

Анатычук Л.И., Кузь Р.В.

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



Анатычук Л. И.



Кузь Р. В.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОМОБИЛЯ С БЕНЗИНОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

В работе рассмотрена физическая модель термогенератора (ТЭГ) для бензинового двигателя с системой отвода тепла от ТЭГ, содержащая воздушно-жидкостный теплообменник и электрический вентилятор. Приводится математическое и компьютерное описание модели. Рассмотрено компьютерное моделирование модели для бензинового двигателя мощностью 70 кВт. Найдены оптимальные горячие температуры генератора и оптимальные мощности вентилятора, при которых достигается максимальная полезная мощность и, соответственно, максимальный реальный КПД ТЭГ с учетом затрат на питание вентилятора от ТЭГ для температур окружающего воздуха в интервале $-40...+50^{\circ}\text{C}$. Проведено сравнение таких КПД с ранее полученными для дизельного двигателя. Показано, что реальный КПД ТЭГ с теплообменником для бензинового двигателя в 1.3 – 1.5 раза выше, чем для дизельного двигателя такой же мощности.

Ключевые слова: рекуперация тепла, термоэлектрический генератор, двигатели внутреннего сгорания.

The paper is concerned with a physical model of a thermoelectric generator (TEG) for a petrol engine with a system of heat removal from TEG, comprising an air-to-liquid heat exchanger and an electric fan. A mathematical and computer description of the model is presented. Computer simulation of the model for a 70 kW petrol engine is considered. Optimal hot side temperatures of the generator and optimal powers of the fan are found whereby maximum net power is attained and, accordingly, maximum real efficiency of TEG with regard to expenditures on the fan supply for ambient temperatures in the range of $-40...+50^{\circ}\text{C}$. A comparison of such efficiencies to those previously obtained for a diesel engine is made. It is shown that a real efficiency of TEG with a heat exchanger for a petrol engine is 1.3 – 1.5 fold higher than for a diesel engine of the same power.

Key words: heat recovery, thermoelectric generator, internal combustion engines.

Введение

Использование отходов тепла от двигателей внутреннего сгорания – одна из наиболее обсуждаемых тем в практических применениях термоэлектричества. Конечная цель такого применения – экономия топлива за счет использования отходов тепла двигателя для генерации электрической энергии [1, 2].

Как известно, наличие термоэлектрического генератора в составе автомобиля существенно влияет на его работу. Отрицательными факторами являются, например, дополнительное сопротивление движению газов в выхлопной системе автомобиля; дополнительные затраты мощности двигателя на транспортировку самого ТЭГ; затраты, вызванные необходимостью отводить тепло от термоэлектрического генератора. В работах [3-5] рассматриваются некоторые из

этих влияний. Показано, что для легковых автомобилей эти затраты иногда могут превышать полезную работу ТЭГ.

Затраты на теплоотвод от ТЭГ для автомобиля с дизельным двигателем рассмотрены в работе [6]. Определены величины этих затрат для двигателя мощностью 75 кВт. Установлено, что затраты на отвод тепла от односекционного ТЭГ могут достигать 15-25% от выработанной ТЭГ электрической энергии, или ориентировочно 6-12% от мощности ТЭГ в виде механической энергии двигателя. В общем, показано, что для дизельного двигателя применение ТЭГ при учете затрат на отвод тепла, дает дополнительно 1.5-4% к мощности двигателя в виде электрической энергии, что, соответственно, может дать около 2-6% экономии топлива при отказе от динамомашинны.

Интересно определить аналогичные закономерности для бензиновых двигателей, поскольку, как известно, температура выхлопного газа у них значительно выше по сравнению с дизельными, что может дать более оптимистичные показатели экономии топлива.

Цель этой работы – оценить эффективность применения термоэлектрического генератора для автомобиля с бензиновым двигателем с учетом затрат энергии на отвод тепла от ТЭГ.

Физическая модель и компьютерное проектирование ТЭГ для автомобиля

Работу термоэлектрического генератора в составе автомобиля можно представить схемой, изображенной на рис. 1.

Выхлопной газ тепловой мощности Q_{in} из двигателя 1 поступает в термоэлектрический генератор 2 с тепловым сопротивлением R_t при температуре T_{in} и покидает генератор при температуре T_{out} . ТЭГ вырабатывает электрическую энергию W_{TEG} при КПД η_{TEG} . Рассматривается случай, когда часть этой электрической энергии W_{cool} расходуется на работу системы охлаждения 4, которая отводит от ТЭГ тепловую мощность Q_{TEG} . Температура окружающей среды T_{amb} .

