и отводятся тепловые потоки к и от термoeлектрических преобразователей энергии. При этом, улучшению качества теплообменных приборов и систем, к данному времени, не отводится соответствующего внимания. Предварительный анализ показывает, что реальные значения коэффициента полезного действия, холодильного и отопительного коэффициентов являются значительно меньше, чем ожидаемые даже при достигнутых значениях добротности материала. Это связано с тем, что при проектировании и оптимизации термoeлектрической аппаратуры преимущественно пользуются упрощенными физическими моделями [3-8], которые не учитывают качества систем теплообмена, тепловые и электрические потери, которые могут значительно ухудшить их энергетические характеристики.

Поэтому целью работы является исследование физических моделей генераторов и приборов охлаждения с учетом влияния систем теплообмена.

**Режим генерации электрической мощности**

Физическая модель термoeлектрического генератора изображена на рис. 1. Генерация электрической мощности  $W$  осуществляется термoeлектрическим модулем 7. Тепловой поток  $Q_2$  получается от горячего теплоносителя 2 с температурой  $T_{2,m}$  и расход  $G$  с помощью теплообменника, который состоит из жидкостно-воздушного радиатора 3 и жидкостного теплообменника 5. Движение жидкости обеспечивается жидкостным насосом 4, который потребляет электрическую мощность  $W_2$ , а движение воздуха интенсифицируется вентилятором 1, потребляющим электрическую мощность  $W_1$ . С обеих сторон термoeлектрического модуля помещаются теплопроводные пластины 12, 13 которые улучшают тепловой контакт между элементами генератора. Со стороны горячей стороны термoeлектрического модуля размещен металлический элемент 6, по которому происходит перетекание тепла  $Q_2$  от теплообменника 5 к термoeлектрическому модулю 7. Отвод тепла от холодной стороны термoeлектрического модуля

осуществляется теплообменником, который состоит из жидкостного теплообменника 8 и жидкостно-воздушного радиатора 10. Движение жидкости обеспечивается жидкостным насосом 9, потребляющим электрическую мощность  $W_3$ , а движение воздуха интенсифицируется вентилятором 11, потребляющим электрическую мощность  $W_4$ .

Термоэлектрический генераторный модуль характеризуется такими показателями как генерируемая электрическая мощность  $W$  и коэффициент полезного действия  $\eta$ , что определяется отношением полученной электрической мощности  $W$  к затраченной тепловой  $Q$ . Однако во время работы термоэлектрический генератор (ТЭГ) расходует электрическую энергию на свое функционирование и, кроме того, всегда имеют место температурные и тепловые потери на элементах его конструкции  $Q_6$ . Поэтому реальная электрическая мощность ТЭГ будет меньше  $W_p = W - W_1 - W_2 - W_3 - W_4$ , соответственно, и реальный КПД будет определяться величиной  $W_p$  и реальным тепловым потоком  $Q_p$ , что будет учитывать все потери на элементах конструкции ТЭГ  $\eta_{ТЭГ} = W_p / Q_p$ .

