

УДК 536



Кузь Р. В.

Кузь Р. В. канд. фіз.-мат. наук

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. АНАЛІЗ ПРАКТИЧНИХ ДОСЯГНЕНЬ

У роботі наводяться результати аналізу експериментальних робіт, що стосуються використання термоелектричних генераторів у сукупності з двигунами внутрішнього згорання на автотранспорті з метою отримання додаткової електричної енергії і, відповідно, економії палива. Розглянуто розвиток і сучасний стан розробок таких генераторів. Зроблено висновки про можливості і необхідні умови для використання термоелектричних генераторів з двигунами внутрішнього згорання. Бібл. 77.

Ключові слова: термоелектричний генератор, двигун внутрішнього згорання, утилізація тепла.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Застосування термоелектричних генераторів для утилізації тепла автомобільних двигунів з метою отримання електричної енергії на протязі останніх трьох десятиріч залишається предметом підвищеного інтересу з боку автомобільної індустрії та спеціалістів, що займаються термоелектрикою. Про це свідчить велика кількість публікацій, патентів та доповідей на конференціях [1]. Така зацікавленість є зрозумілою, оскільки більше 2/3 теплової енергії, що отримується від спалення палива, віддається в навколишнє середовище.

Як видно, тільки з вихлопними газами втрачається 30-35% теплової енергії. За даними ОПЕК (організація країн-експортерів нафти) у даний час у світі зареєстровано біля 1.2 млрд. одиниць автотранспорту. Його доля у світовому споживанні нафти сягає 65%, або ~65 млн. барелів в день [2]. Тобто, з вихлопними газами автотранспорту щоденно втрачається $\sim 10^{17}$ Дж теплової енергії. Перетворення цієї енергії в електричну з ККД 10% дасть величину, що за порядком збігається з кількістю електроенергії, що наразі виробляється усіма атомними електростанціями світу [3]. Така ситуація зумовлює розробки термоелектричних генераторів для автотранспорту. Утилізацією тепла вихлопних газів реалізуються дві основні цілі. Це економія палива і, відповідно, зменшення викиду в атмосферу вуглекислого газу.

Початком ери термоелектричних генераторів для автотранспорту можна вважати 1961 рік, коли **Інститутом Naval**, США подано патент на термоелектричний генератор, який може працювати від тепла вихлопних газів [4]. Перший термоелектричний генератор, що використовує тепло вихлопних газів, було представлено співробітниками інституту на Конгресі автомобільної інженерії в Детройті в 1963 році [5].

У 1988 році на 7-ій Міжнародній конференції з термоелектрики **Університет Karlsruhe**, Німеччина, представив термоелектричний генератор на основі матеріалів з FeSi_2 [6]. Генератор випробувано на двигуні Porsche 944 потужністю 160 кВт. Охолодження генератора здійснювалося водоциркуляційною системою автомобіля. На максимальній потужності роботи двигуна отримано наступні результати. Теплова потужність вихлопного газу 120 кВт, температура газу – 800 К, різниця температур – 490 К, вихідна електрична потужність генератора – 58 Вт. Спад температури газу на генераторі складав 30 К, з чого зроблено висновок про можливість використання більшої кількості термоелементів, що не дозволяли габарити вихлопної системи.

На початку 90-х років на основі власних модулів у компанії **Hi-Z**, (США) [7-26] було створено і випробувано термогенератор, у якому використано тепло вихлопних газів дизеля NTC-350 потужністю 300 к.с. Він розвивав електричну потужність 1 кВт. Температура вихлопних газів становила 200-400°C.

Пізніше, у 2004 році, компанія Hi-Z сумісно з Delphi Systems розробили й провели випробування генератора на пікапі Sierra з бензиновим двигуном потужністю 270 к.с. Реально було отримано 228 Вт електричної енергії [27].

В 1993 році **Компанія Shiroki**, (Японія) [28] розробила термоелектричний генератор для автомобіля, де були застосовані блоки модулів компанії Global Thermoelectric (Канада). Матеріал модулів – Pb-Te. Генератор мав форму циліндра діаметром 190 мм і висотою 180 мм. Вага генератора 5.8 кг. Генератор було встановлено на бензиновому двигуні об'ємом 2000 см³. На холостому ходу він розвивав електричну потужність 1 Вт, при швидкості 40-60 км/год по рівній дорозі 10-20 Вт, при швидкості 60-65 км/год на підйомі до 130 Вт.

Компанія **Nissan Motor**, (Японія) [29] у 1998 році розробила і випробувала генератор з термоелектричними перетворювачами Ge-Si. Генератор виконано у вигляді плоскої прямокутної камери з внутрішньою оболонкою для проходження газів і ребристими радіаторами для відведення тепла від газів. Знімання тепла проводиться водою, що пропускається через зовнішню оболонку. Генератор випробувано на бензиновому двигуні об'ємом 3 л. При температурі вихлопного газу 592°C і температурі охолоджуючої рідини 35°C генератор розвивав потужність 35.6 Вт. При цьому теплова потужність через генератор складала 4 кВт. У 2001 році компанією запатентовано систему електричного живлення автомобіля, яка містить термоелектричний генератор [30].

У 2000-х роках **компанією Komatsu**, (Японія) [31] створено прототип ТЕГ для дизельного двигуна термосифонного типу. Він містив випаровувач з конденсатором що

утворювали термосифон. Цим досягався інтенсивний перенос тепла від вихлопного газу до модулів. Відвід тепла від модулів здійснювався водою. Випробування генератора проводилося на стенді, який імітував теплові умови в генераторі. Досягнуто 3.35 кВт електричної енергії при ККД модулів 4.3 %.

