

УДК 621.391.01

Анатычук Л.И., Кузь Р.В.



Анатычук Л.И.

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



Кузь Р.В.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДИЗЕЛЬНОГО АВТОМОБИЛЯ

Создана модель автомобиля с термоэлектрическим генератором (ТЭГ) с учетом того, что ТЭГ должен обеспечить питание собственной системы теплоотвода. Приведены результаты оптимизации температуры горячей стороны ТЭГ и электрической мощности питания системы теплоотвода. Рассчитаны эффективный коэффициент полезного действия и электрическая мощность ТЭГ для дизельного двигателя мощностью 75 кВт. Показана необходимость оптимального проектирования системы теплоотвода ТЭГ.

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

A model of a car with thermoelectric generator (TEG) was created with regard to the fact that TEG must assure power supply to heat removal system of its own. The results of optimization of the hot side temperature of TEG and the electric supply power of heat removal system are given. The effective efficiency and the electric power of TEG for a 75 kW diesel engine are calculated. The necessity of optimal design of TEG heat removal system is shown.

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

Введение

Использование отходов тепла от двигателей внутреннего сгорания является одной из актуальных задач термоэлектричества [1 – 6]. Мировые производители автомобилей, а также компании, занимающиеся термоэлектричеством, уделяют много внимания разработке эффективных автомобильных термоэлектрических генераторов с целью повышения экономии топлива за счет использования отходов тепла двигателя.

В США самыми большими компаниями, ставящими перед собой задачу создания промышленных образцов генераторов и их серийного производства, являются Hi-Z [7], BSST [8] и General Motors [9]. В Японии наиболее подробно вопросами создания генераторов для автомобилей занимаются компании Komatsu [10], Nissan [11] и Shiroki [12]. В Германии свои разработки термоэлектрических автомобильных генераторов представила компания Volkswagen [13], а также совместно компании BMW и DLR (аэрокосмический центр Германии) [13]. Однако следует отметить, что в большинстве из приведенных работ не обращается внимания на то, как сам термоэлектрический генератор будет влиять на работу автомобиля. Как известно, наличие термоэлектрического генератора существенно изменяет условия его работы благодаря, как мини-

мум, трем факторам: дополнительному гидравлическому сопротивлению в выхлопной системе автомобиля, механическим затратам двигателя на транспортировку дополнительной массы самого ТЭГ и затратам, связанным с необходимостью отвода тепла от термоэлектрического генератора. В работах [4-6] детально рассматривается эффективность ТЭГ с учетом затрат на транспортировку. Показано, что для легковых автомобилей эти затраты могут превышать выигрыш от работы ТЭГ. Относительно теплоотвода, то с целью невмешательства в системы охлаждения автомобиля теплоотвод от ТЭГ должен осуществляться за счет мощности самого ТЭГ.

Целью данной работы является оценка эффективной мощности и коэффициента полезного действия термоэлектрического генератора для автомобиля с учетом обеспечения теплоотвода ТЭГ.

