

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Розвер Ю.Ю.
(Институт термоэлектричества, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина)

- *Приведены результаты компьютерного моделирования термоэлектрических генераторов (ТЭГ), использующих отходы тепла бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Моделирование проведено с учетом динамических режимов работы двигателя для реальных температурных зависимостей параметров термоэлектрических материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований генератора, в котором использованы тепловые отходы от автомобильного двигателя, объемом 1.8 л. Результаты испытаний подтверждают компьютерное моделирование.*

Введение

Использование отходов тепла от двигателей внутреннего сгорания в настоящее время является актуальной задачей термоэлектричества [1 – 6]. По этой тематике опубликовано множество работ. С каждым годом на международных конференциях по термоэлектричеству возрастает количество докладов, посвященных рекуперации тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания. Также организуются тематические конференции в США и Германии, посвященные этой тематике.

Мировые производители автомобилей, а также компании, занимающиеся термоэлектричеством, уделяют много внимания разработке эффективных автомобильных термоэлектрических генераторов. Целью таких работ является повышение экономии топлива до 10% за счет использования отходов тепла двигателя для генерации электрической энергии.

Наиболее крупными компаниями, ставящими перед собой задачу создания промышленных образцов генераторов и их серийного производства, являются компании Hi-Z [7], BSST [8] и General Motors [9] в США. В Японии наиболее широко 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 компания BMW и DLR (аэрокосмический центр Германии) [13].

Как видно, интерес к созданию термогенераторов для автомобилей возрастает. Созданные до настоящего времени образцы генераторов подтверждают возможность получения электричества от тепла выхлопных газов, но среди разработанных генераторов еще нет таких, которые могли бы быть использованы для их промышленного выпуска. Причиной тому является недостаточно высокий коэффициент полезного действия генераторов. КПД генератора существенно зависит от режима работы двигателя. Динамические режимы работы двигателя при реальной езде накладывают весьма сложные требования к проектированию и оптимизации автомобильных генераторов, которые в полной мере в настоящее время еще не удается решить.

В Украине проблемы создания эффективных термоэлектрических генераторов для двигателей внутреннего сгорания решаются в Институте термоэлектричества [14]. Создан ряд термоэлектрических генераторов, использующих тепло выхлопных газов как от стационарно работающих дизельных установок, так и от дизельных двигателей автомобиля [15]. Как

известно, температура выхлопного газа бензиновых двигателей намного выше, чем у дизельных, и составляет около 500 – 800°C.

Целью настоящей работы является разработка термоэлектрического генератора, утилизирующего тепло выхлопных газов от бензинового двигателя.

Оптимизация термоэлектрического генератора производится компьютерным проектированием [16], которое состоит в следующем.

1. Методика компьютерного проектирования

Рассмотрим физическую модель термоэлектрического генератора (ТЭГ), представленную на рис. 1. В общем случае ТЭГ состоит из N секций, соединенных последовательно относительно потока горячего газа и холодного теплоносителя.

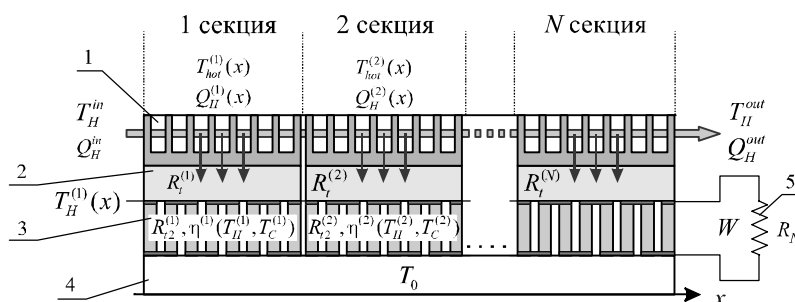


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического генератора:

- 1 – горячий теплообменник; 2 – тепловое сопротивление между горячим теплообменником и термоэлектрической батареей; 3 – термоэлектрическая батарея; 4 – холодный теплообменник; 5 – согласованная электрическая нагрузка.