З використанням таких модулів був створений генератор, установлений на автомобілі з бензиновим двигуном об'ємом 2000 см³. При швидкості 60 км/год генератор розвивав 266 Вт.

Дослідження виконувалося в рамках «Національного проекту по розвитку вдосконалених систем термоелектричного поєднання енергії».

У 2001 році **Університет Monash**, (Австралія) [32 – 33] презентував макетний зразок термоелектричного генератора з модулів Ni-Z. Джерелом тепла були вихлопні гази від дизельного двигуна потужністю 140 кВт. Загальна електрична потужність генератора склала 42.3 Вт. Наводились міркування про перспективність використання термоелектрики для утилізації тепла від двигунів внутрішнього згорання

В Університеті Clarkson, (США) [34 – 39] у 2004 році розроблено термоелектричний генератора для автомобіля потужністю 300 Вт. Для генератора були використані модулі компанії Ni-Z. Генератор випробувано на пікапі General Motors Sierra, що містить V8 двигун потужністю 200 кВт. Найбільше значення вихідної електричної потужності генератора 225.1 Вт досягнуто при швидкості автомобіля 112.65 км/год. Температура гарячого газу 530°C, температура охолоджуючої рідини 86.7°C.

Компанія Gentherm, (США) [40 – 56] з 2004 року по 2011 рік з ініціативи Міністерства енергетики США у рамках програми «Утилізація тепла вихлопних газів» виконувала програму по створенню термоелектричного генератора для легкового автомобіля. Створено генератори, які встановлено на автомобілі **BMW** та Ford Lincoln MKT. В автомобілі BMW X6 при потужності бензинового двигуна 225 кВт генератор розвиває максимальну потужність 450 Вт. При їзді в умовах міста генератор розвиває середню потужність 200 Вт. Генератор для автомобіля **Ford Lincoln MKT** з бензиновим двигуном потужністю 260 кВт при максимальній температурі вихлопних газів розвиває потужність близько 600 Вт.

У 2007 році **Національний інститут вищої індустріальної технології й науки**, (Японія) [57] разом з компанією **Atsumitec** розробили термоелектричний матеріал і модулі на основі Fe-V-Ti-Al. Модулі були використані в генераторі, встановленому на мотоциклі, який розвивав електричну потужність до 12 Вт при швидкості 60 км/год, що було цілком достатньо для підзарядки акумуляторів.

У 2008 році **Університет Арістотеля**, (Греція) [58-59] представив результати досліджень генератора для легкового автомобіля, що складається зі стандартних модулів Melcor 2.5 × 2.5 см². Конструкція генератора містить теплообмінне обладнання для відводу тепла від циліндричної вихлопної труби, термоелектричні модулі й повітряний радіатор. Генератор установлений на автомобілі Toyota Starlet з об'ємом двигуна 1.3 л. Генератор установлювався в різних частинах вихлопної труби. Вивчалася робота генератора при різних швидкостях руху автомобіля.

Отримані значення електричної потужності від 0.5 до 1.5 Вт. Робиться висновок, що

установка серії таких генераторів уздовж вихлопної труби дозволить одержати електричну потужність близько 30 Вт. Проведені найпростіші розрахунки генератора, робляться припущення, що вартість генератора може бути повернута у вигляді економії палива протягом 2 – 3 років при експлуатації автомобіля 10000 км на рік.

Роботи по дослідженню і створенню генератора для автомобіля проводилися в **Університеті Кракова** разом з **Познанським університетом**, (Польща) [60-62]. У 2007 році вивчено можливості відводу тепла від вихлопних газів. Розроблено теплообмінні системи для двигуна 1.3 л, через які відводилося до 25 кВт теплової потужності. Передбачалося, що при створенні генератора з ККД 5% можна одержати до 750 Вт електричної енергії. У 2010 році створено термоелектричний генератор для дизельного двигуна об'ємом 1.3 л. Генератор розвивав максимальну потужність 200 Вт. При цьому теплова потужність вихлопних газів складала 35 кВт. Гаряча температура на вході генератора 290°C.

У 2008 році **компанія Volkswagen**, (Німеччина) [63] презентувала на конференції «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie» у Берліні автомобіль Volkswagen Golf Plus з установленим термоелектричним генератором. Компанія Volkswagen заявила, що отримано 600 Вт електричної енергії в умовах руху по автостраді. Ця потужність становить близько 30% від потужності, необхідної для живлення електричних приладів автомобіля.

Компанія BMW, (Німеччина) [64, 65] в жовтні 2008 року представила термоелектричний генератор для використання тепла вихлопних газів автомобіля, розроблений разом з **DLR** (аерокосмічним центром Німеччини). Було досягнуто 200 Вт середньої електричної потужності при потужності бензинового двигуна 225 кВт. Максимальна потужність 800 Вт досягалася при швидкості автомобіля 135 км/год. Генератор успішно працював при пробігу по автостраді більш ніж 12000 км. Відвід тепла від генератора забезпечувався додатковою системою охолодження. Температура в холодному контурі становила 60°C, тепло розсіювалося двома додатковими радіаторами, розміщеними в надколісних дугах. Випробуванню генератора передували ретельні теоретичні розрахунки, вимірювання температур та потоку вихлопного газу в різних місцях вихлопної системи та в різних режимах роботи. Подальші дослідження ТЕГ були зосереджені на досягненні питомої потужності 50 Вт/кг. (Зараз 25 Вт/кг). У 2012 році генератор демонструвався на міжнародній конференції з термоелектрики ICT/ECT-2012.