Физическая модель автомобиля с термоэлектрическим генератором

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

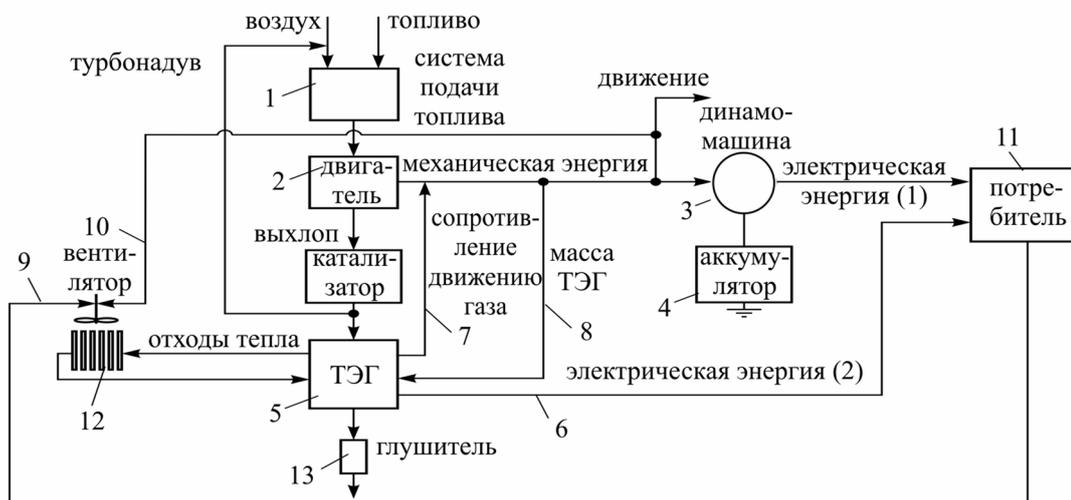


Рис. 1. Схема распределения энергии в автомобиле с ТЭГ.

Система подачи топлива 1 подает в двигатель 2 топливную смесь, сгорание которой обеспечивает механическую мощность двигателя P . Эта мощность тратится на приведение в движение самого автомобиля P_A и на работу динамомашин 3, которая вырабатывает электрическую мощность W_D при КПД η_D . Электрическая мощность тратится на работу всех электропотребителей автомобиля 11 и на зарядку аккумуляторной батареи 4.

При наличии термоэлектрического генератора 5 дополнительной выгодой будет произведенная им электрическая мощность W_{TEG} 6. Дополнительными затратами будут: механическая мощность P_{gas} 7, связанная с увеличением давления в выхлопной системе; механическая мощность P_m 8, связанная с увеличением массы автомобиля благодаря наличию ТЭГ; электрическая 9 (или механическая 10) мощность P_c , необходимая для обеспечения работы системы охлаждения ТЭГ.

Таким образом, баланс энергии в автомобиле без ТЭГ имеет вид:

$$P = P_A + W_D / \eta_D. \quad (1)$$

Баланс энергии в автомобиле с термоэлектрическим генератором будет иметь вид

$$P + W_{TEG} / \eta_{TEG} = P_A + W_D / \eta_D + P_c + P_m + P_{gas}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{ТЕГ}}$ – КПД термоэлектрического генератора, P_c – механическая мощность, расходуемая на обеспечение работы системы охлаждения ТЭГ, P_m – механическая мощность, расходуемая на транспортировку ТЭГ, P_{gas} – механическая мощность, расходуемая на преодоление дополнительного давления в выхлопной системе, связанного с наличием ТЭГ.

Рассмотрим упрощенную модель автомобиля, учитывающую обеспечение теплоотвода от ТЭГ (рис. 2).

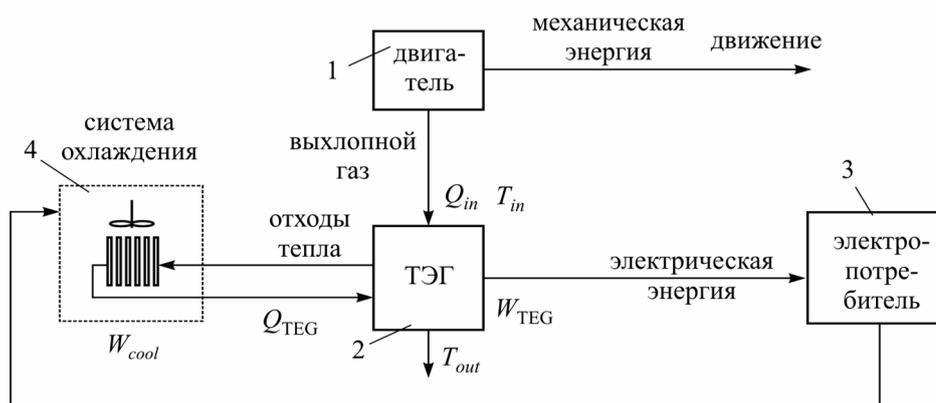


Рис. 2. Упрощенная модель автомобиля с ТЭГ.