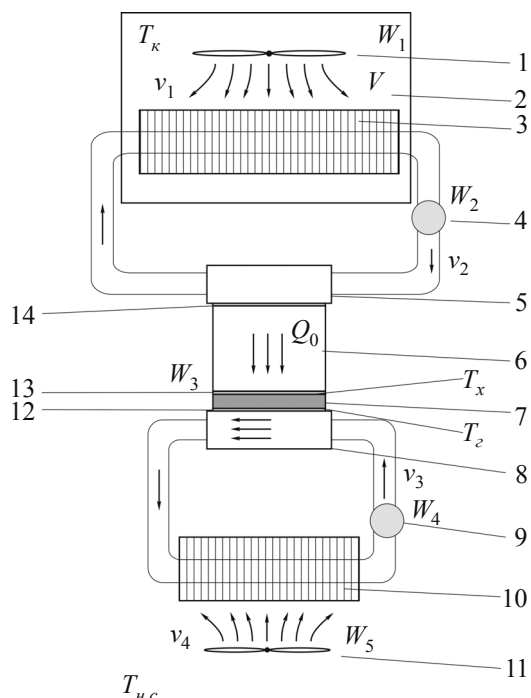


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического генератора: 1, 11 – вентиляторы, 2 – объем, заполненный горячим теплоносителем, 3 – жидкостно-воздушный радиатор, 4, 9 – жидкостные насосы, 5 – жидкостный теплообменник, 6 – элемент, через который перетекает тепловой поток, 7 – термоэлектрический модуль, 8 – жидкостный теплообменник, 10 – жидкостно-воздушный радиатор, 12 – 14 – тепловые контакты между элементами конструкции ТЭГ.

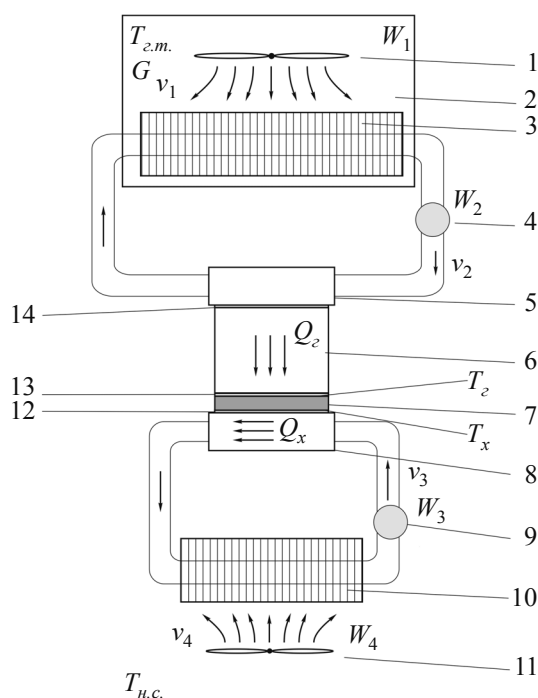


Рис. 2. Физическая модель термоэлектрического теплового насоса: 1, 11 – вентиляторы, 2 – камера охлаждения, 3 – жидкостно-воздушный радиатор, 4, 9 – жидкостные насосы, 5 – жидкостный теплообменник, 6 – элемент, через который перетекает тепловой поток, 7 – термоэлектрический модуль, 8 – жидкостный теплообменник, 10 – жидкостно-воздушный радиатор, 12 – 14 – тепловые контакты.

$$\eta_{ТЭГ} = \frac{W_k}{Q_3}, \quad (1)$$

где  $\eta_{ТЭГ}$  – КПД ТЭГ,  $W_k$  – полезная электрическая мощность,  $Q_3$  – затраченная тепловая мощность.

$$W_{\kappa} = W_{TЭБ} - W_{эл.пот.}, \quad (2)$$

где  $W_{TЭБ}$  – электрическая мощность термоэлектрической батареи,  $W_{эл.пот.}$  – электрическая мощность, которая используется на дополнительное питание ТЭГ (питание электрических вентиляторов и электрических жидкостных насосов).

$$W_{TЭБ}(T_2, T_x) = Q_2 \cdot \eta_{TЭБ}(T_2, T_x), \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_x + W_{TЭБ}(T_2, T_x). \quad (4)$$

В формулах  $Q_2$  – тепловой поток к термоэлектрическому модулю,  $Q_x$  – тепловой поток после термоэлектрического модуля,  $T_2$  – температура горячей стороны термоэлектрического модуля,  $T_x$  – температура холодной стороны термоэлектрического модуля,  $\eta_{TЭБ}(T_2, T_x)$  – КПД термоэлектрической батареи.

$$Q_3 = C \cdot m \cdot (T_{г.м.} - T_{н.с.}) = C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{г.м.} - T_{н.с.}), \quad (5)$$

где  $C$  – теплоемкость теплоносителя,  $m$  – масса теплоносителя,  $G$  – расход теплоносителя,  $\rho$  – плотность теплоносителя,  $T_{г.м.}$  – температура газового теплоносителя,  $T_{н.с.}$  – температура окружающей среды.

