



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}Кузь Р.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

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

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна



Кузь Р.В.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ РЕКУПЕРАТОРІВ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУР ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА

У роботі наводяться результати аналізу термоелектричних рекуператорів теплових відходів для діапазону температур теплоносія 100 -300°C. На основі комп'ютерної моделі проведено оптимізацію секційних рекуператорів, розраховано ККД кожної секції та рекуператора в цілому. Розраховано питому вартість та час окупності секційних генераторів. Зроблено висновки про економічну доцільність використання таких рекуператорів. Бібл. 130, рис. 9, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричний рекуператор, відпрацьоване тепло, ККД, потужність, питома вартість.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Більшість типів обладнання для технологічних процесів в промисловості, теплові машини (турбіни, двигуни внутрішнього згоряння та ін.) під час своєї роботи утворюють велику кількість теплових відходів. При цьому більше половини цього тепла не тільки ніяк не використовується, а й призводить до негативних наслідків для навколишнього середовища – до його термального забруднення [1 – 4]. При цьому більшість теплових відходів (біля 90 %) мають температуру до 300°C (рис.1). Це зумовлює актуальність створення рекуператорів відпрацьованого тепла на цей рівень температур.

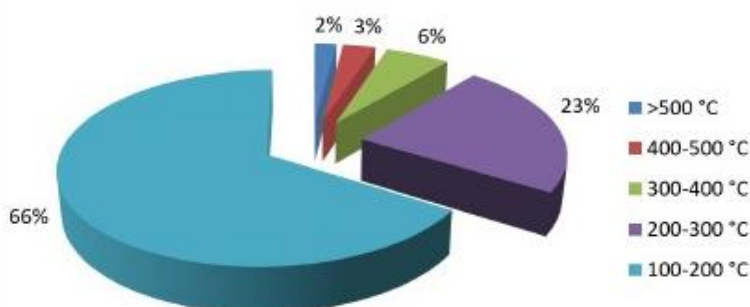


Рис. 1. Розподіл джерел відходів тепла за температурним діапазоном [6].

Найбільш популярними способами перетворення теплової енергії в електричну є механічні. У таблиці наведено їх характеристики. Як видно з таблиці, механічні способи є ефективними при високих температурах. При низьких температурах (до 300 °C) вони значно втрачають свою ефективність чи взагалі не працюють. Ще одним з їх недоліків є необхідність використання

грозмізкого обладнання (котли, випаровувачі, турбіни). При таких обставинах пряме перетворення теплової енергії в електричну за допомогою термоелектрики може стати конкурентним механічним способам.

Таблиця

Механічні методи перетворення відходів тепла в електричну енергію [7- 11]

№ з/п	Метод	ККД	Робочі температури	Вартість електроенергії	Термін служби
1.	Цикл Ренкіна	20-30%	> 350 °C	0.8 – 1.8 \$ / Вт	15 - 20 років
2.	Цикл Каліні	~ 15%	100 – 540 °C	1.2 – 1.8 \$/Вт	20 - 30 років
3.	Органічний цикл Ренкіна	~ 8-15%	100 – 590 °C	1.4 – 2.2 \$/Вт	20 - 30 років

Тому метою роботи є встановити загальні властивості, яким мають відповідати термоелектричні рекуператори, що забезпечать їх раціональне використання.

На відміну від термоелектричних генераторів, в яких використовуються вартісні джерела тепла і для яких основним критерієм ефективності є їх коефіцієнт корисної дії, термоелектричні рекуператори використовують відходи тепла. Тому до визначення їх ефективності потрібно застосовувати інші підходи, а саме встановити їх питому вартість та час окупності [129].