Выхлопной газ с тепловой мощностью 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 генерирует электрическую энергию $W_{\text{ТЕГ}}$ при КПД $\eta_{\text{ТЕГ}}$. Рассматривается случай, когда часть этой электрической энергии W_{cool} расходуется на работу системы охлаждения 4, которая отводит от ТЭГ тепловую мощность $Q_{\text{ТЕГ}}$. Температура окружающей среды T_{amb} . При такой постановке задачи две величины должны быть прооптимизированы – температура горячей стороны ТЭГ и мощность, расходуемая на работу системы охлаждения.

В модели рассматривается односекционный ТЭГ и пренебрегается влиянием других систем автомобиля на работу двигателя.

Математическое описание работы термоэлектрического генератора

Уравнение для нахождения оптимальной температуры горячей стороны ТЭГ найдем из баланса тепла в ТЭГ

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{\text{ТЕГ}}, \quad (3)$$

$$Q_{in} = cm(T_{in} - T_{amb}), \quad (4)$$

$$Q_{out} = cm(T_{out} - T_{amb}), \quad (5)$$

$$Q_{\text{ТЕГ}} = \frac{T_{out} - T_0}{R_t}, \quad (6)$$

где c – удельная теплоемкость выхлопного газа, m – массовый расход выхлопного газа, а T_0 – температура холодной стороны ТЭГ.

Подставив (4) – (6) в (3), получим уравнение для нахождения температуры на выходе из ТЭГ:

$$T_{out}(R_t) = \frac{Q_{in} \left(1 + \frac{T_{amb}}{T_{in} - T_{amb}} \right) + \frac{T_0}{R_t}}{\frac{1}{R_t} + \frac{Q_{in}}{T_{in} - T_{amb}}} \quad (7)$$

КПД ТЭГ будем рассчитывать по формуле

$$\eta_{TEG}(R_t) = \frac{T_{out} - T_0}{T_{out}} \frac{M - 1}{M + T_0 / T_{out}}, \quad (8)$$

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{(T_{out} + T_0)}{2}}, \quad (9)$$

а эффективный КПД –

$$\eta_{ef} = \frac{W_{TEG} - W_{cool}}{Q_{TEG}} \quad (10)$$

Температурную зависимость добротности Z в формуле (9) учитывали путем использования ее среднего интегрального значения в температурном диапазоне (T_0, T_{out}) .

Для расчетов электрической мощности ТЭГ с учетом обеспечения работы системы теплоотвода необходимо знать эффективность воздушно-жидкостного теплообменника, получаемую из экспериментальных исследований теплообменника:

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_H, T_C), \quad (11)$$

где Q_{cool} – тепловая мощность системы теплоотвода, W_{cool} – электрическая мощность питания системы теплоотвода, T_H – температура жидкости, T_C – температура воздуха.

Оптимизационный алгоритм реализован в системе математического моделирования Mathcad [14].

Пример расчетов параметров ТЭГ

Для примера рассчитаем основные параметры ТЭГ для дизельного двигателя мощностью 75 кВт в непрерывном режиме работы при скорости автомобиля 100 км/ч. При таком режиме температура выхлопных газов составляет около 420 °С.

Термоэлектрические материалы. Для расчетов КПД и мощности ТЭГ была использована типичная температурная зависимость ZT [15] материалов на основе *Bi-Te* (рис. 3).

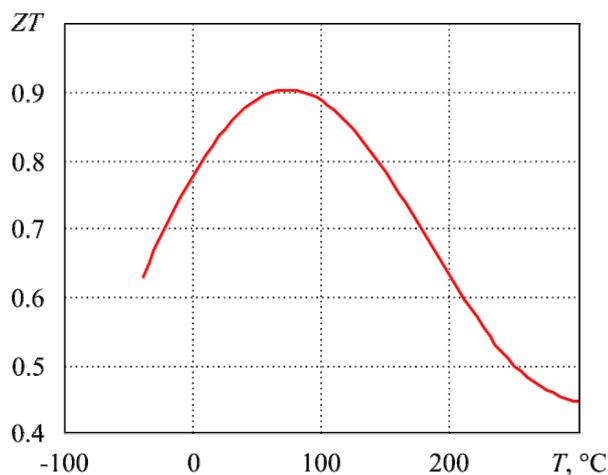


Рис. 3. Температурная зависимость ZT для материалов на основе *Bi-Te*.