Тепловой поток и температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля определяются из уравнений теплового баланса:

$$Q_2 = \alpha_1(v_1) \cdot S_1 \cdot (T_{г.м.} - T_1), \quad (6)$$

где  $\alpha_1(v_1)$  – коэффициент теплоотдачи внешней поверхности жидкостно-воздушного радиатора;  $S_1$  – площадь внешней поверхности жидкостно-воздушного радиатора, который контактирует с горячим теплоносителем;  $T_1$  – температура поверхности жидкостно-воздушного радиатора, который контактирует с горячим теплоносителем;

$$Q_2 = \chi_1 \cdot (T_1 - T_2), \quad (7)$$

где  $\chi_1$  – тепловое сопротивление горячего жидкостно-воздушного радиатора,  $T_2$  – температура внутренней поверхности жидкостно-воздушного радиатора;

$$Q_2 = \alpha_2(v_2) \cdot S_2 \cdot (T_2 - T_3), \quad (8)$$

где  $\alpha_2(v_2)$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности жидкостно-воздушного теплообменника,  $S_2$  – площадь внутренней поверхности жидкостно-воздушного теплообменника,  $T_3$  – средняя температура жидкости между входом и выходом в жидкостно-воздушный теплообменник;

$$Q_2 = \alpha_3(v_2) \cdot S_3 \cdot (T_3 - T_4), \quad (9)$$

где  $\alpha_3(v_2)$  – коэффициент теплоотдачи жидкостного теплообменника,  $S_3$  – площадь внутренней поверхности жидкостного теплообменника,  $T_4$  – температура поверхности жидкостного теплообменника, который прикасается жидкости;

$$Q_2 = \chi_2 \cdot (T_4 - T_5), \quad (10)$$

где  $\chi_2$  – тепловое сопротивление горячего жидкостного теплообменника,  $T_5$  – температура поверхности горячего жидкостного теплообменника, который прикасается к металлическому теплопроводному элементу;

$$Q_z = \chi_3 \cdot (T_5 - T_6), \quad (11)$$

где  $\chi_3$  – тепловое контактное сопротивление между горячим жидкостным теплообменником и металлическим теплопроводным элементом,  $T_6$  – температура поверхности металлического теплопроводного элемента, который прикасается к горячему жидкостному теплообменнику;

$$Q_z = \chi_4 \cdot (T_6 - T_7), \quad (12)$$

где  $\chi_4$  – тепловое сопротивление металлического теплопроводного элемента,  $T_7$  – температура поверхности металлического теплопроводного элемента, который прикасается к термоэлектрическому модулю;

$$Q_z = \chi_5 \cdot (T_7 - T_z), \quad (13)$$

где  $\chi_5$  – тепловое контактное сопротивление между металлическим теплопроводным элементом и термоэлектрическим модулем;

$$Q_z = \chi_6 \cdot (T_z - T_x) + W_{ТЭБ}(T_z, T_x), \quad (14)$$

где  $\chi_6$  – тепловое сопротивление термоэлектрического модуля;

$$Q_x = \chi_7 \cdot (T_x - T_8), \quad (15)$$

где  $\chi_7$  – тепловое контактное сопротивление между термоэлектрическим модулем и жидкостным теплообменником,  $T_8$  – температура поверхности жидкостного теплообменника, который прикасается к термоэлектрическому модулю;

$$Q_x = \chi_8 \cdot (T_8 - T_9), \quad (16)$$

где  $\chi_8$  – тепловое сопротивление водяного теплообменника,  $T_9$  – температура поверхности холодного жидкостного теплообменника, который контактирует с жидкостью;

$$Q_x = \alpha_4(v_3) \cdot S_4 \cdot (T_9 - T_{10}), \quad (17)$$

где  $\alpha_4(v_3)$  – коэффициент теплоотдачи жидкостного теплообменника,  $S_4$  – площадь поверхности жидкостного теплообменника,  $T_{10}$  – средняя температура жидкости между входом и выходом в холодный жидкостный теплообменник;

