

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 СЕКЦИОННОГО
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ
С БЕНЗИНОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

В работе рассмотрена физическая модель секционного термогенератора (ТЭГ) для бензинового двигателя с системой отвода тепла от ТЭГ, содержащей воздушно-жидкостный теплообменник и электрический вентилятор. Осуществлено моделирование работы ТЭГ для бензинового двигателя мощностью 70 кВт. Найдены оптимальные горячие температуры секций генератора и оптимальные мощности вентилятора, при которых достигается максимальный реальный КПД ТЭГ с учетом затрат на питание вентилятора при температурах окружающей среды в интервале $-40...+50^{\circ}\text{C}$. Приведено сравнение КПД секционного генератора с ранее полученными значениями для односекционного ТЭГ. Показано, что реальный КПД секционного ТЭГ с системой отвода тепла в 1.2...1.4 раза выше, чем для односекционного. Определены затраты на питание системы теплоотвода, которые могут достигать 20...30% от мощности ТЭГ.

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

The paper is concerned with a physical model of sectional 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. Computer simulation of TEG operation for a 70 kW petrol engine is performed. The optimal hot temperatures of the generator sections and the optimal fan powers whereby maximum real TEG efficiency is attained with regard to the costs of power supply to the fan for ambient temperatures in the range of $-40...+50^{\circ}\text{C}$ are found. A comparison of sectional generator efficiency to the previously obtained values for one-section TEG is made. It is shown that a real efficiency of sectional TEG with a heat removal system is 1.2...1.4 times higher than that of one-section TEG. It is shown that the costs of power supply to heat removal system can reach 20...30% of TEG power.

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

Введение

Неизменным остается интерес к использованию термоэлектрических генераторов (ТЭГ) для утилизации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Анализ материалов международных термоэлектрических конференций показывает, что постоянно возрастает количество работ, посвященных автомобильным применениям термоэлектричества [1], создаются отдельные секции, посвященные этой тематике [2]. Это указывает на неизменную актуальность данного направления исследования. Целью применения ТЭГ в автомобиле является экономия топлива за счет использования отходов тепла двигателя для генерации

электрической энергии.

Наличие термоэлектрического генератора в составе автомобиля порождает дополнительные задачи, связанные с работой ТЭГ. Одной из них является обеспечение эффективного отвода тепла от термоэлектрического генератора. Оптимизация затрат на теплоотвод от односекционного термоэлектрического генератора для автомобилей с различными типами двигателей проведено в работах [3, 4]. В работе [5] выполнена оптимизация 3-секционного ТЭГ с системой теплоотвода для дизельного двигателя. Проведенные исследования показывают, что затраты на отвод тепла от ТЭГ могут достигать 15...25% от произведенной ТЭГ электрической энергии при оптимальном проектировании системы теплоотвода. Актуальным является дальнейшее исследование с целью установления аналогичных закономерностей для секционных ТЭГ для бензиновых двигателей, поскольку как известно [4, 5], использование секционных ТЭГ для бензиновых двигателей обеспечивает большую эффективность рекуперации сбросового тепла.

Целью данной работы является оценка эффективности применения секционного ТЭГ для автомобиля с бензиновым двигателем с учетом затрат энергии на отвод тепла от ТЭГ.

1. Физическая модель

Работу секционного ТЭГ генератора в составе автомобиля можно представить схемой, изображенной на рис. 1. Выхлопной газ с тепловой мощностью Q_{in} и температурой T_{in} из двигателя 1 поступает в горячий теплообменник 3 секционного термоэлектрического генератора 2. От горячего теплообменника часть тепла передается термоэлектрическим батареям 4, которые превращают его в электрическую энергию. ТЭГ вырабатывает общую электрическую мощность W_{TEG} при КПД η_{TEG} . Часть W_{cool} этой электрической мощности расходуется на работу системы охлаждения 6, которая отводит от холодного теплообменника 5 тепловую мощность Q_{TEG} . Температура холодного теплообменника полагается постоянной.