Університетами Chunguk, та **Yonsei**, (Корея) [66-67] проведено ряд сумісних робіт по створенню термоелектричних генераторів для гібридних автомобілів. У 2011 році представлено термоелектричний генератор для гібридного автомобіля з бензиновим двигуном об'ємом 2 л. Генератор розвивав потужність 75 Вт при швидкості автомобіля 80 км/год. Пропонується використовувати такий генератор замість стандартного автомобільного генератора.

У 2012 році **дослідний центр FIAT**, (Італія) [68] представив прототип термоелектричного генератора для легкої вантажівки з дизельним двигуном об'ємом 2.3 л. Генератор розвивав максимальну електричну потужність 1 кВт при швидкості вантажівки 130 км/год. При цьому температура вихлопного газу на вході генератора складала 450 °C.

Температура охолоджуючої рідини 110-130°C. В генераторі використано 504 модулі на основі *Bi-Te* розмірами 16 × 16 × 6.8 мм.

У 2014 році **Вуханським технологічним університетом**, (Китай) [69-70] представлено термоелектричний генератор для бензинового двигуна об'ємом 3.9 л. В генераторі використано модулі *Bi-Te*. Габарити генератора складала 1420 × 670 × 185 мм. При потужності двигуна 35 кВт генератор розвивав електричну потужність 390 Вт. Зроблено висновки про необхідність оптимізації гарячого теплообмінника.

В розробках, проведених в **Університеті Гонконгу**, (Китай) [71] звертається особлива увага на перетворювачі струму та напруги для термоелектричних генераторів, що використовуються в різних режимах роботи. Розробляються різні схеми та алгоритми роботи таких перетворючів, в яких використано МРРТ технологію – відслідковування точки максимальної потужності у нестационарному режимі роботи. Робляться висновки про можливість збільшення ефективності генератора на 20% при використанні МРРТ технології. Аналогічні роботи ведуться в **університеті Глазго**, (Великобританія) [72].

У 2015 році **Університет Boise**, США [73] представив термоелектричний генератор максимальною потужністю 1 кВт, що працює від тепла вихлопних газів бензинового двигуна. Термоелектричні модулі генератора виготовлено з наноструктурованих напів-Гейслерових елементів. Гаряча температура на вході генератора складала 600°C. Холодна температура підтримувалася на рівні 100°C. Потік газу – 480 г/с.

За ініціативи компанії **Scania**, (Швеція), в **університеті Лінчепінга**, (Швеція) [74] було проведено дослідження по знаходженню найбільш придатних матеріалів для використання у термоелектричному генераторі для вантажівки Scania. Сумісно з німецькою компанією **Eberspächer Exhaust Technology** спроектовано ТЕГ та проведено його інтеграцію у вантажівку Scania. Вантажівку з ТЕГ було представлено у 2015 році на Міжнародній термоелектричній конференції ICT/ECT-2015 у Дрездені [75]. За результатами випробувань ТЕГ розвиває максимальну потужність біля 300 Вт. При цьому потік вихлопного газу складав 1000 кг/год при температурі 300°C. Використана теплова потужність – 18 кВт. Потік охолоджуючої речовини – 30 л/хв при температурі 30°C.

У 2015 році компанія **Friedrich Boysen GmbH**, (Німеччина) [76] представила термоелектричний генератор для дизельного двигуна легкового автомобіля. Основний акцент у роботі віддано проектуванню гарячого теплообмінника з метою інтенсифікації теплообміну, зменшенню теплових втрат та зниженню зворотнього тиску у вихлопній системі. Випробувано 2 типи генератора – з модулями на основі PbTe та з модулями на основі Bi-Te. Генератор розвиває максимальну потужність 80 Вт з модулями на основі PbTe при вхідній температурі гарячого газу 700°C і потоці 50 кг/год. Аналогічну потужність розвиває генератор з модулями на основі Bi-Te при температурі гарячого газу 600°C і потоці 43,2 кг/год. Температура холодного теплообмінника підтримувалася 47°C і забезпечувалася зовнішньою системою охолодження.

Успіхи у проектуванні та створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту приведено у таблиці.