Відомі термоелектричні рекуператори відходів тепла

На основі аналізу літературних даних можна виділити найбільш поширені у даний час напрями використання термоелектричних рекуператорів тепла: промислові установки, двигуни внутрішнього згоряння, теплові електростанції, бойлери, газові турбіни, побутове тепло. Активно досліджуються рекуператори відпрацьованого тепла [43 – 51] від таких енергоємних промислових об'єктів, як сталеварні заводи [26, 36 – 41, 54, 55], цементні печі [27-35, 38-40, 52, 54], скловарні печі [38 – 40, 52], печі для відпалу вапна [38, 39, 52], печі для виготовлення етилену [38, 39], сміттеперероблювальні заводи [104, 105], печі для виплавки алюмінію і інших металів [38, 39, 52].

Так вченими компаній KELK Ltd. і JFE Steel Corporation (Японія) [36, 37] спільно був створений і випробуваний термоелектричний рекуператор з використанням відходів тепла від сталеварної печі. Його потужність складає біля 9 кВт при ККД на рівні 8%.

Термоелектричний рекуператор, що використовує відходи тепла від печі для виготовлення цементу був встановлений на заводі Awazu компанії Komatsu (Японія). Потужність такого рекуператора становить біля 10 кВт. Рекуператор відпрацьованого тепла цементних печей [35] розроблено також вченими Інституту досліджень промислових технологій (Тайвань) і Інституту термоелектрики (Україна). Особливістю такого генератора є його розміщення на деякій віддалі від цементної печі, яка обертається, при цьому він не впливає на технологічні процеси всередині печі. Проект по утилізації відходів тепла від сміттепереробних заводів за допомогою термоелектрики був

реалізованих спільними зусиллями компанії Fudzitaka (Японія) і Інституту термоелектрики (Україна) [104, 105].

Велика кількість публікацій присвячена рекуперації тепла від двигунів внутрішнього згорання автомобілів [28, 29, 52, 56 - 103] та мотоциклів [28, 29]. Проте слід відмітити, що використання термоелектричних рекуператорів в легкових автомобілях має низку недоліків [60, 70, 71]. Реальний виграш в потужності є недостатньо вагомим. Це призводить до пошуку більш ефективних застосувань термоелектрики. В першу чергу, перспективним виглядає рекуперація тепла від дизельних двигунів великих кораблів (крім великої потужності, їх перевагою є можливість відводу тепла від термоелектричного перетворювача в оточуючу воду), а також великих вантажівок і спеціальної техніки [75, 80, 82, 93, 97]. Цікавими є також роботи, що присвячені використанню термоелектричних рекуператорів в гібридних автомобілях [71], де енергія, що генерується в режимі роботи двигуна внутрішнього згорання, використовується для підзарядки батарей автомобіля.

В роботі [106] представлені результати досліджень термоелектричного рекуператора тепла, який використовує відпрацьовану теплову енергію від електростанцій компанії Tokyo Electric Power. Спільними зусиллями Komatsu Research Center і KELK [107] створений такий термоелектричний рекуператор і проведені його експериментальні дослідження.

В [38, 39] наведено дослідження термоелектричного рекуператора, який використовує відходи теплової енергії від промислових бойлерів. ККД такого перетворювача досягає 2%.

У Технологічному університеті Брно (Чехія) розроблено термоелектричний рекуператор для утилізації відходів тепла від бойлера, що використовує в якості палива біомасу [108].

Темі утилізації відпрацьованого тепла від газових турбін присвячені роботи [23, 110]. В якості джерела теплової енергії використано викидні гази турбіни перекачувальних станцій на газових магістралях.

В роботах [111-115] приводяться результати розробки термоелектричного рекуператора тепла від згорання біомаси в побутовій кухонній плиті. Перепад температур на термоелектричних модулях створюється з однієї сторони полум'ям, а з другої – водяним баком.

Одним із застосувань термоелектрики для утилізації відпрацьованого тепла є рекуператор, що використовує відходи тепла від процесу сушки біомаси [116]. Потужність, що ним генерується, використовується для живлення вентиляторів, які забезпечують циркуляцію гарячого повітря в такій системі.

