

Анатичук Л.І., Кузь Р.В.



Анатичук Л.І.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

**ВПЛИВ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА
ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО
ГЕНЕРАТОРА ДИЗЕЛЬНОГО АВТОМОБІЛЯ**



Кузь Р.В.

Створено модель автомобіля з термоелектричним генератором (ТЕГ) з урахуванням того, що ТЕГ повинен забезпечити живлення власної системи тепловідводу. Наведено результати оптимізації температури гарячої сторони ТЕГ та електричної потужності живлення системи тепловідводу. Розраховано ефективний коефіцієнт корисної дії та електрична потужність ТЕГ для дизельного двигуна потужністю 75 кВт. Показано необхідність оптимального проектування системи тепловідводу ТЕГ.

Ключові слова: рекуперация тепла, термоелектричний генератор, дизельні двигуни.

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.

Вступ

Використання відходів тепла від двигунів внутрішнього згоряння є одним з актуальних завдань термоелектрики [1 – 6]. Світові виробники автомобілів, а також компанії, що займаються термоелектрикою, приділяють багато уваги розробці ефективних автомобільних термоелектричних генераторів. Мета цього – підвищення економії палива за рахунок використання відходів тепла двигуна для генерації електричної енергії.

У США найбільшими компаніями, які ставлять перед собою завдання створення промислових зразків генераторів і їх серійного виробництва, є *Hi-Z* [7], *BSST* [8] і *General Motors* [9]. У Японії найдокладніше питаннями створення генераторів для автомобілів займаються компанії *Komatsu* [10], *Nissan* [11] і *Shiroki* [12]. У Німеччині свої розробки термоелектричних автомобільних генераторів представила компанія *Volkswagen* [13], а також спільно компанії *BMW* і *DLR* (аерокосмічний центр Німеччини) [13]. Проте, слід зазначити, що у більшості з наведених роботах не звертається увага на те, як сам термоелектричний генератор впливатиме на роботу автомобіля. Але, як відомо, наявність термоелектричного генератора суттєво впливає на роботу автомобіля завдяки як мінімум трьом чинникам: додатковому гідравлічному опору у вихлопній системі автомобіля, механічними витратам двигуна на транспортування додаткової маси самого ТЕГ та витратам, пов'язаним з необхідністю відводу тепла від термоелектричного генератора. У роботах [4-6] детально розглядається ефективність ТЕГ з урахуванням витрат на транспортування.

Показано, що для легкових автомобілів ці витрати можуть перевищувати корисну роботу ТЕГ. Щодо тепловідведення, то з метою невтручання у системи охолодження автомобіля тепловідвід від ТЕГ повинен здійснюватися за рахунок потужності самого ТЕГ.

Мета цієї роботи – оцінити ефективну потужність та коефіцієнт корисної дії термоелектричного генератора для автомобіля з урахуванням забезпечення тепловідводу ТЕГ.

Фізична модель автомобіля з термоелектричним генератором

Роботу термоелектричного генератора у складі сучасного автомобіля можна представити схемою, зображеною на рис. 1.

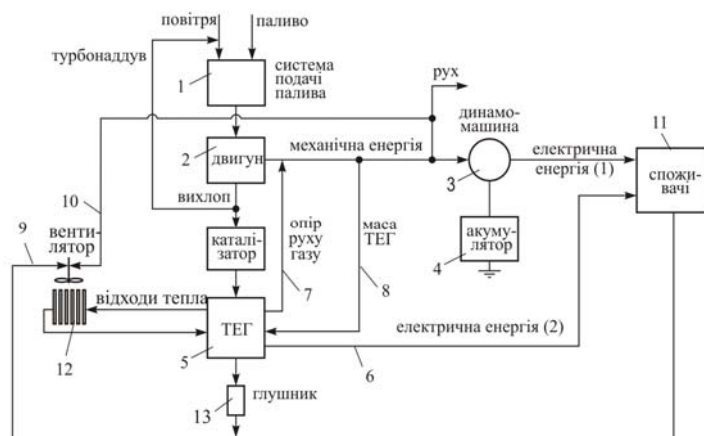


Рис. 1. Схема розподілу енергії в автомобілі з ТЕГ.

Система подачі палива 1 подає у двигун 2 паливну суміш, згорання якої забезпечує механічну потужність двигуна P . Ця потужність витрачається на приведення у рух самого автомобіля P_A та на роботу динамомашини 3, яка виробляє електричну потужність W_D при ККД η_D . Електрична потужність витрачається на роботу усіх електроспоживачів атомобіля 11 та на зарядку акумуляторної батареї 4.