Таблиця 1

Досягнення у створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту

Компанія	Потужність (об'єм) двигуна	Тип двигуна	Потужність ТЕГ, Вт	ККД ТЕГ, %*	Питома вартість ТEG, \$/Вт**	Літера- тура
Університет Karlsruhe, Німеччина	160 кВт	бензин	58	0,1%	-	3
Hi-Z, США	220 кВт	дизель	1000	1.1%	32	18-19
Hi-Z, США	198 кВт	бензин	228	0.3%	-	18-19
Shiroki, Японія	(2000 см ³)	бензин	130	0.3%	-	24
Nissan Motor, Японія	(3000 см ³)	бензин	35.6	0.1%	-	25-26
Komatsu, Японія	(2000 см ³)	бензин	266	0.4%	-	28
Університет Monash, Австралія	140 кВт	дизель	42.3	0.1%	-	29-30
Університет Clarkson, США	200 кВт	бензин	225	0.3%	70	27
Gentherm, США	225 кВт	бензин	450	0.5%	-	51
Gentherm, США	260 кВт	бензин	600	0.6%	-	52
Atsumitec, Японія	-	бензин	12	-	25	72
Університет Арістотеля, Греція	(1300 см ³)	бензин	30	0.1%	65	73-74
Університет Кракова, Польща	(1300 см ³)	дизель	200	0.8%	-	77-79
Volkswagen, Німеччина	90 кВт	бензин	600	<u>1.7%</u>	24	75
BMW, Німеччина	225 кВт	бензин	800	1%	29	109
Університет Chunguk, Корея	(2000 см ³)	бензин	75	0.2%	-	94-95
FIAT, Італія	(2300 см ³)	дизель	1000	<u>1.7%</u>	25	87
Вуханський університет, Китай	(3900 см ³)	бензин	390	1.3%	30	96-97
Університет Boise, США	220 кВт	бензин	1000	1.4%	26	93
Scania, Швеція	220 кВт	дизель	300	0.4%	-	55-56
Friedrich Boysen GmbH, Німеччина	90 кВт	бензин	80	1.6%	23	112

*Оцінки ККД ТЕГ зроблено на основі наведених у посиланнях даних про потужність та тип двигуна, на якому було встановлено генератор, чи на основі вказаних параметрів вихлопного газу.

**Оцінки питомої вартості ТЕГ зроблено на основі наведеної у посиланнях інформації про використані термоелектричні модулі виходячи з того, що вони складають ~40% вартості ТЕГ.

У «Багаторічній програмі розвитку автомобільних технологій» відділу Енергоефективності та відновлювальної енергії Міністерства енергетики США [121] аргументація ціни генератора (1 \$/W) сформульована наступним чином:

«Термоелектричні прилади/системи повинні бути конкурентоспроможними з існуючими на даний час технологіями генерації електроенергії в автомобілі та бути доступними для масового виробництва». Як видно, питома вартість термоелектричних генераторів до сьогодення є значно вищою. Цим і пояснюється відсутність широкого застосування ТЕГ в автомобілях.

Проведений аналіз дав наступні результати. Серед оглянутих робіт 15% складають паненти, що стосуються використання термоелектрики для утилізації тепла двигунів внутрішнього згорання. Решта 75% робіт – доповіді на конференціях та у наукових журналах. Серед них:

- огляди та звіти про досягнення у використанні ТЕГ для ДВЗ;
- експериментальні роботи по розробці ТЕГ, які засновані на використанні комп'ютерного моделювання чи спрощених аналітичних моделях;
- експериментальні роботи емпіричного характеру, які використовують тільки основи проектування звичайних термоелектричних генераторів.

Висновки

1. Створені зразки генераторів підтверджують можливість одержання електрики від тепла вихлопних газів. На даний час досягнуто електричні потужності ~ 1 кВт та ККД ~1.7 %.
2. Серед розроблених генераторів ще немає таких, які могли б бути використані для їхнього промислового випуску. На даний час питома вартість генераторів (10 – 60 \$/W) значно перевищує рекомендовану 1 \$/W, яка необхідна для конкурентної спроможності ТЕГ перед іншими джерелами електрики.
3. Немає досліджень, у яких система «двигун-термогенератор» розглядалася б як єдине ціле. Немає даних про вплив термогенератора на роботу двигуна, особливо коли відвід тепла від генератора здійснюється системою охолодження двигуна.
4. Проектування автомобільних термоелектричних генераторів у всіх розглянутих випадках є емпіричним. Проектування засноване на переборі різних варіантів компонентів моделі з метою знаходження найкращого. Однак, такі підходи не виявляють загальних закономірностей, якими описуються ТЕГ, що знижує можливості знаходження оптимальних конструкцій.

Література

1. Анатичук Л. І., Кузь Р. В. Про особливості розвитку робіт по створенню термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів // Термоелектрика, №5. - 2019.
2. https://opec.org/opec_web/en/press_room/28.htm
3. <https://yearbook.enerdata.ru>.
4. US3197342. A.B. Neild Jr. Заявл. 26.09.1961. Опубл. 27.07.1965.
5. Neild Jr. A.B. "Portable thermoelectric generators", Society of Automotive Engineers, New York, SAE-645A, 1963.
6. Birkholz U., Crob E., U. Stohrer, Voss K. Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂-thermoelements // Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion. – Arlington (USA). – 1988. – P. 124-128.
7. Fairbanks J. Vehicular Thermoelectric Applications. // Energy Efficiency Renewable Energy (EERE). – Rockville, Maryland (USA). – 2008.
8. Farmer J.C. White Paper for U.S. Army Rapid Equipping Force: Waste Heat Recovery with Thermoelectric and Lithium-Ion Hybrid Power System. // UCRL-TR-236780. – 2007.
9. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. Predicted Performance of Quantum Well Thermoelectrics for Power Generation. // 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC). – San Diego, CA (USA). – 2006. – P. 1-8.
10. Bass J., Campana R., Elsner N. Thermoelectric Generator for Diesel Trucks. // In Proceedings of the 10th International Conference on Thermoelectrics, D.M. Rowe, ed., p. 127, UK, 1991.
11. Gruen D., Singh D., Routhbort J. Development of High-ZT Bulk Thermoelectric (New Program) // VT Merit Review. – 2008.
12. Ghamaty S., Bass J., Elsner N. Quantum Wells thermoelectric Devices for Diesel Engines. // 22th International Conference on Thermoelectrics ICT 2003. – Vol. 17, № 21. – 2003 P. 563 – 566.
13. Bass J., Elsner N., Leavitt F. Performance of the 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines. // 13th International Conference on Thermoelectrics. – Vol. 316. – P. 295-298.
14. 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.
15. Kush Aleksandr S., John S. Bass, Saeid Ghamaty, Norbert B. Elsner Thermoelectric development at Hi-Z technology // Proc. of 20th International Conference on Thermoelectrics, 2001, pp. 422 – 430.
16. J. C. Bass, Norbert B. Elsner, and F. A. Leavitt, "Performance of the 1kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines," AIP Conference Precedings, vol. 316, pp. 295-298, 1995.