Компанією Toshiba розроблений термоелектричний рекуператор для електричного трансформатора [111].

Мініатюрні термоелектричні рекуператори, що використовуються для живлення малопотужної апаратури і датчиків на борту літака розглянуті в роботах [117-122]. Такі пристрої монтуються під крилом літака і використовують гаряче тепло турбіни.

Слід відмітити, що рекуперація тепла від стаціонарно працюючих промислових установок (особливо при температурах нижче 600 К) представляє великий інтерес для термоелектрики, так як дозволяє в повній мірі реалізувати її переваги. Оцінки показують, що тільки в США від тисяч індустріальних процесів щорічно викидається біля 3300 ТДж енергії [38, 53], частину якої за допомогою прямого термоелектричного перетворення енергії можна повернути в активний баланс. Крім того, термоелектричні рекуператори можуть використовуватися не тільки для підвищення загальної ефективності перетворення енергії, але і для забезпечення резервного живлення найбільш відповідальних вузлів промислових установок, що дозволяє значно збільшити їх надійність [23 – 25].

Визначення загальних властивостей термоелектричних рекуператорів

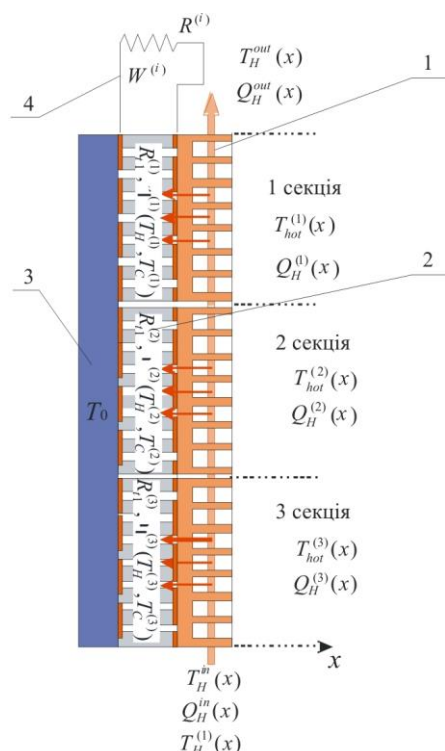


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного секційного рекуператора тепла:

- 1 – гарячий теплообмінник;
2 – термоелектричні батареї
3 – холодний теплообмінник 4 – узгоджене електричне навантаження секції.

Фізичну модель термоелектричного секційного рекуператора тепла показано на рис.2. Кожна секція рекуператора складається з гарячого теплообмінника (1), термоелектричної батареї (2) з тепловим опором $R_{t2}^{(i)}$ і коефіцієнтом корисної дії $\eta(T_H, T_0)$; холодного теплообмінника (3) з температурою T_0 . Термоелектричні батареї кожної із секцій рекуператора навантажені на узгоджене електричне навантаження $R^{(i)}$ (4). Вхідний потік гарячого газу має температуру T_H^{in} та теплову потужність Q_H^{in} . Гарячий газ віддає частину тепла $Q_H^{(i)}(x)$ за температури $T_{hot}^{(i)}(x)$ гарячому теплообміннику. На виході з рекуператора потік газу має температуру T_H^{out} й теплову потужність Q_H^{out} . Від гарячого теплообмінника тепло передається термоелектричній батареї, нагріваючи її гарячу сторону до температури $T_H^{(i)}(x)$. Для розрахунків максимально можливої потужності рекуператора будемо нехтувати тепловими втратами. Для оптимізації ТЕГ необхідно знайти розподіл температур і теплових потоків у термоелектричних батареях кожної із секцій. Такий розрахунок для даної моделі здійснений шляхом застосування чисельних комп'ютерних методів.

Для розрахунків електричної потужності ТЕГ використовуємо рівняння балансу енергії у вигляді

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

Необхідні температури й теплові потоки визначаються з рівняння теплопровідності

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

де κ_{TE} – ефективна теплопровідність термоелектричної батареї, Q_J – тепло Джоуля, яке виділяється в об'ємі термоелектричної батареї.