Воздушно-жидкостный теплообменник. Эмпирическая зависимость (11), характеризующая работу теплообменной системы, находилась экспериментально по схеме, представленной на рис. 4.

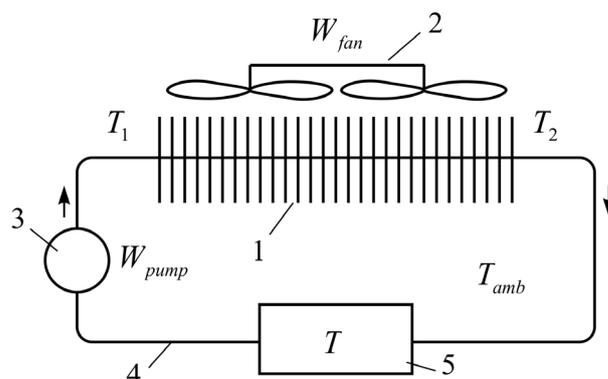


Рис. 4. Схема исследования системы охлаждения. 1 – воздушно-жидкостный теплообменник, 2 – блок вентиляторов, 3 – электрический жидкостный насос, 4 – жидкостный контур, 5 – жидкостный термостат.

С помощью жидкостного термостата 5 задавали перепад температур между жидкостью и окружающей средой. Насос 3 прокачивал жидкость через теплообменник 1, обдуваемый блоком вентиляторов 2. По перепаду температур T_1 и T_2 определяли мощность Q , отводимую теплообменником при температуре жидкости T , мощности питания блока вентиляторов W_{fan} и мощности питания насоса W_{pump} .

Результаты экспериментального исследования системы теплоотвода приведены на рис. 5.

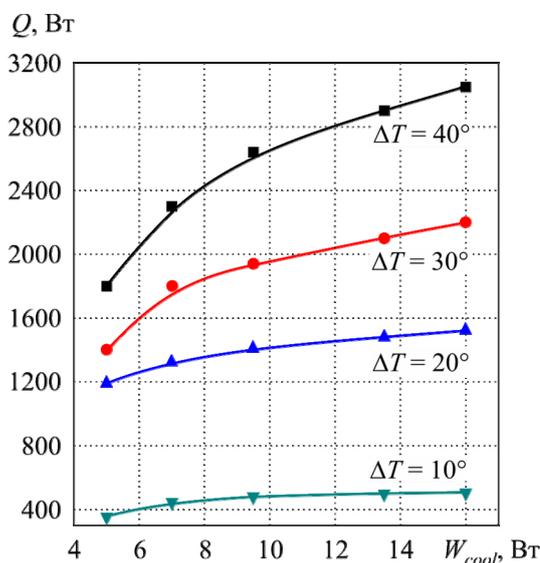


Рис. 5. Зависимость мощности теплоотвода воздушно-жидкостного теплообменника от мощности питания вентиляторов. Мощность насоса – 2 Вт.

Серия таких зависимостей тепловой мощности теплообменника для различных мощностей питания вентиляторов и насоса была аппроксимирована полиномом и использована в алгоритме оптимизации.

Обычно КПД вентиляторов, как и насосов, не очень высок (50 – 65 %). Поэтому использование прямого охлаждения от набегающего потока могло бы обеспечить меньшую затрату энергии двигателя на систему охлаждения примерно в 2 – 2.5 раза. Во многих работах для

охлаждения термогенератора предполагается использование существующих в автомобилях жидкостных теплообменников (радиаторов). Однако такие теплообменники рассчитаны на обеспечение отвода тепла от двигателей в наиболее сложных условиях при высокой температуре набегающего потока воздуха, низких скоростях движения, экстремальных мощностях. В таких условиях существующие радиаторы могут оказаться неспособными отводить тепло от термогенератора без нарушения теплового режима двигателя. Поэтому может понадобиться использование специальных радиаторов повышенной мощности, обеспечивающих отвод тепла от термогенератора, или дополнительного теплообменника для отвода тепла от ТЭГ. При этом следует ожидать, что использование электрических вентиляторов для теплоотвода делает режим работы ТЭГ более гибким и может обеспечить минимальное использование электрической энергии.