17. Morelli, D.T., Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. In Proceedings of the 15th International Conference on Thermoelectrics, J.-P. Fleurial, ed., 1996, - P.383-386.
18. J. C. Bass, Norbert B. Elsner. Current Thermoelectric Programs at Hi-Z Technology Inc. // Proc. of the 11th International Conference on Thermoelectrics, USA, 1992.
19. J. C. Bass, Norbert B. Elsner, S. Ghamaty. Application of Advanced Thermoelectric Technology to the Diesel Generator // DEER 1997, California, July, 1997. P. 157-161.
20. Ghamaty S., Elsner B. Si/SiGe Quantum Well Thermoelectric Materials and Devices for Waste Heat Recovery From Vehicles and Industrial Plants. // International Symposium on Nano-Thermoelectrics. – Osaka (Japan). – 2007. – P. 1-5.
21. Bass J., Kusch A., Elsner N. Thermoelectric Generator (TEG) for Heavy Diesel Trucks. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. – Beijing (China). – 2001, P. 1-6.
22. Kushch A., Bass J., Ghamaty S., Elsner B. Thermoelectric Development at Hi-Z Thechnology. // Proceedings ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics. – Beijing (China). – 2001, P. 422-430.
23. Patent US1235457.
24. Patent US2345633.
25. Patent US3345634.
26. Patent US4345634.
27. Kushch A., Karri M.A., Helenbrook B.F., Richter C., The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck. Proc. of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference, California, USA, 2004.
28. Кадзикава Т. Современное состояние исследований и разработок в сфере технологии термоэлектрического генерирования в Японии // Термоэлектричество. – 2009. – № 1. – С. 18-30.
29. Ikoma K. at al. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles. Proc. of the 17th International Conference on Thermoelectrics, 1988.
30. US6172427B1.
31. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрического генерирования энергии в Японии // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 21-31.
32. Jamil I. Ghogel. Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application // Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08.2005.
33. J.G. Haidar ; J.I. Ghogel. Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators // Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics (Cat. No.01TH8589).
34. Thacher E. F. , B. T. Helenbrook, M. A. Karri, C. J. Richter “Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck” // Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile

- engineering, pp. 95 – 107. 2007.
35. D. Crane. Potential thermoelectric application in diesel vehicles //Proc. DEER Conference, August 24-28, 2003. P. 1 – 6.
 36. LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A., “Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery”, DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA, 2005.
 37. Patent US7231772B2.
 38. Patent US6625990B2.
 39. Patent US7788933B2.
 40. Crane, D., Lagrandeur, J., Jovovic, V., Ranalli, M., Addinger, M., Poliquin, E., Dean, J., Kossakovski, D., Mazar, B., Maranville, C. TEG on-vehicle performance model validation. In Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012: October 16 – 19, 2012, Dearborn, USA.
 41. 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.
 42. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. // Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics. – 2006. – P. 343-348.
 43. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2006 Progress Report. – P. 232-236.
 44. Bell L. Prospects for Broadened Use of Thermoelectrics in the Automotive Vehicles. // Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference. – Irving, Texas (USA). – 2002.
 45. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of Thermoelectric Power Generator with a dynamic Thermal power Source. // J. Energy Resour. Technol. – 2009. – Vol. 131, № 1. – 8 p.
 46. LaGrandeur J. BSST Waste Heat Recovery Program // 2008 DOE FCVT Merit Review. – 2008.
 47. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2006 Progress Report. – P. 232-236.
 48. Bell L. High Power Density Thermoelectric Systems. // Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics. – 2004. – Adelaide, AU.
 49. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery // Proc. of Diesel Engine Emissions Reduction Conference. – Chicago (USA). – P. 1-7. – 2005.
 50. Bell L. Broader Use of Thermoelectric Systems in Vehicles. // Proc. 1th Thermoelectrics