Каждая секция ТЭГ состоит из следующих элементов (рис. 1): горячий теплообменник (1), термоэлектрическая батарея (3) с тепловым сопротивлением $R_t^{(i)}$ и коэффициентом полезного действия $\eta(T_H, T_0)$; холодный теплообменник (4) с температурой T_0 ; тепловое сопротивление между горячим теплообменником и термоэлектрической батареей $R_t^{(i)}$ (3), которым ограничивается температура горячей стороны модулей. Термоэлектрические батареи каждой из секций замкнуты на согласованную электрическую нагрузку R_i (5).

Входной поток горячего газа характеризуется температурой T_H^{in} и тепловой мощностью Q_H^{in} . Горячий газ отдает часть тепла $Q_H^i(x)$ при температуре $T_{hot}^{(i)}(x)$ горячему теплообменнику. На выходе ТЭГ температура газа T_H^{out} и тепловая мощность Q_H^{out} . Из горячего теплообменника через тепловое сопротивление $R_t^{(i)}$ тепло передается термоэлектрической батарее, нагревая ее горячую сторону до температуры $T_H^{(i)}(x)$.

Для предотвращения перегрева термоэлектрических модулей дополним физическую модель байпасом, через который будет отводиться излишек выхлопного газа таким образом, чтобы поддерживать температуру модулей на максимально допустимом уровне.

Для оптимизации ТЭГ необходимо найти распределение температур и тепловых потоков в термоэлектрических батареях каждой из секций. Такой расчет для представленной модели осуществлен путем применения численных компьютерных методов.

Для расчета электрической мощности ТЭГ используем уравнение баланса энергии в виде

$$W = \sum_{i=1}^N \left[\int (Q_H^{(i)}(x) - Q_C^{(i)}(x)) dx \right]. \quad (3)$$

Необходимые температуры и тепловые потоки определяются из уравнения теплопроводности:

$$-\nabla(\kappa_{TE}(T)\nabla T) = Q_J, \quad (4)$$

где κ_{TE} – эффективная теплопроводность термоэлектрической батареи, Q_J – тепло Джоуля, которое выделяется в объеме термоэлектрической батареи.

Граничные условия для (4) будут иметь вид

$$Q_H^{in(1)} = Q_H^{in}, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (5)$$

$$Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_t^{(i)}, \quad (6)$$

$$Q_C^{(i)}(x) = (T_0(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}^{(i)}, \quad (7)$$

Совокупность соотношений (3)–(7) позволяет определить распределение температур $T_H^{(i)}(x)$ и тепловых потоков $Q_H^{(i)}(x)$ на каждой из секций.

Для ограничения горячей температуры модуля тепловое сопротивление $R_t^{(i)}$ между горячим теплообменником и термоэлектрическим модулем находится из уравнения (6).

Мощность каждой секции и общий КПД ТЭГ можно определить из уравнений

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_0) dx, \quad (8)$$

$$\eta_{TEG} = \frac{1}{Q_H^{in}} \sum_{i=1}^N W^{(i)}. \quad (9)$$

Система уравнений (3)–(7) решается численными методами на двухмерной сетке конечных элементов [10].

2. Результаты компьютерного проектирования

Для проектирования термоэлектрического генератора в динамическом режиме работы входные параметры выхлопного газа (температура и расход) были получены на бензиновом двигателе УМЗ-3318 (Россия) объемом 1.8 л в режиме работы, имитирующем езду автомобиля по новому европейскому циклу вождения (NEDC) (рис. 2). Этот цикл продолжительностью 1220 с состоит из двух частей. Первая часть цикла – городской ездовой цикл UDC (Urban Driving Cycle) с максимальной скоростью движения 50 км/ч включает четыре последовательных ездовых цикла и имитирует условия движения автомобиля по городу. Вторая часть цикла – скоростной загородный цикл EUDC (ExtraUrban Driving Cycle) с максимальной скоростью движения 120 км/ч имитирует условия движения автомобиля по магистрали.

