

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 ДИЗЕЛЬНЫМ
ДВИГАТЕЛЕМ**

В работе рассмотрена физическая модель секционного термогенератора (ТЭГ) для дизельного двигателя с системой отвода тепла от ТЭГ, содержащего воздушно-жидкостный теплообменник и электрический вентилятор. Приведено математическое описание модели. Разработана компьютерная модель секционного ТЭГ. Осуществлено моделирование для дизельного двигателя мощностью 75 кВт. Найдены оптимальные горячие температуры секций генератора и оптимальные мощности вентилятора, при которых достигается максимальная полезная мощность и, соответственно, максимальный реальный КПД ТЭГ с учетом расходов 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.

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

The paper is concerned with a physical model of sectional thermoelectric generator (TEG) for a diesel engine with a system of heat removal from TEG comprising an air-to-liquid heat exchanger and an electric fan. A mathematical description of the model is presented. A computer model of sectional TEG is developed. Computer simulation for a 75 kW diesel engine is performed. The optimal hot temperatures of the generator sections and the optimal fan powers 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 $-40...+50^{\circ}\text{C}$ 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.

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

Введение

Использование отходов тепла от двигателей внутреннего сгорания – актуальное практическое применение термоэлектричества. Его целью является экономия топлива за счет использования отходов тепла двигателя для генерации электрической энергии [1, 2]. Известно, что наличие термоэлектрического генератора в составе автомобиля существенно влияет на его работу. Одним из отрицательных факторов, который снижает эффективность ТЭГ, являются затраты, связанные с необходимостью отвода тепла от термоэлектрического генератора.

Детальная оценка затрат на теплоотвод от односекционного термоэлектрического генератора для автомобилей с разными типами двигателей приведена в работах [3, 4]. Показано, что затраты на отвод тепла от односекционного ТЭГ теплообменниками с электровентиляторами могут достигать 15-25% от произведенной ТЭГ электрической энергии. Также установлено, что эффективность теплоотвода от ТЭГ для автомобиля имеет оптимальные значения, зависящие от мощности питания системы теплоотвода и температуры окружающего воздуха. Актуальным является дальнейшее исследование с целью установления аналогичных закономерностей для секционных ТЭГ, поскольку использование секционных ТЭГ обеспечивает большую эффективность рекуперации сбросового тепла [1, 2].

Цель данной работы – создать методику компьютерного моделирования секционного термоэлектрического генератора для автомобиля с дизельным двигателем и жидкостно-воздушным охлаждением, а также проверить эффективность метода для конкретного случая двигателя и термогенератора.

Физическая модель секционного термоэлектрического генератора для автомобиля

Физическая модель автомобиля с односекционным ТЭГ, где учтено обеспечение теплоотвода от ТЭГ, и ее математическое описание детально рассмотрены в [3]. Отличием модели в данной работе является то, что ТЭГ содержит 3 секции. Как показано в [6], секционирование позволяет повысить эффективность ТЭГ, однако использование большего количества секций не рационально. Поэтому остановимся детальнее на модели ТЭГ.

Расчет максимальной эффективности секционного термоэлектрического генератора проводился по методике [1, 7]. Рассмотрим ТЭГ, который состоит из 3-х секций, соединенных последовательно относительно потока горячего газа и холодного теплоносителя (рис. 1).

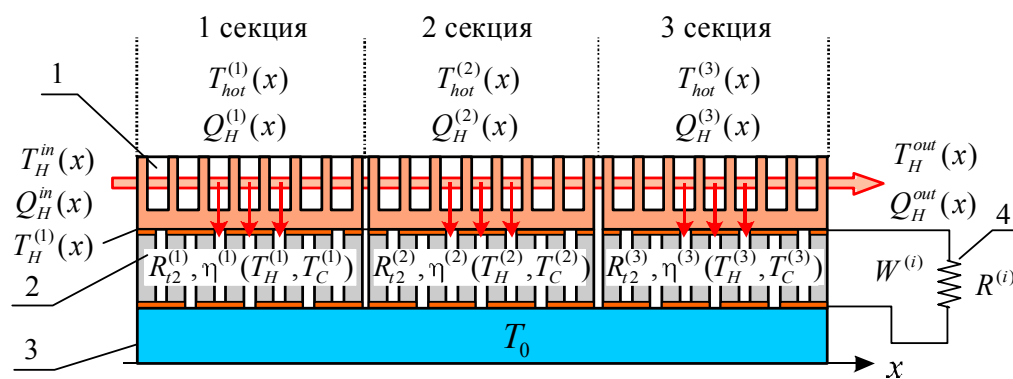


Рис. 1. Физическая модель секционного термоэлектрического генератора:

1 – горячий теплообменник; 2 – термоэлектрические батареи; 3 – холодный теплообменник;
4 – согласованная электрическая нагрузка секции.