- IAV Conference. – Berlin (Germany). – 2008. – P. 1-14.
51. Crane D. Potential Thermoelectric Applications in Diesel Vehicles. // Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference. – Newport, Rhode Island (USA). – 2003. – P. 1-6.
52. Bell L., LaGrandeur J. High-Efficiency Thermoelectric Waste Energy Recovery System for Passenger Vehicle Applications. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report. – PP. 287-290.
53. Crane D., Bell L. Design to Maximize Performance of a Thermoelectric Power Generator with Dynamic Thermal Power Source. // Proc. of ES2007 Energy Sustainability 2007. – Long Beach, CA (USA). – P. 1-9.
54. Fairbanks J.W. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. // Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics. – Paris (France). – 2008. – P. PL-01.
55. Doug Crane, John Lagrandeur, Vladimir Jovovic, Marco Ranalli, Martin Adldinger, Eric Poliquin, Joe Dean, Dmitri Kossakovski, Boris Mazar, Clay Maranville. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007/s11664-012-2327-8. 2012.
56. F. Frobenius, G. Gaiser, U. Rusche, B. Weller. Thermoelectric Generators for the Integration into Automotive Exhaust Systems for Passenger Cars and Commercial Vehicles. Journal of ELECTRONIC MATERIALS DOI: 10.1007/s11664-015-4059-z. 2015.
57. Mikami M. Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. Development of high-strength Fe₂VAl thermoelectric module designed for motorcycle // Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics. – Jeju (Korea). – 2007. – P. 345-348.
58. Hatzikraniotis E., Zorbas K. Triandafyllis I., Paraskevopoulos K.M. Study of Thermoelectric Power Generators and Applications in a Small Sized Cars // ECT2008 is the 6th European Conference on Thermoelectrics. – Paris (France). – 2008. – P. P2-18.
59. Zorbas K.T., Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos K.M. Power and Efficiency Calculation in Commercial TEG and Application in Wasted Heat Recovery in Automobile // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. – Odessa (Ukraine). – 2007.
60. Wojciechowski K., Merkisz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. Study of Recovery of Waste Heat From the Exhaust of Automobile Engine // Proc. ECT2007 is the 5th European Conference on Thermoelectrics. – Odessa (Ukraine). – 2007.
61. Patent WO12324654.
62. Patent WO98651123.
63. «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie», Берлін 2008.
64. ICT/ECT Joint Conference 2012, July 9-12, 2012, Aalborg, Denmark.
65. Christian Häfele, Michael Schier, Steffen Hahn, Tobias Weiler, Horst Friedrich. Experimentelle Fahrzeug–Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren / Thermoelectrics goes automotive. Jansch, Daniel (Hrsg.) Renningen : expert-Verl. 2011.

66. Sun-kook kim, Byeong-Cheol Won, Seok-Ho Rhi, Shi-Ho Kim, Jeong-Ho Yoo, Ju-Chan Jang. Thermoelectric Power Generation System for Future Hybrid Vehicles Using Hot Exhaust Gas // *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 40, No. 5, 2011. DOI: 10.1007/s11664-011-1569-1.
67. Nyambayar Baatar, Shiho Kim. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles // *TELKOMNIKA*, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523~530.
68. D. Magnetto., G. Vidiella. Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks // 9th European Conference on Thermoelectrics. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063/1.4731598
69. X. Liu, Y.D. Deng, S. Chen, W.S. Wang, Y. Xu, C.Q. Su. A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler // *Case Studies in Thermal Engineering* 2 (2014) 62–66.
70. X. LiuY. D. DengW. S. WangC. Q. Su. Experimental Investigation of Exhaust Thermoelectric System and Application for Vehicle // *Journal of Electronic Materials*, June 2015, Volume 44, Issue 6, pp 2203–2210.
71. 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.
72. Andrea Montecucco, Jonathan Siviter, Andrew R. Knox. A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators // *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia* 75 (2015) 597 – 602.
73. Yanliang Zhang, Martin Cleary, Xiaowei Wang, Nicholas Kempf, Luke Schoensee, Jian Yang, Giri Joshi, Lakshmikanth Meda. High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery // *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 946–950.
74. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A--15/02289—SE. Jonas Coyet Fredrik Borgstrum. Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University, Sweden Linköping, June 2015.
75. 13th European Conference on Thermoelectrics. June 28 - July 2, 2015, Dresden
76. Henry Bosch. From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator // *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 3, 2016. DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.
77. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Vehicle Technologies Program, Multi-year Program Plan, 2011–2015, December 2010; US Department of Energy, Sunshot Vision Study, 2012.

Надійшла до редакції 27.12.2018

Кузь Р.В. канд. физ.-мат. наук

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatykh@gmail.com

**ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОТХОДЫ ТЕПЛА
НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ**

Kuz R.V. cand. phys. - math. Sciences

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatykh@gmail.com

**THERMOELECTRIC GENERATORS FOR VEHICLES.
ANALYSIS OF PRACTICAL ACHIEVEMENTS**

The paper presents the results of the analysis of experimental work related to the use of thermoelectric generators in conjunction with internal combustion engines in vehicles in order to obtain additional electrical energy and, accordingly, to save fuel. The progress and current state of the development of such generators are considered. Conclusions are made about the possibility and necessary conditions for the use of thermoelectric generators with internal combustion engines. Bibl. 21

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

References

1. Anatykhuk L.I., Kuz R.V. (2019). About the peculiarities of progress in the works to create thermoelectric recuperators for vehicles. *J. Thermoelectricity*, 5.
2. https://opec.org/opec_web/en/press_room/28.htm
3. <https://yearbook.enerdata.ru>.
4. US3197342 A.B. Neild Jr. Filed 26.09.1961. Publ. 27.07.1965.
5. Neild Jr. A.B. (1963). Portable thermoelectric generators. *Society of Automotive Engineers*. New York, SAE-645A.