Граничні умови для (2) будуть мати вигляд

$$Q_H^{in(1)} = Q_H^{in}, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (3)$$

$$Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_t^{(i)}, \quad (4)$$

$$Q_C^{(i)}(x) = (T_0(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}^{(i)}, \quad (5)$$

Сукупність співвідношень (1) – (5) дає можливість визначити розподіл температур $T_H^{(i)}(x)$ і теплових потоків $Q_H^{(i)}(x)$ на кожній із секцій.

Для обмеження гарячої температури модуля тепловий опір $R_t^{(i)}$ між гарячим теплообмінником і термоелектричним модулем визначається з рівняння (4).

Потужність кожної секції й загальний ККД ТЕГ можна визначити з рівнянь

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_0) dx, \quad (6)$$

$$\eta_{TEG} = \frac{1}{Q_H^{in}} \sum_{i=1}^N W^{(i)}. \quad (7)$$

Система рівнянь (1)–(5) розв'язувалася чисельними методами на двомірній сітці скінченних елементів [127].

Для розрахунків ККД термоелектричного рекуператора було обрано термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te*, що є одними із кращих за добротністю в розглянутому діапазоні температур [127].

На першому етапі здійснено оптимізацію гарячих температур секцій рекуператора (Рис. 3). На рис. 4 наведено відносну кількість однотипних термоелектричних модулів у секції для досягнення оптимального розподілу температур.

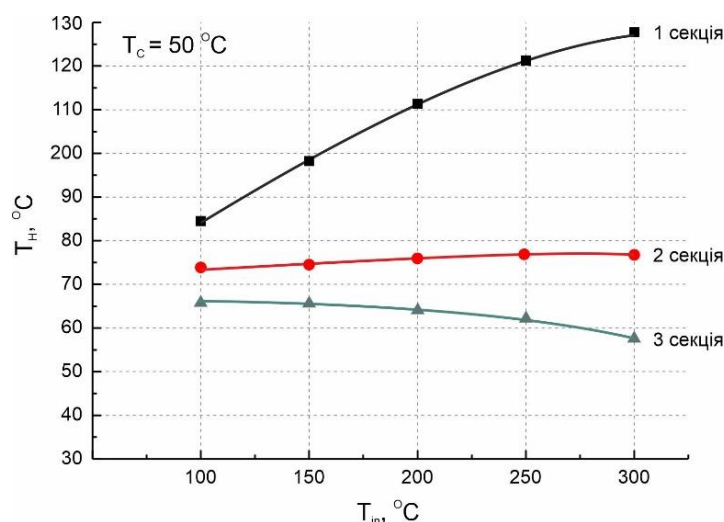


Рис. 3. Залежність оптимальної гарячої температури секцій від температури теплоносія.

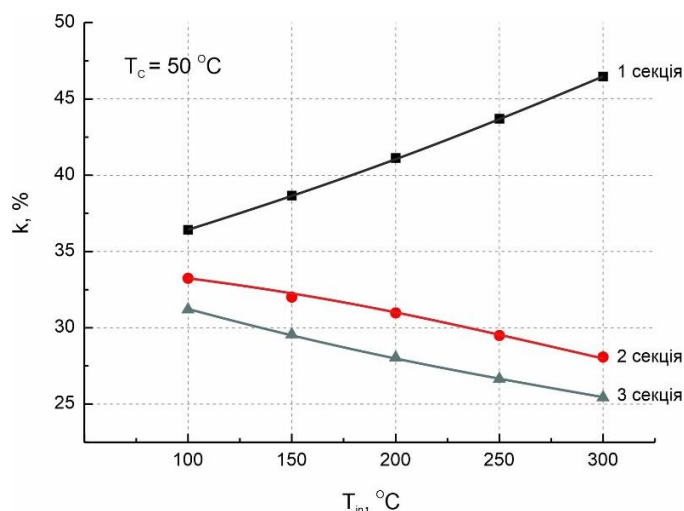


Рис. 4. Відносна кількість термоелектричних модулів у секції для досягнення оптимального розподілу температур.