Каждая секция ТЭГ состоит из горячего теплообменника (1), термоэлектрической батареи (2) с тепловым сопротивлением $R_{t2}^{(i)}$ и коэффициентом полезного действия $\eta(T_H, T_0)$; холодного теплообменника (3) с температурой T_0 . Термоэлектрические батареи каждой из секций нагружены на согласованную электрическую нагрузку $R^{(i)}$ (4). Температура входного потока горячего газа T_H^{in} и тепловая мощность Q_H^{in} . Горячий газ отдает часть тепла $Q_H^{(i)}(x)$ при температуре $T_{hot}^{(i)}(x)$ горячему теплообменнику. На выходе ТЭГ поток газа имеет температуру

T_H^{out} и тепловую мощность Q_H^{out} . Из горячего теплообменника тепло передается термоэлектрической батарее, нагревая ее горячую сторону до температуры $T_H^{(i)}(x)$. Холодная сторона термоэлектрических батарей поддерживается при температуре T_0 . Для расчетов максимально возможной мощности ТЭГ будем пренебрегать тепловыми потерями.

Математическое и компьютерное описание модели

Для оптимизации термоэлектрического генератора необходимо найти распределения температур и тепловых потоков в термоэлектрических батареях каждой из секций. Такие расчеты для представленной модели возможны только с применением компьютерного моделирования.

Рассмотрим одну из секций генератора и условно разделим ее на три области $\Omega_1 - \Omega_3$ с пределами $g_1 - g_{10}$ (рис. 2). Область Ω_1 представляет горячий теплообменник с теплоносителем, область Ω_2 – термоэлектрическую батарею, область Ω_3 – горячий и холодный теплообменники.

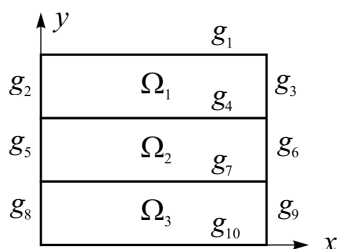


Рис. 2. Компьютерное представление областей и границ секций ТЭГ.

В области Ω_1 имеет место массоперенос горячего теплоносителя. Уравнение теплопроводности для этой области имеет вид:

$$-\nabla(\kappa_H(T)\nabla T) = -\rho_H(T)C_H(T)\bar{v}\nabla T, \quad (1)$$

где ρ_H – плотность, C_H – теплоемкость, κ_H – теплопроводность газа, v_H – скорость движения газа. Граничные условия для области Ω_1 учитывают непрерывность потока газа в пределах секции и между секциями, поток тепла через теплообменники.

В области Ω_2 (термоэлектрической батарее) выделяется тепло Джоуля. Для области Ω_2 уравнение теплопроводности имеет вид:

$$-\nabla(\kappa_{TE}(T)\nabla T) = Q_J, \quad (2)$$

где κ_{TE} – эффективная теплопроводность термоэлектрической батареи, Q_J – удельная мощность тепла Джоуля, выделяющегося в термоэлектрической батарее.

Граничные условия для области Ω_2 учитывают взаимодействие термобатареи с теплообменниками.

Область Ω_3 в данной модели ТЭГ считается термостатированной с температурой T_0 .

Совокупность граничных условий математически выражается следующим образом:

$$g_1: \quad q_1^{(i)}(x) = 0, \quad (3)$$

$$g_2, g_3: \quad Q_H^{in(1)} = Q_H^in, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (4)$$

$$g_4: \quad Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t1}^{(i)} \quad (5)$$

$$g_5, g_6: \quad q_4^{(i)}(y) = 0, \quad (6)$$

$$g_7: \quad Q_C^{(i)}(x) = (T_C^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}^{(i)}, \quad (7)$$

$$T(x) = T_0,$$

$$\Omega_3, g_8, g_9, g_{10}: \quad T(x, y) = T_0. \quad (8)$$

Совокупность уравнений (1)-(2) с граничными условиями (3-8) позволяют найти поле температур $T(x, y)$ в ТЭГ и определить распределение температур $T_H^{(i)}(x)$ по горячим сторонам термоэлектрических батарей секций.