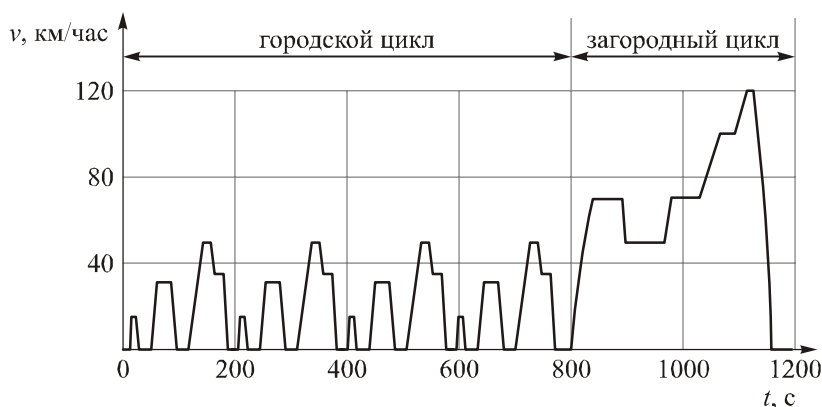


Рис. 2. Новый европейский цикл вождения (NEDC).

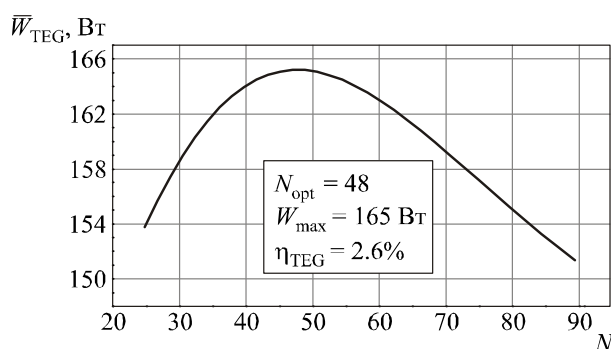


Рис. 3. Зависимость средней электрической мощности ТЭГ от количества модулей.

Для проектирования генератора были выбраны термоэлектрические модули Altec-1061 [17] на основе *Bi-Te*, которые по своим характеристикам превышают известные мировые аналоги. Оптимизация конструкции генератора состояла в нахождении минимального количества модулей, необходимых для достижения генератором максимальной средней электрической мощности за цикл NEDC. На рис. 3. приведены результаты такой оптимизации. Как видно, для поставленной задачи оптимальное количество модулей составляет 48. При отклонении от оптимального значения в меньшую сторону возможно поднять горячую температуру модулей до более высоких значений, но суммарная электрическая мощность ТЭГ падает из-за малого количества модулей. Падение электрической мощности ТЭГ наблюдается и при отклонении от оптимального количества модулей в большую сторону. Это связано с уменьшением общего теплового сопротивления термоэлектрической батареи и, как следствие, уменьшением перепада температур на модулях.

На рис. 4 а приведены зависимости температуры горячей стороны модулей от времени при работе двигателя по циклу NEDC. Температура холодной стороны принята $T_0 = 60^\circ\text{C}$.

На рис. 4 б показана зависимость электрической мощности ТЭГ от времени. Как видно из рисунков, в диапазоне времени 1060 – 1160 с температура на модулях достигает максимально допустимого значения и включается байпас, который поддерживает температуру на заданном уровне.

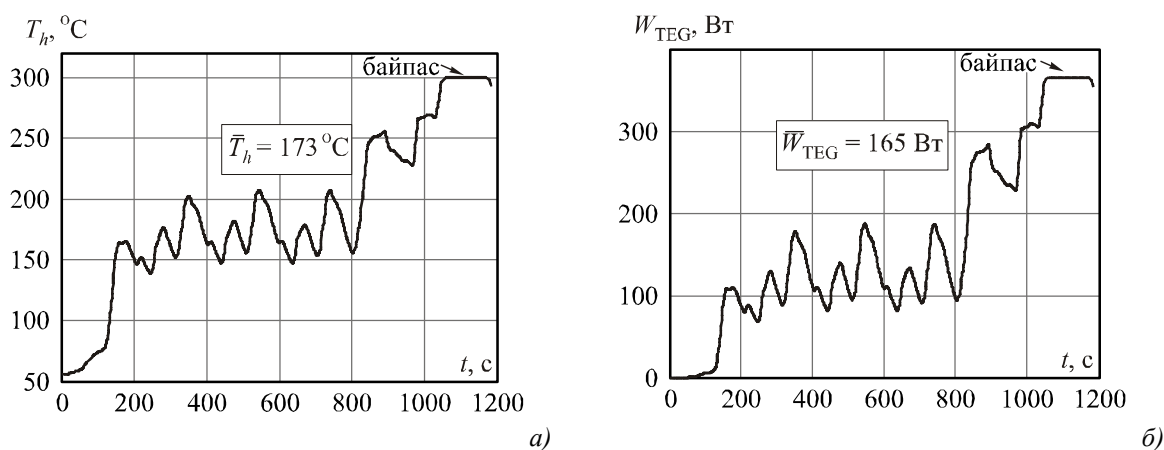


Рис. 4. Зависимости температуры горячей стороны модулей (а) и электрической мощности ТЭГ (б) от времени при работе двигателя по циклу NEDC.