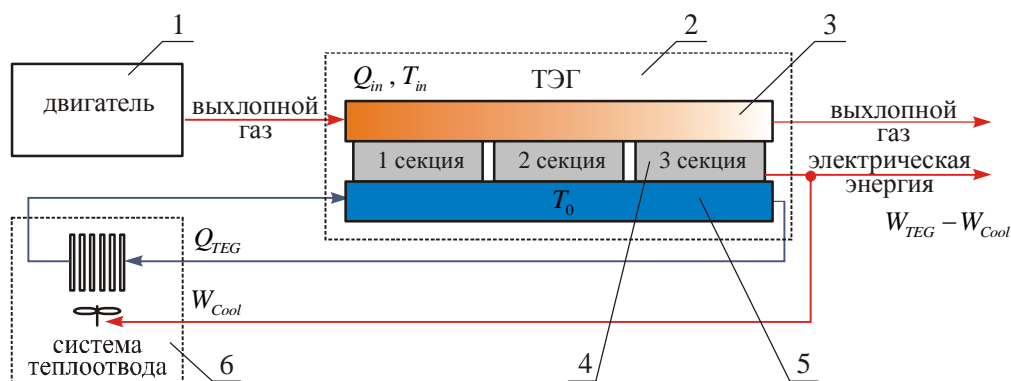


Рис. 1. Модель работы ТЭГ в составе автомобиля с учетом затрат электрической энергии на отвод тепла от термогенератора.

1 – двигатель; 2 – секционный ТЭГ; 3 – горячий теплообменник; 4 – термоэлектрические батареи; 5 – холодный теплообменник, 6 – система теплоотвода.

Детально такая физическая модель и ее математическое описание рассмотрены в [5]. Отличием модели в данной работе является то, что температура выхлопных газов у бензиновых двигателей более высокая (~800 °С). Это приводит к необходимости использования в секциях ТЭГ различных термоэлектрических материалов, оптимизированных на нужный интервал температур.

Как и раньше, расчет максимальной эффективности секционного термоэлектрического генератора проводился по методике [5] путем компьютерного моделирования [6] на двумерной сетке конечных элементов. Кратко она описывается так. Сначала проводится оптимизация горячих температур секций вариацией тепловых сопротивлений секций для достижения максимального КПД ТЭГ:

$$\eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_H^{in}}. \quad (1)$$

Для оптимизации системы теплоотвода вводится функция эффективности воздушно-жидкостного теплообменника

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_L, T_A), \quad (2)$$

где Q_{cool} – тепловая мощность системы теплоотвода, W_{cool} – электрическая мощность питания системы теплоотвода, T_L – температура жидкости, T_A – температура воздуха. С помощью этой функции рассчитывается оптимальная мощность питания системы теплоотвода.

Эффективный КПД ТЭГ находится из выражения:

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (3)$$

2. Пример расчетов параметров ТЭГ с системой охлаждения

Для примера проведем оптимизацию секционного ТЭГ с системой охлаждения для серийного бензинового двигателя УМС-3318 мощностью 70 кВт с температурой выхлопных газов $\sim 790^\circ\text{C}$. Для расчетов КПД и мощности такого ТЭГ были выбраны термоэлектрические материалы $n\text{-PbTe}$ и $p\text{-TAGS}$, являющиеся одними из лучших по добротности в высокотемпературном диапазоне. Для секций, работающих при низких температурах, выбраны материалы на основе Bi-Te . [7]. Величины ZT модулей из таких материалов приведены на рис. 2 [7].

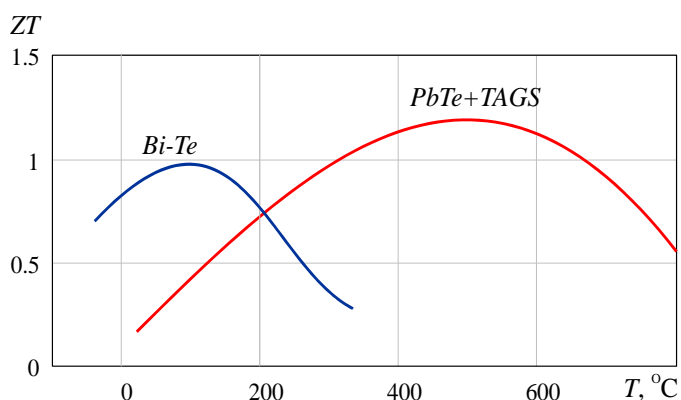


Рис. 2. Температурная зависимость ZT модулей из материалов на основе Bi-Te и $\text{PbTe} + \text{TAGS}$.

Оптимизация горячей температуры ТЭГ. Вначале проводился расчет и оптимизация горячих температур секций ТЭГ по методике [5]. На рис. 3 показан пример рассчитанного путем компьютерного моделирования двухмерного температурного поля в секциях ТЭГ. На рис. 4-5 приведены значения оптимальных горячих температур и КПД секций в зависимости от их холодной температуры.