За наявності термоелектричного генератора 5 додатковою вигодою буде вироблена ним електрична потужність W_{TEG} 6. Додатковими затратами будуть: механічна потужність P_{gas} 7, пов'язана зі збільшенням тиску у вихлопній системі; механічна потужність P_m 8, пов'язана зі збільшенням маси автомобіля завдяки наявності ТЕГ; електрична 9 (чи механічна 10) потужність P_c , необхідна для забезпечення роботи системи охолодження ТЕГ.

Таким чином, баланс енергії в автомобілі без ТЕГ має вигляд:

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

Баланс енергії в автомобілі з термоелектричним генератором матиме вигляд

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

де η_{TEG} – ККД термоелектричного генератора,

Розглянемо спрощену модель автомобіля з ТЕГ, де враховано забезпечення тепловідводу від ТЕГ (рис. 2), яка дозволить у загальних рисах виявити основні особливості забезпечення відводу тепла від ТЕГ.

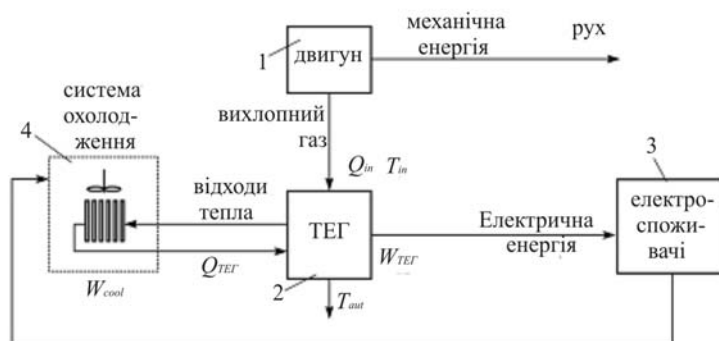


Рис. 2. Спрощена модель автомобіля з ТЕГ.

Вихлопний газ тепловою потужністю Q_{in} з двигуна 1 поступає в термоелектричний генератор 2 з тепловим опором R_t при температурі T_{in} та залишає генератор при температурі T_{out} . ТЕГ генерує електричну енергію W_{TEG} при ККД η_{TEG} . Розглядається випадок, коли частина цієї електричної енергії W_{cool} витрачається на роботу системи охолодження 4, яка відводить від ТЕГ теплову потужність Q_{TEG} . Температура навколишнього середовища T_{amb} . При такій постановці задачі виникають дві величини, які повинні бути прооптимізовані – температура гарячої сторони ТЕГ та потужність, що витрачається на роботу системи охолодження.

В моделі розглядається односекційний ТЕГ та нехтується впливом інших систем автомобіля на роботу двигуна.

Математичний опис роботи термоелектричного генератора

Рівняння для знаходження оптимальної температури гарячої сторони ТЕГ знайдемо з балансу тепла у ТЕГ:

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{TEG} \quad (3)$$

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

де c – теплоємність вихлопного газу, m – масова витрата вихлопного газу.

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

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

де T_0 – температура холодної сторони ТЕГ.

Підставивши (4)-(6) в (3) отримаємо рівняння для знаходження температури гарячої сторони ТЕГ:

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

ККД ТЕГ розраховуватимемо за формулою

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

де

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

Ефективний ККД ТЕГ знаходився наступним чином:

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

Урахування температурної залежності добротності Z у формулі (9) здійснювалося шляхом використання середнього інтегрального значення на температурному діапазоні (T_0, T_{out}) .

Для розрахунку електричної потужності ТЕГ з урахуванням забезпечення роботи системи тепловідводу необхідно знати ефективність повітряно-рідинного теплообмінника, яка отримана з експериментальних досліджень теплообмінника:

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

де Q_{cool} – теплова потужність системи тепловідводу, W_{cool} – електрична потужність живлення системи тепловідводу, T_H – температура рідини, T_C – температура повітря.

Оптимізаційний алгоритм реалізовано у системі математичного моделювання MathCAD [14].

Приклад розрахунку параметрів ТЕГ

Для прикладу розрахуємо основні параметри ТЕГ для дизельного двигуна потужністю 75 кВт у неперервному режимі роботи, швидкість автомобіля – 100 км/год. В такому режимі роботи температура вихлопних газів складає біля 420 °С.