В это время электрическая мощность термогенератора достигает своего максимального значения 365 Вт.

Средняя электрическая мощность термогенератора при работе двигателя по циклу NEDC составляет 165 Вт, что вполне достаточно для зарядки аккумулятора автомобиля.

При этом средний коэффициент полезного действия термоэлектрического генератора за цикл NEDC составил 2.6%.

Как видно из рис. 4, оптимизация генератора на полный цикл NEDC и существенное различие в температурах и мощностях газа в городском и загородном циклах вождения приводят к тому, что генератор не наиболее эффективным образом преобразует тепловую энергию газа в электрическую.

Оптимизация генератора отдельно на городской или загородный цикл вождения дала следующие результаты. На рис. 5 а приведена зависимость электрической мощности ТЭГ, оптимизированного на городской цикл вождения. Такой генератор содержит 22 термоэлектрических модуля и развивает среднюю электрическую мощность 110 Вт в городском режиме вождения. В целом за цикл NEDC такой генератор развивает среднюю электрическую мощность 138 Вт. Такое низкое значение обусловлено тем, что значительная часть тепловой энергии уходит через байпас в загородной фазе цикла. На рис. 5 б приведена зависимость электрической мощности ТЭГ, оптимизированного на загородный режим вождения. Такой генератор содержит 74 модуля и развивает среднюю электрическую мощность 350 Вт в загородном режиме. В целом в цикле NEDC он развивает среднюю электрическую мощность 162 Вт. Такое низкое значение, как видно из рис. 5 б, обусловлено неэффективной работой генератора в городской фазе цикла NEDC.

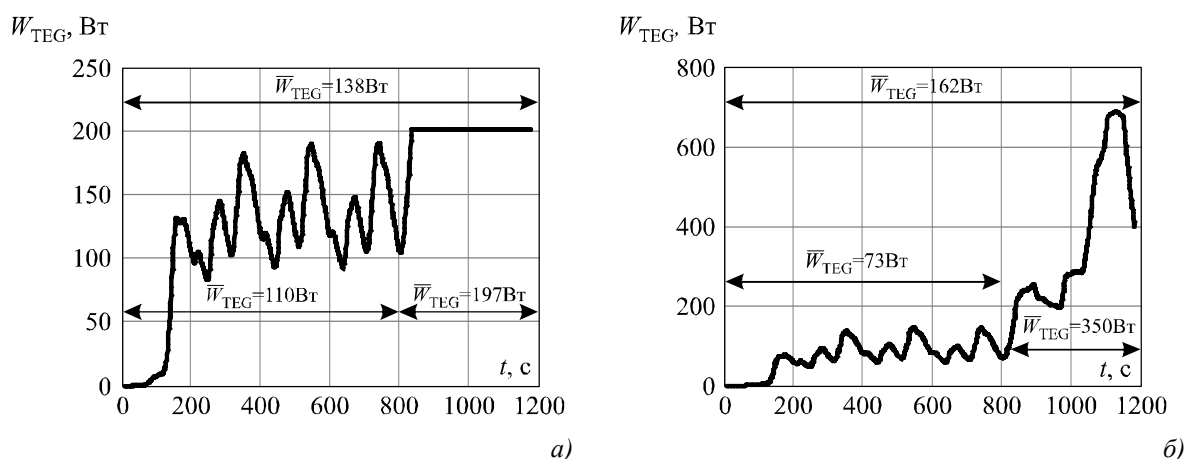


Рис. 5. Зависимость электрической мощности генераторов, оптимизированных на городской (а) и загородный (б) циклы вождения.