6. Birkholz U., Crob E., Stohrer U., Voss K. (1988). Conversion of waste exhaust heat in automobiles using FeSi₂-thermoelements. *Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion* (USA, Arlington, 1988, 124-128).
7. Farmer J.C. (2007). White paper for U.S. Army rapid equipping force: waste heat recovery with thermoelectric and lithium-ion hybrid power system. *UCRL-TR-236780*.
8. Krommenhoek D., Ghamaty S., Bass J., Elsner N., Jovanovich V. (2006). Predicted performance of quantum well thermoelectrics for power generation. *4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)* (San Diego, CA, USA, 1-8).
9. Bass J., Campana R., Elsner N. (1991). Thermoelectric generator for diesel trucks. *Proc. 10th International Conference on Thermoelectrics* (UK, 1991).
10. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. (2005). Diesel truck thermoelectric generator. *Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report*, 301-305.
11. Kush Aleksandr S., Bass John S., Ghamaty Saeid, Elsner Norbert B. (2001). Thermoelectric development at Hi-Z technology. *Proc. 20th International Conference on Thermoelectrics*, 422 – 430.
12. Bass J. C., Elsner Norbert B. and Leavitt F. A. (1995). Performance of the 1kW thermoelectric generator for diesel engines. *AIP Conference Proceedings*, 316, 295-298.
13. Morelli D.T. (1996). Potential applications of advanced thermoelectrics in the automobile industry. *Proc. of the 15th International Conference on Thermoelectrics*, P.383-386.
14. Bass J. C., Elsner Norbert B., Ghamaty S. (1997). Application of advanced thermoelectric technology to the diesel generator. *DEER* (California, July, 1997, 157-161).
15. Ghamaty S., Elsner B. (2007). Si/SiGe quantum well thermoelectric materials and devices for waste heat recovery from vehicles and industrial plants. *International Symposium on Nano-Thermoelectrics*. (Osaka, Japan, 1-5).
16. Bass J., Kusch A., Elsner N. (2001). Thermoelectric generator (TEG) for heavy diesel trucks. *Proc. ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics*. (Beijing, China, 1-6).
17. Kushch A., Bass J., Ghamaty S., Elsner B. (2001). Thermoelectric development at Hi-Z Technology. *Proc. ICT 2001 XX International Conference on Thermoelectrics* (Beijing, China, 422-430).
18. Patent US1235457.
19. Patent US2345633.
20. Patent US3345634.
21. Patent US4345634.
22. Kushch A., Karri M.A., Helenbrook B.F., Richter C. (2004). The effects of an exhaust thermoelectric generator of a GM Sierra pickup truck. *Proc. Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference* (California, USA).

23. Kajikawa T. (2009). Current state of research and developments in the sphere of technology of thermoelectric generation in Japan. *J. Thermoelectricity*, 1, 18-30.
24. Ikoma K., et al. (1988). Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles. *Proc. 17th International Conference on Thermoelectrics*.
25. US Patent US6172427B1.
26. Kajikawa T. (2007). Current state of technology of thermoelectric energy generation in Japan. *J. Thermoelectricity*, 2, 21-31.
27. Ghogel Jamil I. (2005). Thermal and environmental assessment of a conceptual waste heat recovery system for automotive application. *Proc. ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design* (Melbourne, Australia, 15-18.08).
28. Haidar J.G., Ghogel J.I. (2001). Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators. *Proc. ICT2001 20 International Conference on Thermoelectrics* (Cat. No.01TH8589).
29. Thacher E. F., Helenbrook B.T., Karri M. A., Richter C. J. (2007). Testing of an automobile thermoelectric generator in a light truck. *Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile engineering*, 95 – 107.
30. Crane D. (2003). Potential thermoelectric application in diesel vehicles. *Proc. DEER Conference* (August 24-28, 2003, 1 – 6).
31. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. (2005). Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery. *DEER Conference* (Chicago, IL, USA).
32. Patent US7231772B2.
33. Patent US6625990B2.
34. Patent US7788933B2.
35. Crane D., Lagrandeur J., Jovovic V., Ranalli M., Adldinger M., Poliquin E., Dean J., Kossakovski D., Mazar B., Maranville C. (2012). TEG on-vehicle performance model validation. In *Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012* (October 16 – 19, 2012, Dearborn, USA).
36. Crane D., Bell L. (2006). Progress towards maximizing the performance of a thermoelectric power generator. *Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics*. (Vienna, Austria, 11-16).
37. LaGrandeur J., Crane D., Hung S., Mazar B., Eder A. (2006). Automotive waste heat conversion to electric power using skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe. *Proc. 2006 International Conference on Thermoelectrics*, 343-348.
38. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. (2006). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*, 232-236.
39. Bell L. (2002). Prospects for broadened use of thermoelectrics in the automotive vehicles. *Proc. Next Generation Thermal Management Materials and Systems Conference* (Irving, Texas, USA).
40. Crane D., Bell L. (2009). Design to maximize performance of thermoelectric power generator with a dynamic thermal power source. *J. Energy Resour. Technol.*, 131 (1), 8 p.