Термоелектричні матеріали. Для розрахунку ККД та потужності ТЕГ було використано типову температурну залежність ZT [15] матеріалів на основі $Bi-Te$, яка наведена на рис. 3.

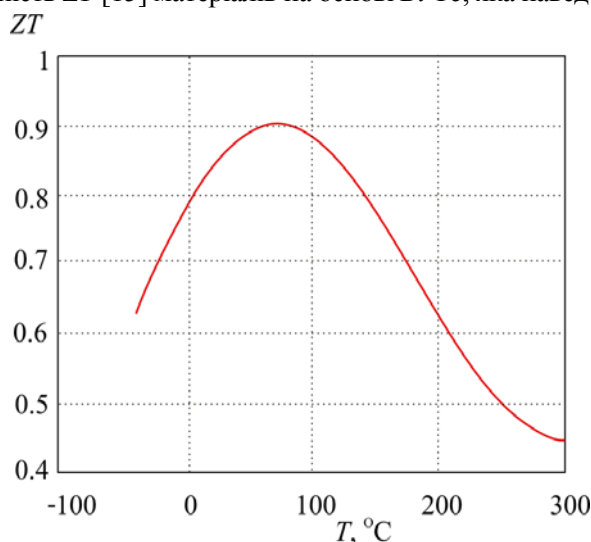


Рис. 3. Температурна залежність ZT для матеріалів на основі $Bi-Te$.

Повітряно-рідинний теплообмінник. Емпірична залежність (11), яка характеризує роботу

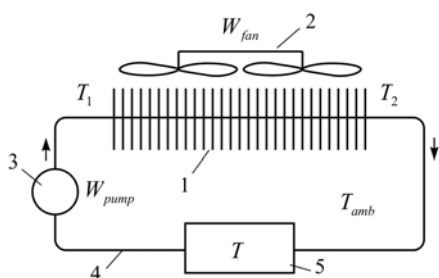


Рис. 4. Схема дослідження системи охолодження. 1 – повітряно-рідинний теплообмінник, 2 – блок вентиляторів, 3 – електричний рідинний насос, 4 – рідинний контур, 5 – рідинний термостат.

Результати експериментального дослідження системи тепловідводу наведено на рис. 5.

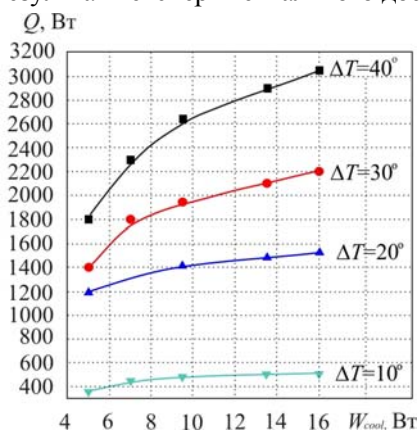


Рис. 5. Залежність потужності тепловідводу повітряно-рідинного теплообмінника від потужності живлення вентиляторів. Потужність насоса – 2 Вт.

Серія таких залежностей теплової потужності теплообмінника для різних потужностей живлення вентиляторів та насоса була апроксимована поліномом і використана у алгоритмі оптимізації.

Зазвичай ККД вентиляторів не дуже високий (50 – 65%), як і ККД насосів. Тому використання прямого охолодження від набігаючого потоку могло б забезпечити меншу витрату енергії двигуна на систему охолодження ($\gamma \sim 2 - 2.5$ рази). У багатьох роботах передбачається використання існуючих в автомобілях рідинних теплообмінників (радіаторів) для охолодження термогенератора. Однак, при цьому слід зауважити, що такі теплообмінники розраховані на забезпечення відводу тепла від двигунів у найбільш складних умовах – висока температура набігаючого потоку повітря, низькі швидкості руху, екстремальні потужності. В таких умовах існуючі радіатори можуть бути неспроможними відводити тепло від термогенератора без порушення теплового режиму двигуна. Тому може бути необхідним використання спеціальних радіаторів підвищеної потужності, що забезпечать відвід тепла від термогенератора, або використання додаткового теплообмінника для відводу тепла від ТЕГ. При цьому слід очікувати, що використання електричних вентиляторів для роботи системи тепловідводу робить його режим роботи більш гнучким і може забезпечити мінімальне використання електричної енергії.