Как следует из вышесказанного, использование одного генератора с байпасом не является оптимальным вариантом утилизации тепла выхлопных газов двигателя при его работе в динамическом режиме. В интервале времени $0 \div 800$ с прохождения цикла NEDC горячая температура модулей является значительно ниже

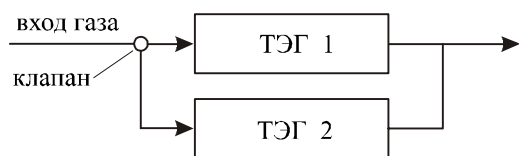


Рис. 6. Модель с двумя генераторами.

максимально допустимой. Соответственно, модули работают с низким коэффициентом полезного действия. Отсюда можно сделать вывод, что более эффективной будет модель, содержащая 2 генератора, оптимизированных соответственно на работу в городском и

загородном циклах (рис. 6). При низких температурах и мощностях выхлопного газа в работу будет включен только ТЭГ 1. При достижении на модулях тег максимально допустимой температуры с помощью клапана часть газа будет отведена на ТЭГ 2.

Результаты оптимизации такой модели приведены на рис. 7. Для этого случая ТЭГ 1 содержит 22 термоэлектрических модуля, ТЭГ 2 – 52 модуля.

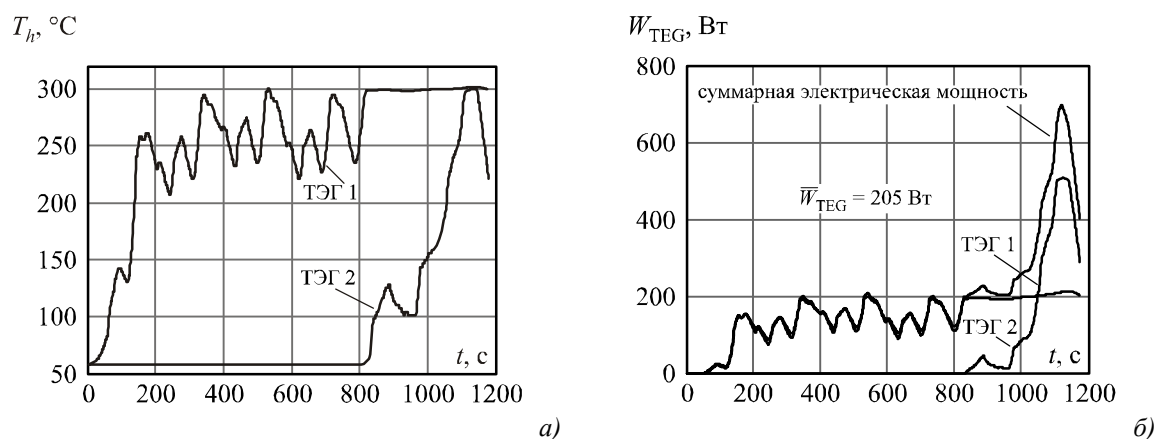


Рис. 7. Зависимости температуры горячей стороны модулей (а) и электрической мощности (б) двух генераторов от времени при работе двигателя по циклу NEDC.

Как видно из рис. 7, в такой модели горячая температура модулей ТЭГ 1 находится в области оптимальных температур и ТЭГ 1 работает с максимальной эффективностью. В фазе цикла NEDC, которая соответствует загородному режиму, часть выхлопных газов отводится к ТЭГ 2. Средняя электрическая мощность такой системы составила 205 Вт, что на 25% больше, чем для модели, в которой используется один генератор с байпасом. Максимальная мощность генератора составляет 675 Вт.

3. Испытания термоэлектрического генератора

По результатам компьютерного проектирования был сконструирован термоэлектрический генератор, содержащий 74 термоэлектрических модуля Altec-1061, горячие газовые теплообменники и холодные жидкостные теплообменники.

Для испытаний генератора создан стенд, в котором использован четырехцилиндровый бензиновый двигатель, объемом 1.8 л. Подача выхлопного газа от цилиндров в термоэлектрический генератор организована специальным коллектором из нержавеющей стали.