Тогда мощность каждой секции можно определять из следующего выражения:

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_C^{(i)}(x)) dx. \quad (9)$$

Общая мощность генератора

$$W_{TEG} = W^{(1)} + W^{(2)} + W^{(3)}. \quad (10)$$

КПД термоэлектрического генератора

$$\eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_H^{in}}. \quad (11)$$

Для расчетов электрической мощности ТЭГ с учетом обеспечения работы системы теплоотвода необходимо знать эффективность воздушно-жидкостного теплообменника

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_L, T_A), \quad (12)$$

где Q_{cool} – тепловая мощность системы теплоотвода, W_{cool} – электрическая мощность питания системы теплоотвода, T_L – температура жидкости, T_A – температура воздуха. Такая зависимость получена из экспериментальных исследований теплообменника [3].

Эффективный КПД ТЭГ вводится выражением:

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (13)$$

Система уравнений (1)-(2) с граничными условиями (3)-(8) решалась методом конечных элементов [6] на двумерной сетке.

Пример двумерного температурного поля в секциях ТЭГ, рассчитанного компьютерным моделированием, приведен на рис. 3.

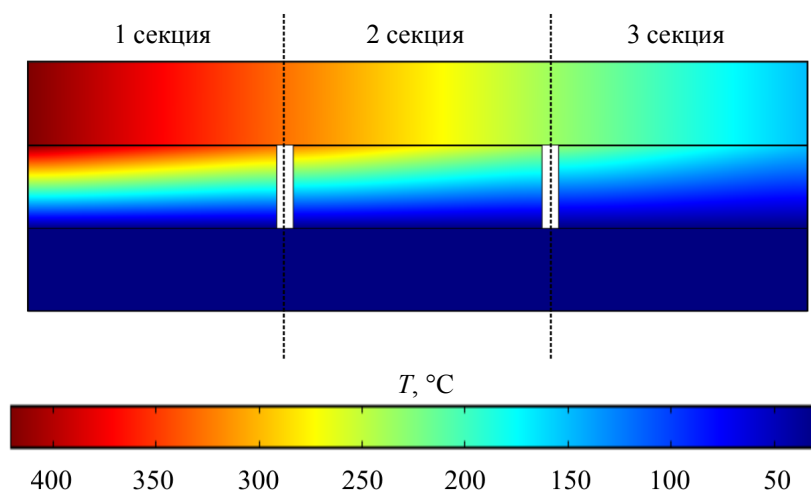


Рис. 3. Распределение температуры в секциях ТЭГ.

Дальнейшая оптимизация ТЭГ состоит в поиске оптимальных горячих температур секций путем вариаций тепловых сопротивлений секций для достижения максимального интегрального КПД ТЭГ.

Пример расчетов параметров ТЭГ

В качестве примера, рассчитаем основные параметры секционного ТЭГ для дизельного двигателя мощностью 75 кВт, с температурой выхлопных газов 420°C.

Для расчета КПД и мощности были выбраны термоэлектрические материалы на основе *Bi-Te*, являющиеся одними из лучших по добротности в рабочем диапазоне температур ТЭГ для дизельных двигателей [6]. Необходимые для расчетов характеристики воздушно-жидкостного теплообменника взяты из работы [3].

Оптимизация горячей температуры ТЭГ. Сначала проводилась оптимизация горячих температур секций ТЭГ по методике [2]. На рис. 4 приведен пример такой оптимизации для третьей секции ТЭГ. Как видно, существует оптимум по КПД ТЭГ, зависящий от температур горячей и холодной стенок секции. На рис. 5 приведены значения оптимальных температур T_H в зависимости от температуры T_C .