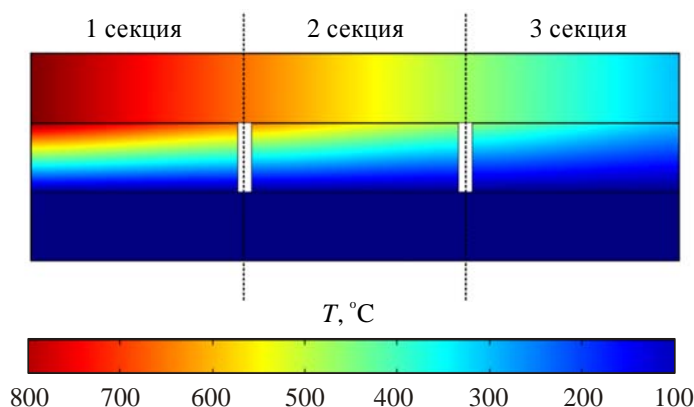


Рис. 3. Распределение температуры в секциях ТЭГ.

Как видно из рис. 4, оптимальная горячая температура третьей секции не поднимается выше 280°C. Поэтому для этой секции целесообразнее использовать батареи из материалов на основе *Bi-Te* (рис. 2). Температуры первых двух секций достаточно высоки для использования в них термобатарей из материалов *n-PbTe* и *p-TAGS*. Дальнейшие расчеты выполнены именно для такой модели.

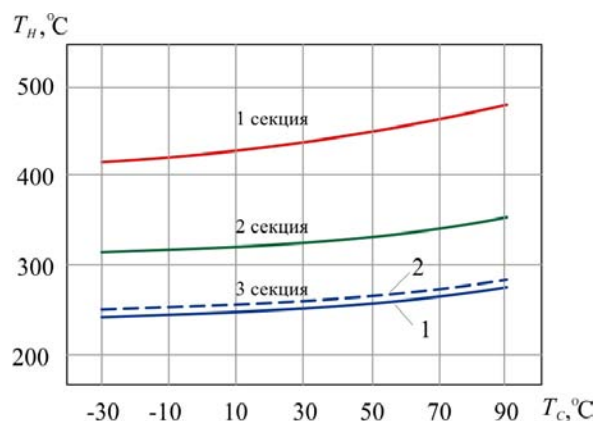


Рис. 4. Зависимость оптимальной горячей температуры секций ТЭГ от их холодной температуры: 1 – для модулей из *Bi-Te*, 2 – для модулей из *n-PbTe* и *p-TAGS*.

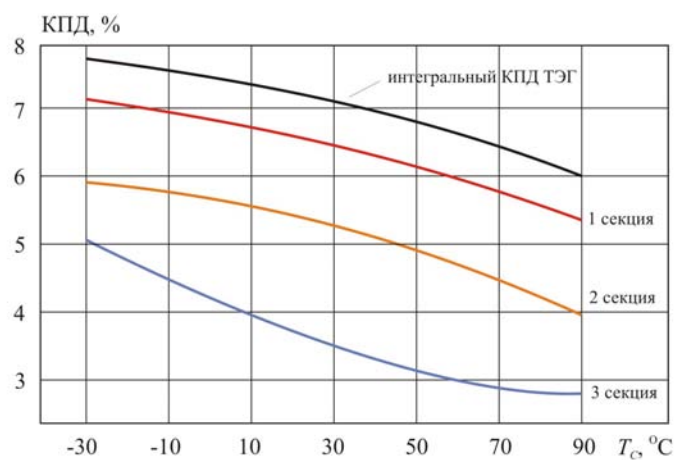


Рис. 5. Зависимость КПД секций и интегрального КПД ТЭГ от температуры холодной стороны ТЭГ.

Оптимизация системы теплоотвода. Расчеты оптимальных затрат на отвод тепла от секций ТЭГ проводился по методике [3, 4]. Необходимые для расчетов характеристики теплообменника взяты из работы [3]. На рис. 6 приведена величина тепловой мощности, которую необходимо отводить от ТЭГ, в зависимости от холодной температуры ТЭГ.

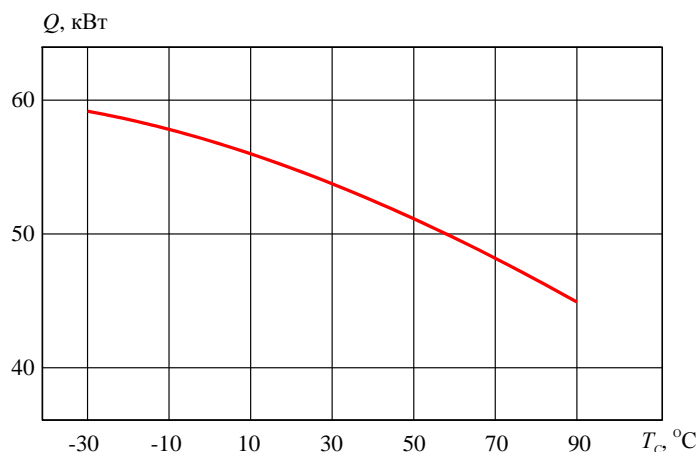


Рис. 6. Зависимость тепловой мощности, которую нужно отводить от ТЭГ, от холодной температуры ТЭГ.