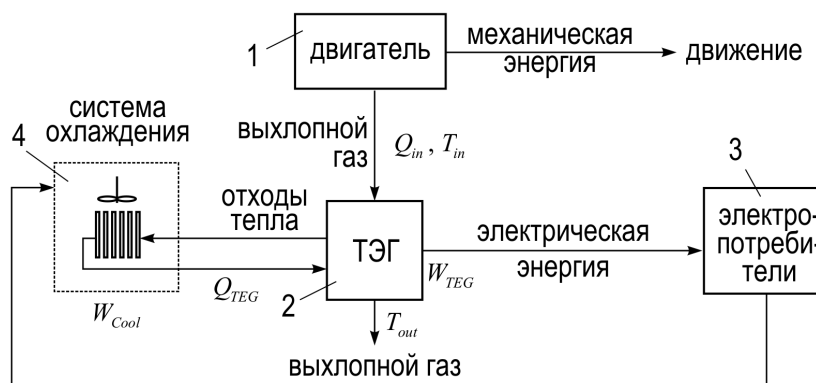


Рис. 1. Модель работы ТЭГ в составе автомобиля с учетом затрат электрической энергии на отвод тепла от термогенератора.

Компьютерная модель и методы проектирования для этой модели приведены в работе [6]. Основные соотношения для расчетов следующие:

$$T_{out}(R_t) = \left(Q_{in} \left(1 + \frac{T_{amb}}{T_{in} - T_{amb}} \right) + \frac{T_0}{R_t} \right) / \frac{1}{R_t} + \frac{Q_{in}}{T_{in} - T_{amb}}, \quad (1)$$

$$\eta_{TEG}(R_t) = \frac{T_{out} - T_0}{T_{out}} \frac{M - 1}{M + T_0 / T_{out}}, \quad (2)$$

где

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{(T_{out} + T_0)}{2}}. \quad (3)$$

Эффективный КПД ТЭГ вводится выражением:

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (4)$$

Они ничем существенно не отличаются от методов проектирования для дизельного двигателя. Отличием являются более высокие температуры выхлопных газов ($\sim 800^\circ\text{C}$) и применение других термоэлектрических материалов, подходящих для работы при более высоких температурах.

В такой модели есть две величины, которые подлежат оптимизации – температура горячей стороны ТЭГ и электрическая мощность, расходуемая на работу системы охлаждения.

Пример расчетов параметров ТЭГ для бензинового двигателя

Для примера рассчитаем основные параметры ТЭГ для серийного бензинового двигателя УМС-3318 мощностью 70 кВт в непрерывном режиме работы. При этих условиях температура выхлопных газов составляет около 790°C .

Для такого ТЭГ были выбраны материалы *n-PbTe* и *p-TAGS*, которые являются одними из лучших по добротности в рабочем диапазоне температур. Величина *ZT* модуля из такой пары приведена на рис. 2 [8]. Необходимые для расчетов характеристики воздушно-жидкостного теплообменника взяты из работы [6].

Оптимизация горячей температуры ТЭГ. Сначала была проведена оптимизация по КПД горячей температуры ТЭГ, которая при постоянной тепловой мощности выхлопных газов зависит от теплового сопротивления ТЭГ. На рис. 3 приведен результат такой оптимизации. Видно, что оптимальные температуры изменяются незначительно. Это позволяет без существенных потерь величины КПД использовать в термогенераторе одно усредненное термическое сопротивление термобатареи.

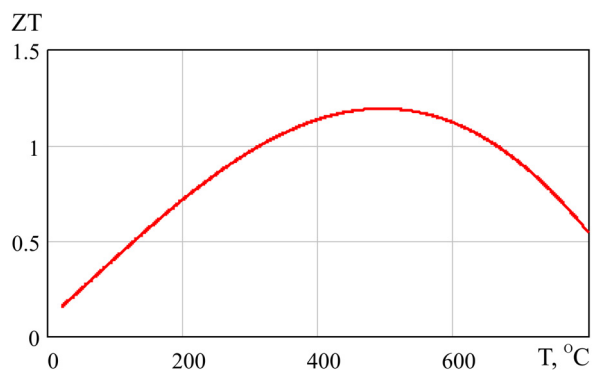


Рис. 2. Температурная зависимость *ZT* модуля из материалов на основе *n-PbTe* и *p-TAGS*.