41. LaGrandeur J. (2008). BSST waste heat recovery program. *DOE FCVT Merit Review*.
42. LaGrandeur J., Crane D., Bell L., Hung S., Mazar B., Eder A. (2006). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies*. – *FY 2006 Progress Report*, 232-236.
43. Bell L. (2004). High power density thermoelectric systems. *Proc. 23rd International Conference on Thermoelectrics* (Adelaide, AU).
44. LaGrandeur J., Crane D., Eder A. (2005). Vehicle fuel economy improvement through thermoelectric waste heat recovery. *Proc. Diesel Engine Emissions Reduction Conference*. (Chicago, USA, 1-7).
45. Bell L. (2008). Broader use of thermoelectric systems in vehicles (2008). *Proc. 11th Thermoelectrics IAV Conference* (Berlin, Germany, 1-14).
46. Crane D. (2003). Potential thermoelectric applications in diesel vehicles. *Proc. of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction (DEER) Conference* (Newport, Rhode Island, USA, 1-6.)
47. Bell L., LaGrandeur J. (2005). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle applications. *Advanced Combustion Engine Technologies*. – *FY 2005 Progress Report*, 287-290.
48. Crane D., Bell L. (2007). Design to maximize performance of a thermoelectric power generator with dynamic thermal power source. *Proc. ES2007 Energy Sustainability*. (Long Beach, CA, USA, 1-9).
49. Fairbanks J.W. (2008). Thermoelectric applications in vehicles status 2008. *Proc. 6th European Conference on Thermoelectrics* (Paris, France, PL-01).
50. Crane Doug, Lagrandeur John, Jovovic Vladimir, Ranalli Marco, Adldinger Martin, Poliquin Eric, Dean Joe, Kossakovski Dmitri, Mazar Boris, Maranville Clay (2012). TEG on-vehicle performance and model validation and what it means for further TEG development. *J. Electronic Materials* DOI: 10.1007/s11664-012-2327-8. 2012.
51. Frobenius F., Gaiser G., Rusche U., Weller B. (2015). Thermoelectric generators for the integration into automotive exhaust systems for passenger cars and commercial vehicles. *J. Electronic Materials* DOI: 10.1007/s11664-015-4059-z. 2015.
52. Mikami M., Kobayashi K., Kawada T., Kubo K., Uchiyama N. (2007). Development of high-strength Fe₂VA1 thermoelectric module designed for motorcycle. *Proc. ICT 26th International Conference on Thermoelectrics* (Jeju, Korea, 2007, 345-348).
53. Hatzikraniotis E., Zorbas K. Triandafyllis I., Paraskevopoulos K.M. (2008). Study of thermoelectric power generators and applications in a small sized cars. *ECT2008, the 6th European Conference on Thermoelectrics* (Paris, France, 2008, P2-18).
54. Zorbas K.T., Hatzikraniotis E., Paraskevopoulos K.M. (2007). Power and efficiency calculation in commercial TEG and application in wasted heat recovery in automobile. *Proc. ECT2007, the 5th European Conference on Thermoelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007).
55. Wojciechowski K., Merkisz J., Fuc P., Lijewski P., Schmidt M. (2007). Study of recovery of waste heat from the exhaust of automobile engine. *Proc. ECT2007, the 5th European Conference on Ther-*

- thermoelectrics* (Odessa, Ukraine, 2007).
56. Patent WO12324654.
 57. Patent WO98651123.
 58. Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie (Berlin, 2008).
 59. *ICT/ECT Joint Conference 2012* (July 9-12, 2012, Aalborg, Denmark).
 60. Häfele Christian, Schier Michael, Hahn Steffen, Weiler Tobias, Horst Friedrich (2011). Experimentelle Fahrzeug–Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren. *Thermoelectrics goes automotive*. Jänsch, Daniel (Hrsg.) Renningen : expert-Verl. 2011.
 61. Kim Sun-Kook, Won Byeong-Cheol, Rhi Seok-Ho, Kim Shi-Ho, Yoo Jeong-Ho, Jang Ju-Chan (2011). Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas. *J.Electronic Materials*, 40(5). DOI: 10.1007/s11664-011-1569-1.
 62. Baatar Nyambayar, Kim Shiho (2011). A thermoelectric generator replacing radiator for internal combustion engine vehicles. *TELKOMNIKA*, 9(3), 523~530.
 63. Magnetto D., Vidiella G. (2012). Reduced energy consumption by massive thermoelectric waste heat recovery in light duty trucks. *9th European Conference on Thermoelectrics*. AIP Conf. Proc. 1449, 471-474 (2012); doi: 10.1063/1.4731598
 64. Liu X., Deng Y.D., Chen S., Wang W.S., Xu Y., Su C.Q. (2014). A case study on compatibility of automotive exhaust thermoelectric generation system, catalytic converter and muffler. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 62–66.
 65. Liu Y. X., Deng W. S. Wang C. Q. Su. (2015). Experimental investigation of exhaust thermoelectric system and application for vehicle. *J.Electronic Materials*, 44 (6), 2203–2210.
 66. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. (2008). Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *J. Asian Electric Vehicles*, 6(2), 1119-1124.
 67. Montecucco Andrea, Siviter Jonathan, Knox Andrew R.(2015). A combined heat and power system for solid-fuel stoves using thermoelectric generators. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015. Energy Procedia*, 75, 597 – 602.
 68. Zhang Yanliang, Cleary Martin, Wang Xiaowei, Kempf Nicholas, Schoensee Luke, Yang Jian, Joshi Giri, Meda Lakshmikanth (2015). High-temperature and high-power-density nanostructured thermoelectric generator for automotive waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 105, 946–950.
 69. Waste heat recovery system with new thermoelectric materials. LIU-IEI-TEK-A--15/02289—SE. Jonas Coyet Fredrik Borgström. *Master Thesis Department of Management and Engineering Linköping University*, Sweden Linköping, June 2015.
 70. *13th European Conference on Thermoelectrics* (June 28 - July 2, 2015, Dresden).
 71. Bosch Henry (2016). From modules to a generator: an integrated heat exchanger concept for car applications of a thermoelectric generator. *J. Electronic Materials*, 45(3). DOI: 10.1007/s11664-015-4129-2.

Submitted 27.12.2018