На рис. 7 приведены результаты оптимизации системы «ТЭГ-система охлаждения» для различных температур окружающей среды. Здесь представлены величины оптимальных мощностей вентилятора системы охлаждения. Они составляют ~20%...30% от мощности термогенератора. На рис. 8 показана зависимость электрической мощности ТЭГ с учетом затрат на теплоотвод.

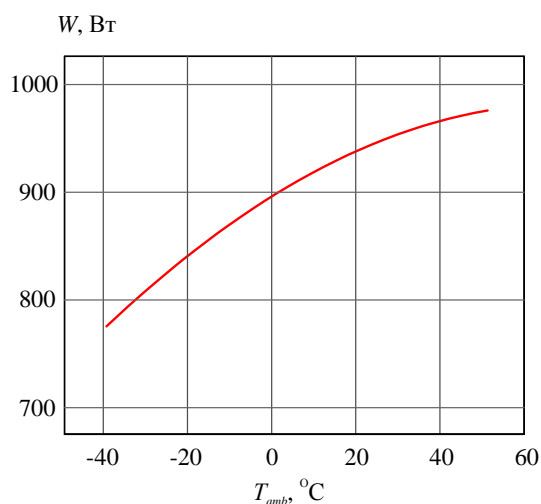


Рис. 7. Зависимость оптимальной электрической мощности системы охлаждения ТЭГ от температуры окружающей среды.

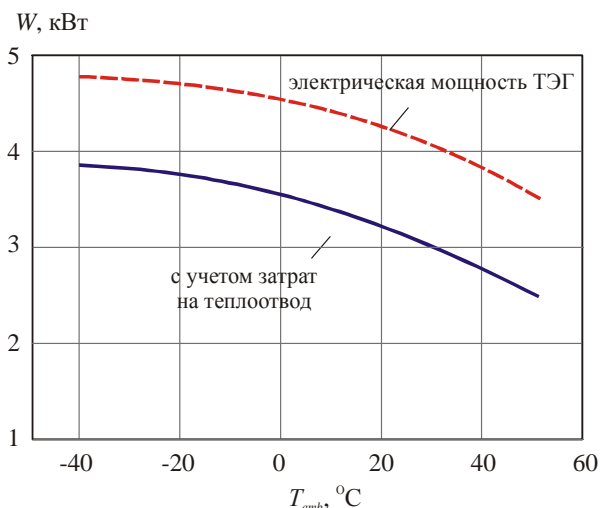


Рис. 8. Зависимость электрической мощности ТЭГ от температуры окружающей среды.

На рис. 9 приведено сравнение КПД односекционного ТЭГ [5] и трехсекционного ТЭГ, проанализированного в данной работе, а также ТЭГ для дизельного двигателя, рассмотренные в работах [3, 5].