Оптимізація системи тепловідводу. Спочатку проводилася оптимізація температури гарячої сторони ТЕГ. На рисунках 6 – 7 наведено результати такої оптимізації. Як видно, існує оптимум по потужності ТЕГ, який пов'язаний з дією двох конкуруючих факторів. При зменшенні теплового опору ТЕГ зростає тепла потужність, що проходить через генератор. Але, разом з тим,

знижується температура гарячої сторони ТЕГ.

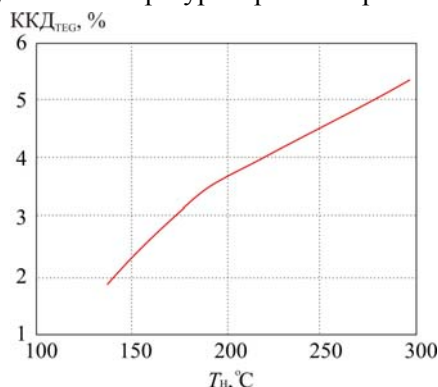


Рис. 6. Залежність ККД ТЕГ від температури гарячої сторони ТЕГ. $T_c = 90^\circ\text{C}$.

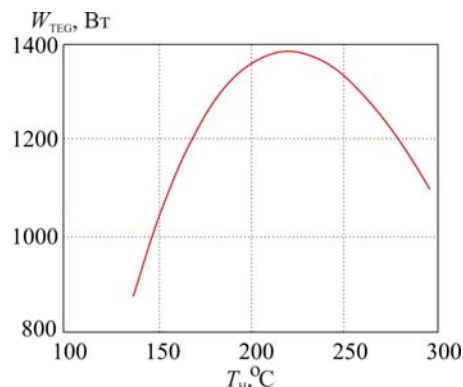


Рис. 7. Залежність електричної потужності ТЕГ від температури гарячої сторони ТЕГ. $T_c = 90^\circ\text{C}$.

Розрахунок ефективного ККД та потужності ТЕГ з урахуванням витрат на тепловідвід проводився за рівняннями (6 - 8).

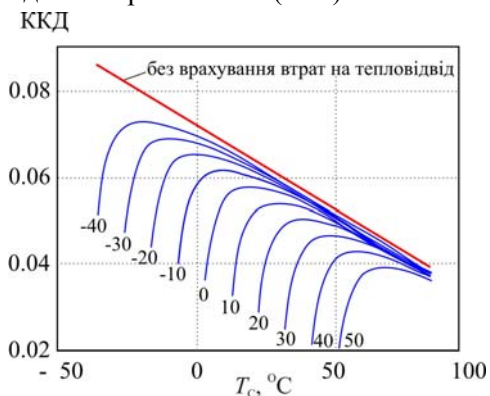


Рис. 8. Залежність ефективного ККД ТЕГ від температури холодної сторони ТЕГ.

Біля графіків вказано температуру навколишнього середовища.

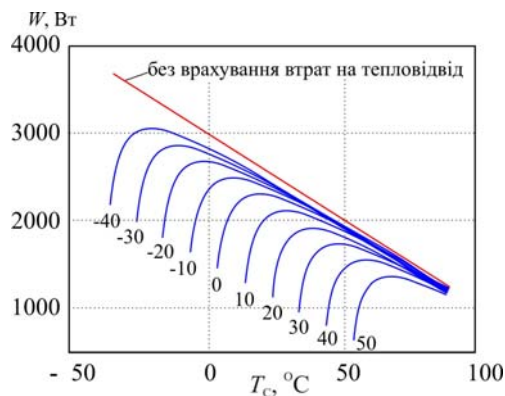


Рис. 9. Залежність ефективного електричного потужності ТЕГ від температури холодної сторони ТЕГ.

Біля графіків вказано температуру навколишнього середовища.

На рис. 8 - 9 наведено результати оптимізації системи тепловідводу. Ефективні ККД та електрична потужність ТЕГ розраховувались з урахуванням того, що частина потужності ТЕГ відводиться на забезпечення роботи системи тепловідводу ТЕГ. З графіків видно, що існують яскраво виражені оптимальні режими роботи системи тепловідводу. З рис. 8. видно, що при зниженні температури оточуючого повітря ККД ТЕГ зростає від $\sim 3.8\%$ при температурі $+50^\circ\text{C}$ до $\sim 7.2\%$ при температурі -40°C . Це відповідає крайнім значенням електричної потужності ТЕГ 1.2 кВт та 3.1 кВт відповідно. З рис. 9 видно, що ТЕГ дає додатково 1.5 - 4% від потужності двигуна у вигляді електричної енергії. З урахуванням ККД динамомашини це відповідатиме 2 - 6% економії палива.