$$Q_x = \alpha_5(v_3) \cdot S_5 \cdot (T_{10} - T_{11}), \quad (18)$$

где  $\alpha_5(v_3)$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности жидкостно-воздушного теплообменника,  $S_5$  – площадь внутренней поверхности жидкостно-воздушного теплообменника,  $T_{11}$  – средняя температура жидкости между входом и выходом в холодный жидкостно-воздушный теплообменник;

$$Q_x = \chi_9 \cdot (T_{11} - T_{12}), \quad (19)$$

где  $\chi_9$  – тепловое сопротивление жидкостно-воздушного теплообменника,  $T_{12}$  – температура поверхности жидкостно-воздушного теплообменника, который контактирует с окружающей средой;

$$Q_x = \alpha_6(v_4) \cdot S_6 \cdot (T_{12} - T_{н.с.}), \quad (20)$$

где  $\alpha_6(v_4)$  – коэффициент теплоотдачи внешней поверхности жидкостно-воздушного теплообменника,  $S_6$  – площадь поверхности жидкостно-воздушного теплообменника, который контактирует с окружающей средой.

Подставив (2 – 5) в (1) получаем:

$$\eta_{ТЭГ} = \frac{W_{\kappa}}{Q_z} = \frac{W_{ТЭБ} - W_{эл.ном.}}{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.м.} - T_{н.с.})} = \frac{Q_z \cdot \eta_{ТЭБ}(T_z, T_x) - W_{эл.ном.}}{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.м.} - T_{н.с.})}. \quad (21)$$

Подставив в (21) уравнение теплового баланса (6) – (20) получаем

$$\eta_{ТЭГ} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.}) \cdot \eta_{ТЭБ}(T_z, T_x) - W_{эл.пот.}}{1 + \alpha_1 \cdot S_1 \cdot [N_1 + N_2 \cdot (1 - \eta_{ТЭБ}(T_z, T_x))]} \cdot \frac{C \cdot G \cdot \rho \cdot (T_{z.m.} - T_{н.с.})}{}, \quad (22)$$

де

$$N_1 = \frac{1}{\chi_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot S_2} + \frac{1}{\alpha_3 \cdot S_3} + \frac{1}{\chi_2} + \frac{1}{\chi_3} + \frac{1}{\chi_4} + \frac{1}{\chi_5} + \frac{1}{\chi_6}, \quad (23)$$

$$N_2 = \frac{1}{\chi_7} + \frac{1}{\chi_8} + \frac{1}{\alpha_4 \cdot S_4} + \frac{1}{\alpha_5 \cdot S_5} + \frac{1}{\chi_9} + \frac{1}{\alpha_6 \cdot S_6}.$$

### Режим теплового насоса

Физическая модель термоэлектрического теплового насоса изображена на рис. 2. Термоэлектрическое охлаждение и нагрев осуществляется с помощью термоэлектрического модуля 7, потребляющего электрическую мощность  $W_3$ . Перенос тепла с камеры охлаждения (нагрева) 2 объемом  $V$  и температурой  $T_k$  осуществляется с помощью теплообменника, который состоит из жидкостно-воздушного радиатора 3 и жидкостного теплообменника 5. Движение жидкости обеспечивается жидкостным насосом 4, потребляющим электрическую мощность  $W_2$ , а движение воздуха интенсифицируется вентилятором 1, потребляющим электрическую мощность  $W_1$ . С обеих сторон термоэлектрического модуля содержатся теплопроводные слои 12, 13, что улучшают тепловой контакт с элементами теплового насоса. Со стороны холодной стороны термоэлектрического модуля размещен металлический элемент 6, по которому происходит перетекание тепла  $Q_0$  от теплообменника 5 к термоэлектрическому модулю 7. Отвод тепла от горячей стороны термоэлектрического модуля осуществляется теплообменником, который состоит из жидкостного теплообменника 8 и жидкостно-воздушного радиатора 10. Движение жидкости обеспечивается жидкостным насосом 9, который потребляет электрическую мощность  $W_4$ , а движение воздуха интенсифицируется вентилятором 11, потребляющим электрическую мощность  $W_5$ . Из внешней среды в камеру охлаждения (нагрева) происходит натекание тепла  $Q_1$ .