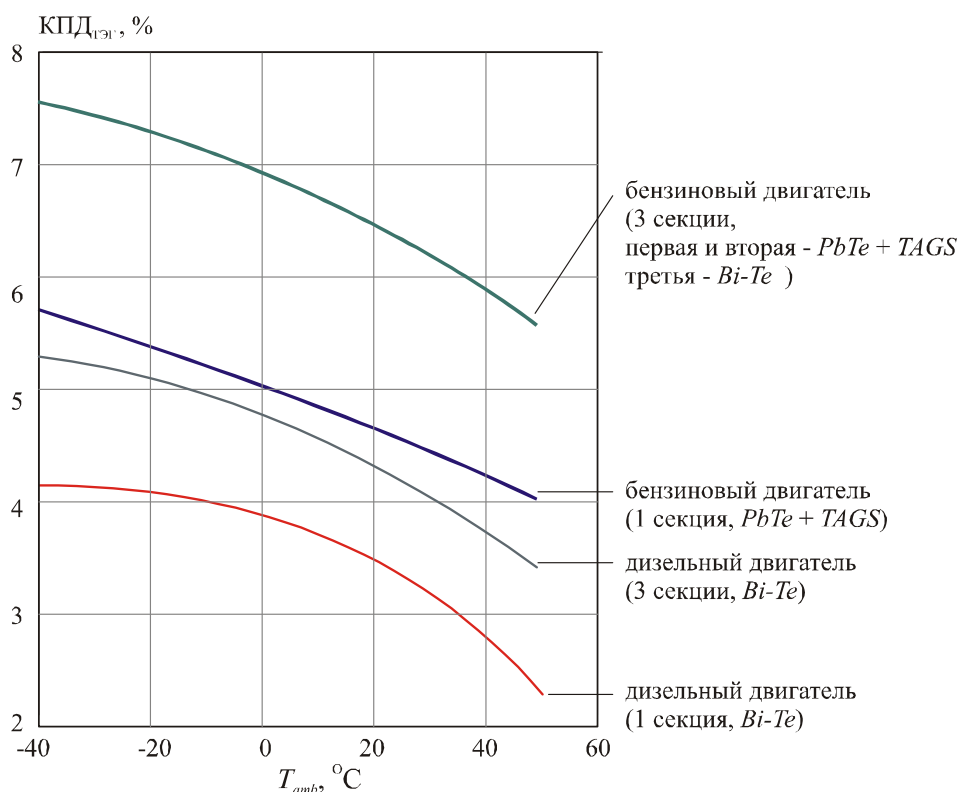


Рис. 9. Зависимость КПД ТЭГ от температуры окружающей среды.

Видно, что использование секций в генераторе при равных условиях других дает лучшие показатели по КПД. Использование секций позволяет в 1.2 – 1.3 раза повысить эффективность ТЭГ. По сравнению с ТЭГ для дизельного двигателя, ТЭГ для бензинового двигателя дает лучшие показатели как по КПД, так и по его стабильности в зависимости от температуры окружающей среды.

Выводы

1. С помощью компьютерного моделирования проанализирована физическая модель трехсекционного термоэлектрического генератора для автомобиля с бензиновым двигателем. Эффективность компьютерного моделирования продемонстрирована на конкретном варианте генератора для автомобиля с бензиновым двигателем мощностью 70 кВт.
2. Получены оптимальные горячие температуры секций в зависимости от холодной температуры ТЭГ в интервале $-30...+90$ °С. Установлено, что при повышении холодной температуры ТЭГ оптимальные горячие температуры также смещаются в область более высоких значений.
3. Осуществлена оптимизация системы теплоотвода. Найдены оптимальные затраты электрической энергии на отвод тепла. Установлено, что эти затраты возрастают от 770 Вт до 940 Вт при повышении температуры окружающей среды от -40 °С до $+50$ °С.
4. Определена мощность ТЭГ в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что самое высокое значение мощности (~ 4.7 кВт) достигается при $T_{amb} = -40$ °С и уменьшается до 3.5 кВт при $T_{amb} = +50$ °С. Часть этой энергии расходуется на обеспечение отвода тепла от ТЭГ. С учетом этих затрат мощность генератора при $T_{amb} = -40$ °С составляет 3.8 кВт и уменьшается до 2.6 кВт при $T_{amb} = +50$ °С.
5. Сравнение КПД односекционного генератора с трехсекционным демонстрирует рост КПД при

использовании 3-х секций от 5.8% до 7.5% при $T_{amb} = -40$ °С. КПД трехсекционного генератора остается выше и при более высоких температурах окружающей среды. При $T_{amb} = +50$ °С КПД трехсекционного ТЭГ составляет 5.63%, в то время как КПД односекционного ТЭГ – всего 4%. В целом проведенные исследования свидетельствуют о преимуществах трехсекционного ТЭГ по электрической мощности и КПД в 1.2...1.4 раза.

6. Система теплоотвода от 3-секционного ТЭГ потребляет значительное количество электрической энергии. Эти затраты могут составлять 20...30% от общей мощности ТЭГ.
7. В интервале температур окружающей среды $-40...+60$ °С КПД ТЭГ для бензинового двигателя снижается на ~14%. В то же время КПД ТЭГ для дизельного двигателя снижается на 45%. Это свидетельствует о целесообразности использования ТЭГ для дизельных двигателей только при пониженных температурах окружающей среды. Поскольку КПД ТЭГ для бензинового двигателя менее зависит от температуры окружающей среды, то его можно использовать в широком диапазоне указанных температур.

Литература

1. <http://web.ornl.gov/sci/theory/ict2014/schedule.pdf>.
2. http://ectmadrid2014.com/wp-content/uploads/EC2014_Schedule.pdf.
3. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество, 2014. – №2. – С. 61-69.
4. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора бензинового автомобиля / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество, 2014. – №3. – С. 91-95.
5. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного термоэлектрического генератора для автомобиля с дизельным двигателем / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество, 2014. – №4. – С. 84-91.
6. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
7. Anatyчук L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Поступила в редакцию 17.10.2014.