Оптимизация системы теплоотвода. Вначале проводилась оптимизация температуры горячей стороны ТЭГ. На рисунках 6–7 приведены результаты такой оптимизации. По всей видимости, существует оптимум по мощности ТЭГ, который связан с действием следующих двух конкурирующих факторов. При уменьшении теплового сопротивления ТЭГ возрастает тепловая мощность, проходящая через генератор. Но, вместе с тем, снижается температура горячей стороны ТЭГ.

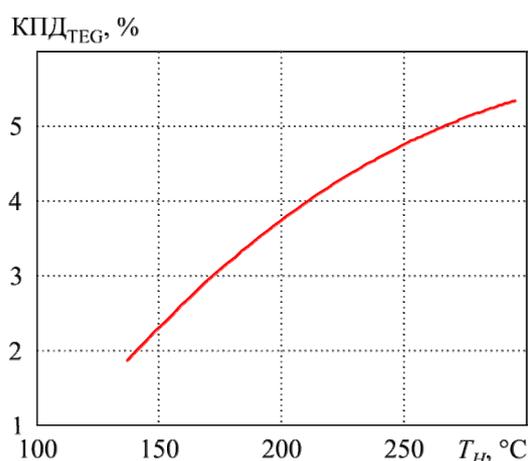


Рис. 6. Зависимость КПД ТЭГ от температуры горячей стороны ТЭГ. $T_c = 90^\circ\text{C}$.

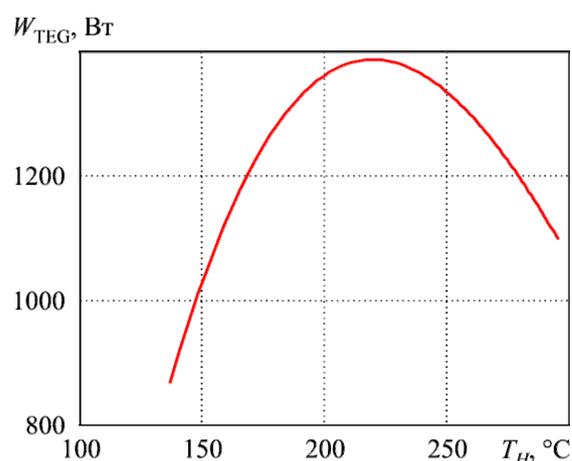


Рис. 7. Зависимость электрической мощности ТЭГ от температуры горячей стороны ТЭГ. $T_c = 90^\circ\text{C}$.

Расчеты эффективного КПД и мощности ТЭГ с учетом затрат на теплоотвод проводился согласно уравнениям (6–8).

На рис. 8–9 приведены результаты оптимизации системы теплоотвода. Эффективные КПД и электрическую мощность ТЭГ рассчитывали с учетом того, что часть мощности ТЭГ отводится на обеспечение работы системы теплоотвода ТЭГ. Из графиков видно, что существуют ярко выраженные оптимальные режимы работы системы теплоотвода. Например, при снижении температуры окружающего воздуха от $+50^\circ\text{C}$ до -40°C КПД ТЭГ возрастает от $\sim 3.8\%$ до $\sim 7.2\%$ (рис. 8). Это соответствует крайним значениям электрической мощности ТЭГ 1.2 кВт и 3.1 кВт соответственно. Из рис. 9 видно, что ТЭГ дает дополнительно 1.5–4% от мощности двигателя в виде электрической энергии. С учетом КПД динамомашин, это соответствует 2–6% экономии топлива.

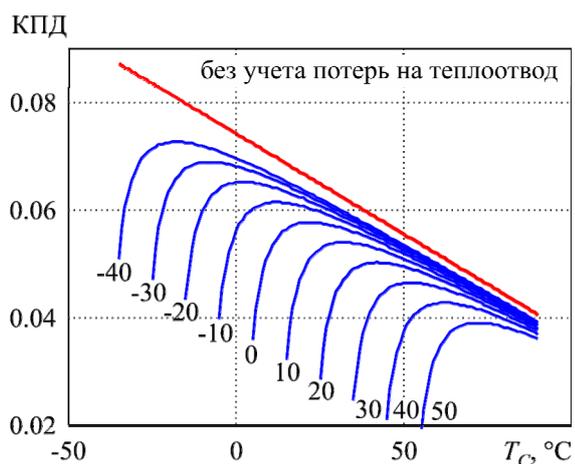


Рис. 8. Зависимость эффективного КПД ТЭГ от температуры холодной стороны ТЭГ.