Термоэлектрический модуль охлаждения характеризуется холодопроизводительностью (теплопроизводительностью)  $Q_0$ , то есть количеством теплоты, которая перетекает из камеры охлаждения (нагрева) через термоэлектрический модуль, а также холодильным (отопительным) коэффициентом термоэлектрического модуля  $\varepsilon_1$ , что является отношением холодопроизводительности (теплопроизводительности)  $Q_0$  к затраченной электрической мощности  $W_3$ . Однако на практике важными являются реальные значения холодопроизводительности (теплопроизводительности), которые будут уменьшаться за счет тепловых потерь на элементах конструкции, а также за счет натекания тепла из внешней среды  $Q_n$ . Холодильный и отопительный коэффициенты теплового насоса будут определяться отношением реальной холодопроизводительности (теплопроизводительности)  $Q_p$  к общей затраченной электрической мощности  $W_p = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5$ .

$$\varepsilon_{ТН} = \frac{Q_p}{W_p}, \quad (24)$$

где  $\varepsilon_{ТН}$  – холодильный коэффициент,  $W_p$  – затраченная электрическая мощность,  $Q_p$  – холодопроизводительность теплового насоса.

$$Q_p = Q_{ТЭБ}(T_z, T_x) - Q_1, \quad (25)$$

где  $Q_{ТЭБ}$  – холодопроизводительность термоэлектрической батареи.

Тепловой поток и температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического модуля определяются из уравнений теплового баланса с учетом значений всех тепловых потерь на элементах конструкции, как это было описано в предыдущем пункте.

Итак, 
$$\varepsilon_{TH} = \frac{Q_{ТЭБ}(T_c, T_x) - Q_n}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}. \quad (26)$$

### Анализ результатов

Полученные соотношения для КПД и холодильного коэффициента позволяют провести анализ влияния на них систем теплообмена. Для анализа были использованы значения реально существующих теплообменных систем. Установлено, что использование неспециализированных систем теплообмена ведет к снижению КПД ТЭГ на величину от 30 – 50% и холодильного коэффициента тепловых насосов до 55%.

Такие результаты свидетельствуют о необходимости создания высокоэффективных, специализированных для термоэлектричества жидкостных, воздушных и воздушно-жидкостных теплообменников. Необходима также оптимизация мощностей вентиляторов и жидкостных насосов при проектировании термоэлектрических приборов, в том числе, при помощи современных компьютерных методов расчета.

Оценки показывают, что таким путем могут быть улучшены эффективности термоэлектрических генераторов и холодильников в 1.2 – 1.5 раз.

### Выводы

1. Получено соотношения для КПД и холодильного коэффициента термоэлектрических приборов с учетом влияния систем теплообмена.
2. Установлено, что использование неспециализированных систем теплообмена ведет к снижению КПД ТЭГ на 30 – 50% и холодильного коэффициента тепловых насосов до 55%.
3. Рассчитано и показано, что использование специализированных систем теплообмена позволит улучшить эффективность термоэлектрических генераторов и холодильников в 1.2 – 1.5 раз.

### Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
2. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
3. Михайловський В.Я. Физические модели термогенераторов на органическом топливе. Основные пути повышения их эффективности и расширения практического применения / В.Я. Михайловський // Термоэлектричество. – 2005. – №2. – С. 7 – 43.
4. Каганов М.А. Термоэлектрические тепловые насосы (теоретические основы расчета) / М.А. Каганов, М.Р. Привин // Энергия, 1970. – 86 с.
5. <http://www.lairdtech.com>
6. <http://www.kryotherm.ru>
7. <http://www.fujitaka.com>
8. <http://www.hi-z.com>

Поступила в редакцию 07.06.2012.