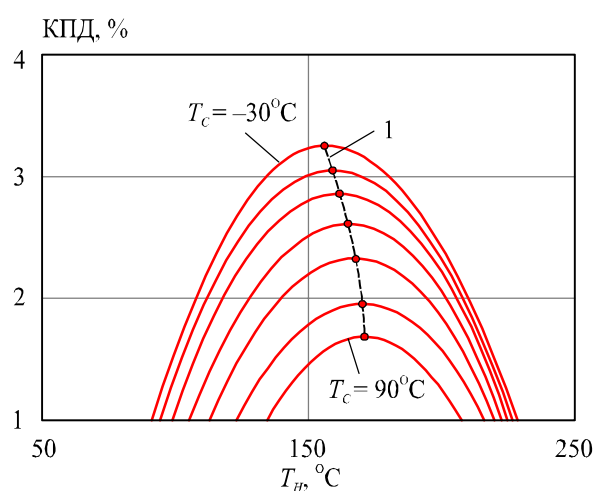


Рис. 4. Зависимость КПД 3-й секции ТЭГ от температуры горячей секции. T_C изменяется от -30 °C до +90 °C. 1 – оптимальные значения T_H .

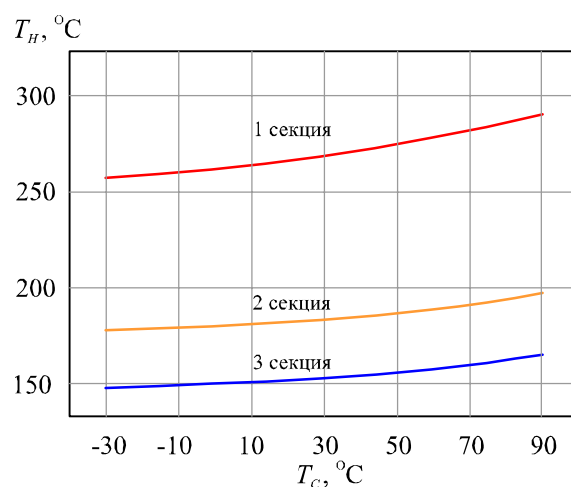


Рис. 5. Зависимость оптимальной температуры горячей секций ТЭГ от температуры их холодной стороны.

Оптимизация системы теплоотвода. Расчет оптимальных затрат на отвод тепла от секций ТЭГ проводился по методике [3, 4]. На рис. 6 приведена величина тепловой мощности, которую необходимо отводить от ТЭГ, в зависимости от холодной температуры ТЭГ.

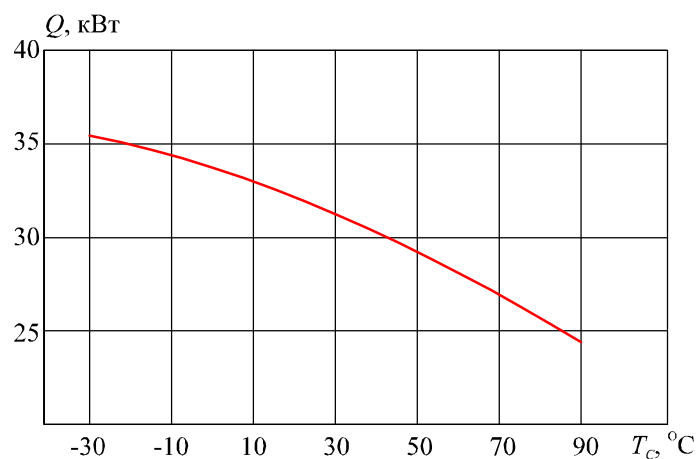


Рис. 6. Зависимость тепловой мощности, которую нужно отводить от ТЭГ, от значений температуры T_C .

На рис. 7 приведены величины КПД каждой из трех секций ТЭГ и интегрального КПД ТЭГ в зависимости от T_C .

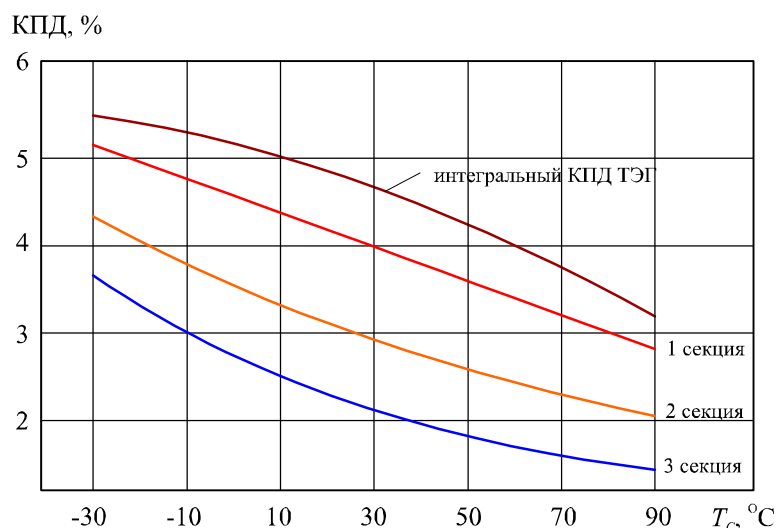


Рис. 7. Зависимость КПД секций и интегрального КПД ТЭГ от температуры T_C .