У табл. 1 подано дані про оптимальні значення ККД та потужності ТЕГ, а також теплову потужність, що необхідно відводити від ТЕГ та витрати на роботу системи охолодження. Як видно, при зростанні температури навколишнього середовища оптимальні ефективні ККД та потужність спадають, а втрати на роботу системи охолодження зростають від $\sim 15\%$ до $\sim 25\%$ при використанні електричних вентиляторів. Якщо для приводу вентиляторів використати механічну енергію двигуна, то з врахуванням середнього ККД електричного вентилятора, втрати на роботу системи охолодження складуть 6 - 12%.

Таблиця 1

Основні характеристики ТЕГ з системою тепловідводу

Температура навколишнього середовища, °С	Теплова потужність, яку необхідно відводити від ТЕГ, кВт	Потужність ТЕГ, кВт	Електрична потужність системи тепловідводу, кВт	Електричні втрати на роботу тепловідводу, %	Ефективний ККД ТЕГ, %
-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

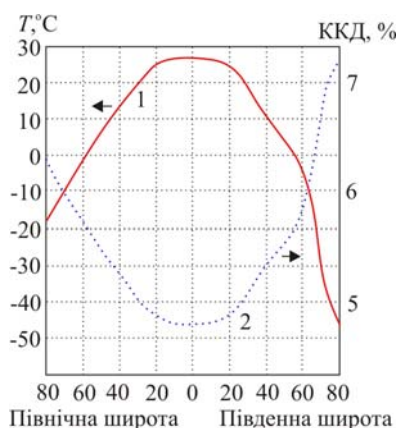


Рис. 10. Залежність середньорічної температури повітря та ККД ТЕГ від широти.

Розглянемо, як буде змінюватися ККД ТЕГ в залежності від місцезнаходження автомобіля.

На рис. 10 приведено середньорічну температуру на планеті (крива 1) в залежності від широти. Інша шкала відображає коефіцієнт корисної дії термоелектричного генератора (крива 2) в залежності від широти [16].

Висновки

1. Організація відводу тепла від автомобільного термогенератора є важливим чинником підвищення його ефективності, який слід враховувати при проектуванні таких ТЕГ. Так, для дизельного двигуна потужністю 75 кВт витрати на відвід тепла від односекційного ТЕГ теплообмінниками з електровентиляторами можуть досягати 15 - 25% від виробленої ТЕГ електричної енергії, або орієнтовно 6 - 12% від потужності ТЕГ у вигляді механічної енергії двигуна, що складає біля 0.1 - 0.4% від його потужності.
2. Ефективність тепловідводу від ТЕГ на автомобілі має оптимальні значення, які залежать від температури оточуючого повітря. Для дизельного двигуна при зниженні температури оточуючого повітря ККД ТЕГ зростає від ~ 3.8% при температурі +50°C до ~ 7.2% при температурі - 40°C, що відповідає значенням електричної потужності ТЕГ 1.2 кВт та 3.1 кВт.

Тому експлуатація автомобілів з ТЕГ є більш ефективною в кліматичних зонах з пониженими температурами повітря.

3. Використання ТЕГ при врахуванні затрат на відвід тепла від нього дає додатково 1.5 - 4% від потужності двигуна у вигляді електричної енергії, що, відповідно може дати біля 2 - 6% економії палива при швидкості руху автомобіля 100 км/год.

Література

1. Anatyshuk 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. Анатичук Л.І. Ефективність термоелектричних рекуператорів тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання. / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика 2011. – № 4 – С.78-83.
3. Анатичук Л.І. Термоелектричний генератор для бензинового двигуна. / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика 2012. – № 2 – С. 93 – 100.
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. Сучасний стан технології термоелектричного генерування потужності в Японії / Т. Кадзикава // Термоелектрика. – 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. – P. 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», Berlin, 2008 г.
14. PTC Mathcad – Engineering Calculations Software. www.ptc.com.
15. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.
16. Хромов С.П. Метеорологический словарь. / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова // Ленинград, Гидрометеоздат, 1974

Надійшла до редакції 12.06.2014