При фиксированной температуре окружающей среды (указана в °С, возле соответствующей зависимости).

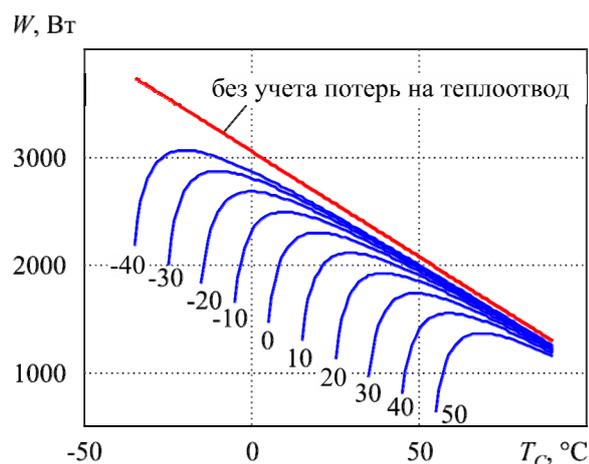


Рис. 9. Зависимость эффективной электрической мощности ТЭГ от температуры холодной стороны ТЭГ.

При фиксированной температуре окружающей среды (указана в °С, возле соответствующей зависимости).

В таблице 1 представлены данные об оптимальных значениях КПД и мощности ТЭГ, тепловая мощность, которую необходимо отводить от ТЭГ, а также затраты на работу системы охлаждения. По всей видимости, при росте температуры окружающей среды оптимальные эффективные КПД и мощность падают, а потери на работу системы охлаждения возрастают от ~ 15 % до ~ 25 % при использовании электрических вентиляторов. Если для привода вентиляторов использовать механическую энергию двигателя, то, с учетом среднего КПД электрического вентилятора, потери на работу системы охлаждения составят 6 – 12 %.

Таблица 1

Основные характеристики ТЕГ с системой теплоотвода

Температура окружающей среды, °С	Тепловая мощность, подлежащая отводу от ТЭГ, кВт	Мощность ТЭГ, кВт	Электрическая мощность системы теплоотвода, кВт	Электрические потери на работу системы теплоотвода, %	Эффективный КПД ТЭГ, %
-40	42.7	3.12	0.477	15.4	7.25
-30	41.1	2.84	0.462	16.5	6.80
-20	40.0	2.61	0.457	17.4	6.53
-10	38.0	2.32	0.432	18.7	6.05
0	36.5	2.15	0.422	20.1	5.75
10	33.9	1.82	0.365	20.4	5.30
20	32.0	1.60	0.337	21.1	5.05
30	31.4	1.41	0.315	22.5	4.61
40	31.5	1.32	0.304	23.4	4.25
50	31.5	1.21	0.297	24.8	3.82

Рассмотрим, как будет изменяться КПД ТЭГ в зависимости от географии расположения автомобиля.

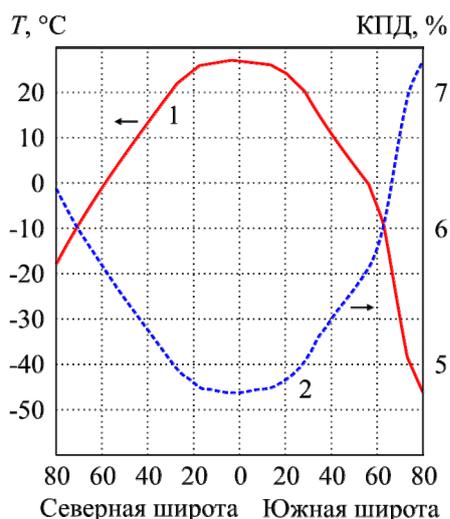


Рис. 10. Зависимость среднегодовой температуры воздуха и КПД ТЭГ от широты.