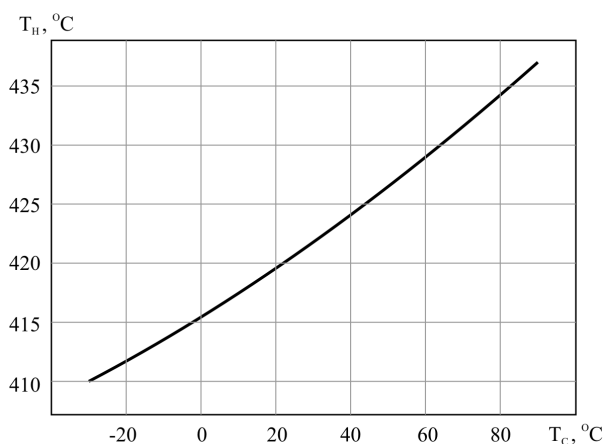


Рис. 3. Зависимость оптимальной горячей температуры ТЭГ от его холодной температуры.

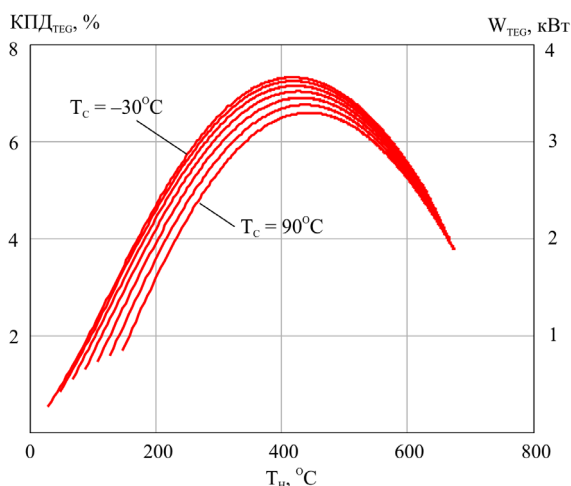


Рис. 4. Зависимость КПД и электрической мощности ТЭГ от температуры его горячей стороны. T_c изменяется от -30°C до $+90^{\circ}\text{C}$.

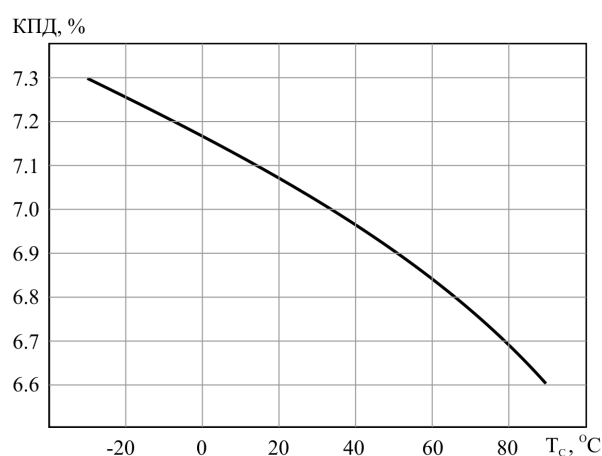


Рис. 5. Зависимость КПД ТЭГ от его холодной температуры.

На рис. 4 приведены значения КПД и электрической мощности ТЭГ в зависимости от горячей температуры при различной холодной температуре ТЭГ. Видно, что при снижении холодной температуры максимум КПД и мощности смещается в сторону более низких температур, как на рис. 3, а значение КПД при этом несколько возрастает (рис. 5) из-за комбинированного воздействия термодинамического КПД и температурной зависимости ZT модулей.

Расчеты экстремальных КПД и мощности ТЭГ с учетом того, что часть его электрической энергии расходуется на обеспечение работы системы теплоотвода, проводились при помощи компьютерного моделирования согласно уравнениям (1-4).

На рис. 6 приведен результат оптимизации системы «ТЭГ-система охлаждения» для различных температур окружающей среды.

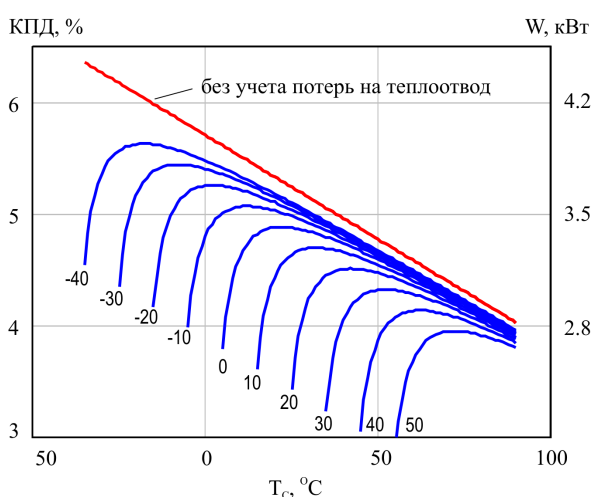


Рис. 6. Зависимости эффективных КПД и электрической мощности ТЭГ от температуры холодной стороны ТЭГ (T_c графиков указана температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$).