На рис. 8 приведены результаты оптимизации системы «ТЭГ-система охлаждения» для различных температур окружающей среды T_{amb} . Здесь представлены величины оптимальных мощностей вентилятора системы охлаждения. Они составляют ~14%...24% от мощности термогенератора. На рис. 9 показана зависимость электрической мощности ТЭГ с учетом затрат на теплоотвод.

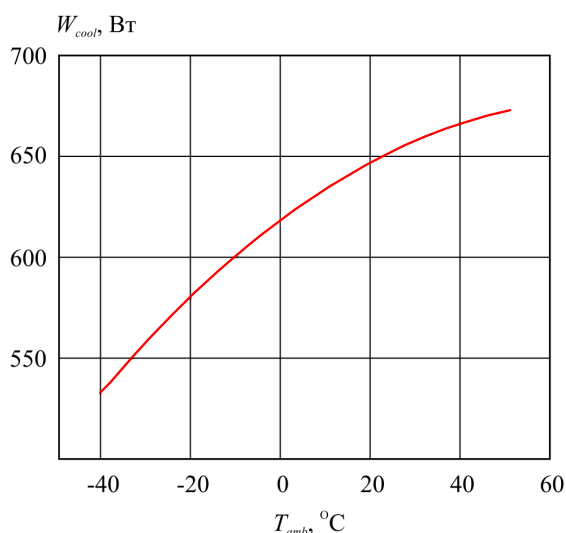


Рис. 8. Зависимость оптимальной электрической мощности системы охлаждения ТЭГ от температуры окружающей среды.

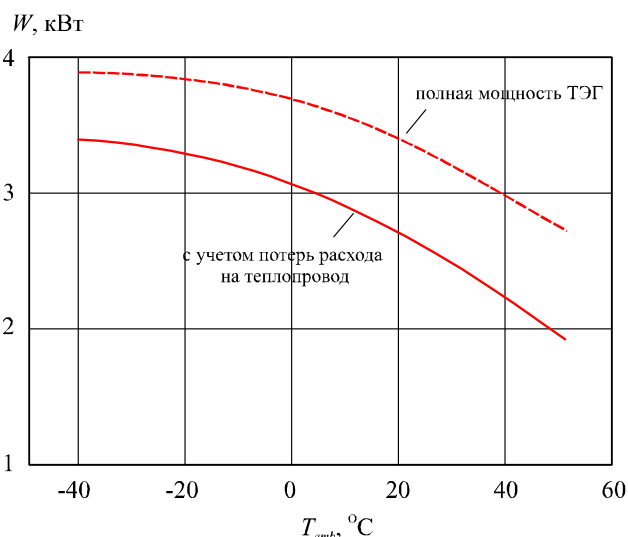


Рис. 9. Зависимость электрической мощности ТЭГ от температуры окружающей среды.

На рис. 10 приведено сравнение КПД односекционного ТЭГ [3] и трехсекционного ТЭГ, проанализированного в этой работе.

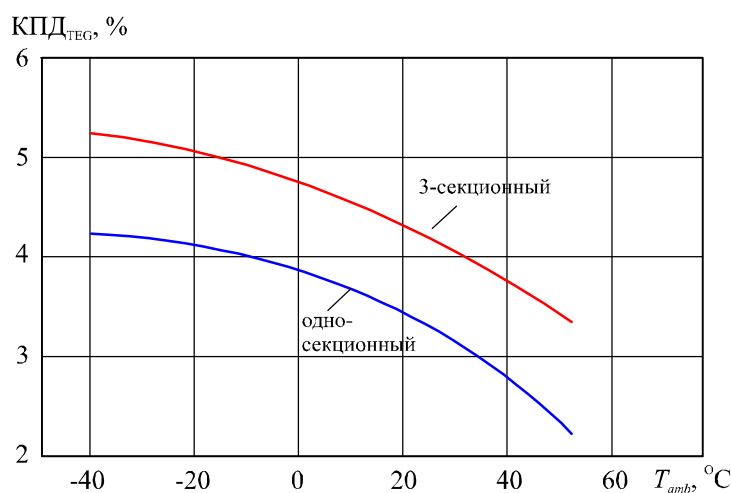


Рис. 10. Зависимость КПД ТЭГ от температуры окружающей среды.