На рисунке 10 приведена среднегодовая температура на планете (кривая 1) в зависимости от широты. Вторая шкала отображает коэффициент полезного действия термоэлектрического генератора (кривая 2) в зависимости от широты [16].

Выводы

1. Организация отвода тепла от автомобильного термогенератора является важным фактором снижения его эффективности, который нужно учитывать при проектировании таких ТЭГ. Так, для дизельного двигателя мощностью 75 кВт затраты на отвод тепла от односекционного ТЭГ теплообменниками с электровентиляторами могут достигать 15–25 % от произведенной им электрической энергии, или ориентировочно 6–12 % от мощности ТЭГ в виде механической энергии двигателя, что составляет около 0.1–0.4 % от его мощности.
2. Эффективность теплоотвода от ТЭГ на автомобиле имеет оптимальные значения, зависящие от температуры окружающего воздуха. Для дизельного двигателя при снижении температуры окружающего воздуха от +50 °C до –40 °C, КПД ТЭГ возрастает от ~3.8 % до ~7.2 %, что соответствует значениям электрической мощности ТЭГ 1.2 кВт и 3.1 кВт, соответственно. Поэтому эксплуатация автомобилей с ТЭГ является более эффективной в климатических зонах со сниженными температурами воздуха.
3. При учете затрат на отвод тепла использование ТЭГ дает дополнительно 1.5–4 % от мощности двигателя в виде электрической энергии, что, соответственно, может дать около 2–6 % экономии топлива при скорости движения автомобиля 100 км/ч.

Литература

1. L.I. Anatyчук, Yu.Yu. Rozver, K. Misawa, and N. Suzuki, Thermal Generators for Waste Heat Utilization, *Proc. of 16th International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, 1997), p. 586–587.
2. Анатычук Л.И. Эффективность термоэлектрических рекуператоров энергии выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. –2011. – № 4. – С. 80–85.
3. Анатычук Л.И. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя / Л.И. Анатычук,

- Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 97 – 104.
4. G. Min, D.M. Rowe, Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22, 528 – 534 (2007).
 5. K.M. Sacr, M.K. Mansour, and M.N. Mussa, Thermal Design of Automobile Exhaust Based on Thermoelectric Generators: Objectives and Challenges, *J. Thermoelectricity* 1, 64 – 73 (2008).
 6. X. Zhang, K.T. Chau, and C.C. Chan, Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles, *J. Asian Electric Vehicles* 6 (2), 1119 – 1124 (2008).
 7. N. Elsner, J. Bass, S. Ghamaty, D. Krommenhoek, A. Kushch, and D. Snowden, Diesel Truck Thermoelectric Generator, *Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2005 Progress Report*, p. 301 – 305.
 8. D. Crane, L. Bell, Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator, *Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics* (Vienna, Austria), p. 11 – 16.
 9. Jihui Yang, F. Seker, R. Venkatasubramanian, G.S. Nolas, C. Uher, and H. Wang, Developing Thermoelectric Technology for Automotive Waste Heat Recovery, *Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report*, p. 227 – 231.
 10. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрического генерирования энергии в Японии / Т. Кадзикава // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 21 – 31.
 11. K. Ikoma, M. Munekiyo, K. Furuya, M. Kobayashi, T. Izumi, and K. Shinohara, Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles, *Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics* (Nagoya, Japan, 1998), p. 464 – 467.
 12. E. Takanose, H. Tamakoshi, The Development of Thermoelectric Generator for Passenger Car, *Proc. 12th International Conference on Thermoelectrics* (Yokohama, Japan, 1993), p. 467 – 470.
 13. *Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie* (Berlin, 2008).
 14. PTC Mathcad – Engineering Calculations Software. www.ptc.com.
 15. L.I. Anatyчук, R.V. Kuz, Materials for Vehicular Thermoelectric Generators, *Proc. of ICT-2011* (Michigan, USA).
 16. Хромов С.П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. – Л.: Гидрометеопиздат, 1974.

Поступила в редакцию 12.06.2014.