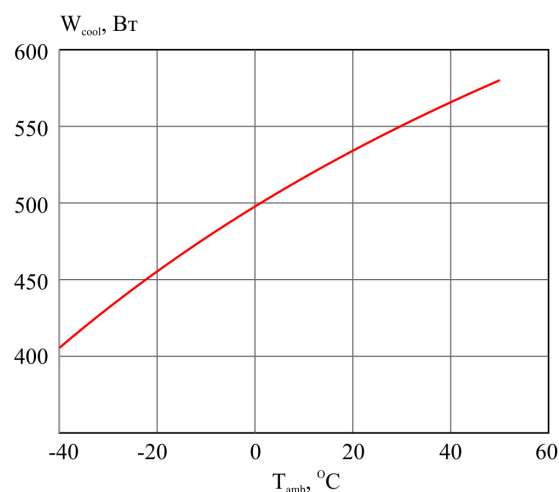


Рис. 7. Зависимость оптимальной электрической мощности питания системы охлаждения от температуры окружающей среды.

Из графиков видно наличие ярко выраженных оптимальных режимов работы системы охлаждения ТЭГ. Величины оптимальных мощностей вентилятора системы охлаждения приведены на рис. 7. Они составляют $\sim 10\% \dots 20\%$ от мощности термогенератора.

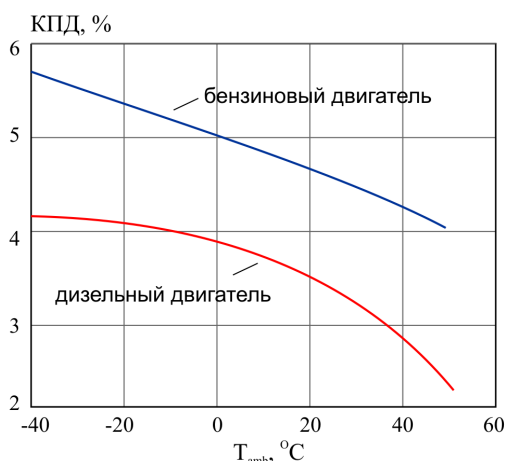


Рис. 8. Зависимость КПД ТЭГ для различных типов двигателей от температуры окружающей среды.

На рис. 8 сопоставлены КПД ТЭГ с системой отвода тепла для дизельного [6] и бензинового двигателей. Как видно, применение ТЭГ с бензиновым двигателем дает лучшие показатели: КПД меньше зависит от температуры окружающей среды, он может обеспечить в ~1.3-1.5 раза больший КПД и электрическую мощность, и, соответственно, экономию топлива около 4 – 6.5%.

Выводы

1. Из компьютерного моделирования установлена существенная зависимость эффективности применения ТЭГ в автомобиле с бензиновым двигателем от затрат электрической мощности генератора на отвод тепла от него.

2. Установлено также, что экстремальные значения КПД и мощности достигаются при оптимизации ТЭГ по горячей температуре и по электрической мощности, расходуемой для питания вентилятора в системе отвода тепла от термогенератора.

3. Компьютерное моделирование ТЭГ с системой отвода тепла для бензинового двигателя мощностью 70 кВт, температурах окружающей среды $-40...+50^{\circ}\text{C}$ и применении в батареях ТЭГ материалов на основе PbTe и TAGS дало следующие результаты: оптимальные горячие температуры генератора $410-435^{\circ}\text{C}$; КПД генератора с учетом затрат на теплоотвод 4-6.5%; электрическую мощность 2.8-4.5 кВт; затраты на отвод тепла 400-550 Вт; улучшение КПД и мощности генератора для бензинового двигателя по сравнению с дизельным в 1.3-1.5 раза; ожидаемую экономию топлива 4-6.5%.

Литература

1. Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Эффективность термоэлектрических рекуператоров тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания // Термоэлектричество. – 2011. – №4. – С. 80-85.
2. Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя // Термоэлектричество. – 2012, – №2, – С. 97-104.
3. Min G., Rowe D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – P. 528-534.
4. Sacr K.M., Mansour M.K., Mussa M.N. Thermal design of automobile exhaust based on thermoelectric generators: Objectives and challenges // Thermoelectricity. – 2008. – № 1. – p. 64-73.
5. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles. – 2008. – Vol. 6, № 2. – P. 1119-1124.
6. Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля // Термоэлектричество. – 2014. – №2. – С. 61-69.
7. PTC Mathcad – Engineering Calculations Software. www.ptc.com.
8. Anatychuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Поступила в редакцию 15.06.2014