Видно, что использование секций в генераторе при одинаковых других условиях дает лучшие показатели по КПД. Использование секций позволяет обеспечить в 1.2 – 1.4 раза большую эффективность ТЭГ. Согласно результатам работы [3], это может дать экономию топлива приблизительно на 3 – 7%.

Выводы

1. Создана физическая модель трехсекционного термоэлектрического генератора для автомобиля с дизельным двигателем. Наличие трех секций предварительно было обосновано при исследовании многосекционного генератора. Выполнено математическое описание трехсекционного генератора и разработано программное обеспечение для его исследования и оптимизации.

2. Эффективность компьютерного моделирования продемонстрирована на конкретном варианте генератора для автомобиля с дизельным двигателем мощностью 75 кВт. Получены зависимости оптимальных значений температур горячих сторон секций от температуры холодной стороны ТЭГ в интервале $-30 \dots +90^\circ\text{C}$. Установлено, что при повышении температуры холодной стороны оптимальные температуры горячей стороны также смещаются в область больших значений.

3. Выполнена оптимизация системы теплоотвода. Найдены оптимальные затраты электрической энергии на отвод тепла. Установлено, что эти затраты возрастают от 530 Вт до 670 Вт при увеличении температуры окружающей среды от -40°C до $+50^\circ\text{C}$.

4. Определена мощность ТЭГ в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что наиболее высокое значение мощности (~ 4 кВт) достигается при $T_{amb} = -40^\circ\text{C}$ и уменьшается до 2.8 кВт при $T_{amb} = +50^\circ\text{C}$. Часть этой энергии расходуется на обеспечение отвода тепла от ТЭГ. С учетом этих затрат мощность генератора при $T_{amb} = -40^\circ\text{C}$ составляет 3.2 кВт и уменьшается до 2 кВт при $T_{amb} = +50^\circ\text{C}$.

5. Найдены значения КПД секций и интегрального КПД ТЭГ в зависимости от температуры холодной стороны ТЭГ. Самые большие значения КПД получены на первой секции, к которой непосредственно подводится выхлопной газ от двигателя. КПД изменяется от $\sim 5\%$ до 3% при изменении температуры холодной стороны ТЭГ в интервале $-30 \dots +90^\circ\text{C}$. Следующая секция, к которой подводится газ, прошедший первую секцию, реализует значение КПД от 4.3% до 2%.

Третья секция, которой утилизируется тепло выхлопных газов, прошедших первую и вторую секции, дает наименьшие значения КПД в интервале 3.6...1.4%. При этом интегральный КПД самый высокий при $T_c = -30$ °С и составляет ~5.5%. Он уменьшается до 3.2% при $T_c = +90$ °С.

6. Сравнение КПД односекционного генератора с трехсекционным демонстрирует рост КПД при использовании 3-х секций от 4.2% до 5.2% при $T_{amb} = -40$ °С. КПД трехсекционного генератора остается максимальным и при более высоких температурах окружающей среды. При $T_{amb} = +50$ °С КПД трехсекционного ТЭГ составляет 3.3%, в то время как КПД односекционного ТЭГ – всего 2.2%.

7. В целом проведенные исследования демонстрируют преимущества трехсекционного ТЭГ по электрической мощности и КПД в 1.2...1.4 раза. Полученные результаты также подтверждают то обстоятельство, что ТЭГ для дизельного двигателя более эффективен при эксплуатации в условиях пониженных температур окружающей среды.

Литература

1. Анатычук Л.И. Эффективность термоэлектрических рекуператоров тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество, 2011. – №4. – С. 80-85.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество, 2012. – №2. – С. 97-104.
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. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
6. Anatyчук L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.
7. Кузь Р.В. Компьютерное моделирование термоэлектрического однокаскадного генераторного модуля / Р.В. Кузь, М.Н. Струтинский // Термоэлектричество, 2010. – №3. – С. 22-28.

Поступила в редакцию 17.10.14.