На стенде регистрируется:

- температура входящих в генератор газов $\pm 5^\circ\text{C}$;
- температура выходящих из генератора газов $\pm 3^\circ\text{C}$;
- температура на поверхности каждого теплообменника у его начала и конца $\pm 13^\circ\text{C}$;
- температура входящей охлаждающей воды;
- температура уходящей охлаждающей воды $\pm 0.3^\circ\text{C}$;
- расхода газа, л/с $\pm 5\%$;
- давление газа, входящего в генератор $\pm 5\%$;
- давление газа, уходящего из генератора $\pm 5\%$;
- число оборотов двигателя $100 \div 5300$ об/мин. $\pm 5\%$;
- ЭДС ТЭГ ± 0.1 В;
- электрический ток на согласованной нагрузке при последовательно включенных модулях ± 0.05 А;
- электрическая мощность на согласованной нагрузке при последовательно включенных модулях $\pm 0.5\%$;
- электрическая мощность на согласованной нагрузке при использовании электронного преобразователя с выходом 12 В $\pm 1\%$.

Нагрузочными сопротивлениями подбирается их оптимальная величина для достижения максимальной электрической мощности ТЭГ.

Результаты испытаний термоэлектрического генератора в стационарном режиме работы на максимальной мощности двигателя приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Температура выхлопного газа, °С	740 – 770
Расход выхлопного газа, кг/час	< 200
Тепловая мощность выхлопного газа, кВт	< 50
Температура охлаждающей жидкости на входе, °С	+ 60
Температура охлаждающей жидкости на выходе, °С	+ 80 ÷ 90
Электрическое напряжение с преобразованием, В	12 ± 1
Ток, А	51 ± 1
Электрическая мощность, Вт	630 ± 20
Электрическая мощность с электронным преобразованием, Вт	540 ± 20
Масса, кг	26
Давление газа на входе генератора, МБар	10
Давление газа на выходе генератора, МБар	7

Как видно из полученных результатов, величина электрической мощности термоэлектрического генератора хорошо согласуется с результатами, полученными компьютерным моделированием.

Выводы

1. Проведено проектирование термоэлектрического генератора для бензинового двигателя, объемом 1.8 л. Для стационарного режима работы по результатам проектирования показана возможность получения до 675 Вт электрической энергии. Для работы двигателя по циклу NEDC средняя электрическая мощность ТЭГ составляет ~ 165 Вт для модели с одним генератором при среднем КПД – 2.6% и 205 Вт при КПД 3.2% для модели с двумя генераторами.

2. Экспериментально подтверждены полученные результаты проектирования. В стационарном режиме работы двигателя получено около 630 Вт электрической энергии. С учетом электронного преобразования напряжения получено 540 Вт электрической энергии.

3. Использование одного термоэлектрического генератора не является оптимальным способом преобразования тепловой энергии выхлопного газа в динамическом режиме работы, так как температура горячей стороны модулей значительно ниже рабочей, что приводит к их неэффективному использованию. Для цикла NEDC средняя электрическая мощность ТЭГ составляет около 45% максимальной мощности генератора.

4. Использование модели с двумя генераторами, оптимизированными на городской и

загородный режим вождения соответственно позволяет получить на ~25% больше электрической мощности по сравнению с моделью, в которой используется только один генератор.

Литература

1. Anatyчук L.I., Rozver Yu.Yu., Misawa K., Suzuki N. "Thermal generators for waste heat utilization" // in Proc. of 16th International conference on thermoelectrics, 1997, p. 586 – 587.
2. Kajikawa T. and Onishi T. "Development for advanced thermoelectric conversion systems" // in Proc. of 26th international conference on thermoelectrics, 2007, p. 353 – 361
3. Clay W. Maranville, Peter Schmitz. Thermoelectrics for Waste Heat Recovery and Climate Control in Automobiles. In Thermoelectrics goes automotive. Expert Verlag, Germany, P. 1–15.
4. Min G., Rowe D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – p. 528-534.
5. 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.
6. 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.
7. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. Diesel Truck Thermoelectric Generator. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report. – p. 301-305.
8. Crane D., Bell L. 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, 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. Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles // Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics. – Nagoya (Japan) 1998. – 464-467.
12. Takanose E., Tamakoshi H. 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», Берлин, 2008 г.
14. Anatyчук L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, p. 1326-1331, 2011.
15. Anatyчук L.I., Kuz' R.V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator // Proc. of "Thermoelectrics goes automotive", Berlin, 2010.
16. Comsol multiphysics. <http://www.comsol.com>.
17. Anatyчук L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Поступила в редакцию 02.02.2012.