Наступним кроком є визначення залежності ККД термоелектричних модулів (Рис. 5) і рекуператора в цілому (рис. 6) від температур вхідного теплоносія.

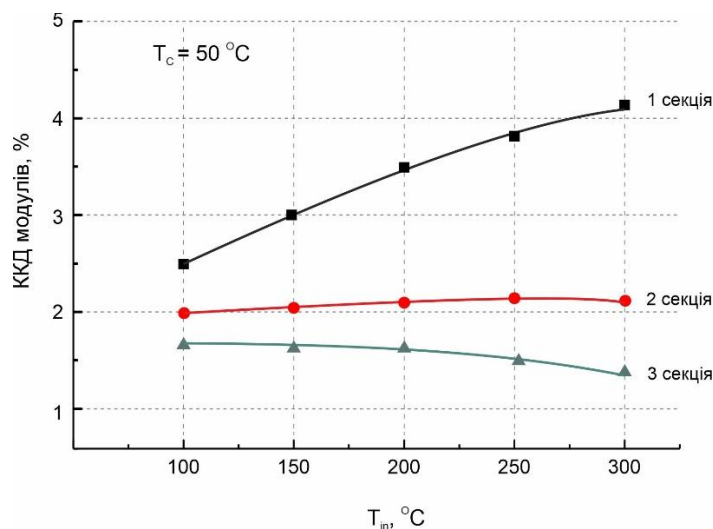


Рис. 5. Залежність ККД модулів секцій від температури вхідного теплоносія.

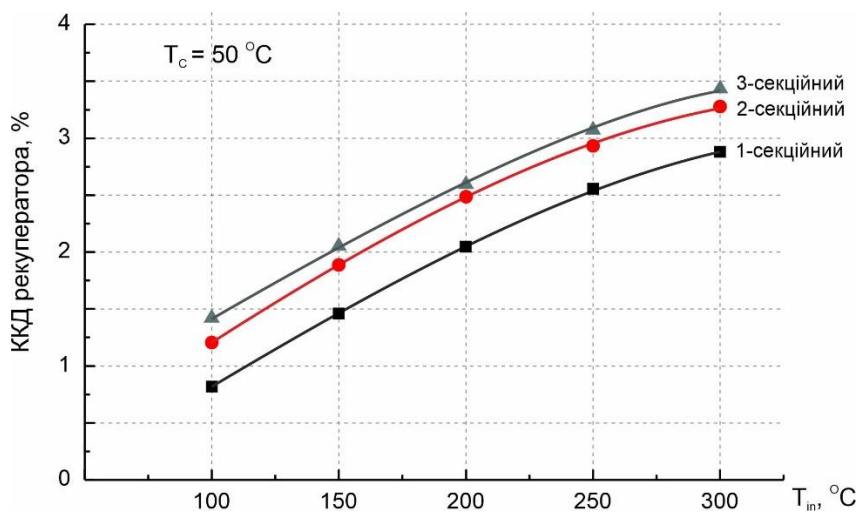


Рис. 6. Залежність ККД рекуператора від температури вхідного теплоносія.

Як видно з рис. 6, використання другої секції термоелектричного рекуператора тепла призводить до збільшення ККД на ~18%, а третьої – усього на 3%.

Відсотковий вклад кожної із секцій термоелектричного рекуператора тепла в його загальну потужність наведено на рис.8. Як видно із рисунка, відсотковий вклад першої секції рекуператора в загальну потужність становить 85 – 90%, другої – 8 – 12%, третьої – близько 2%.

Для оцінки економічної доцільності використання термоелектричного рекуператора розраховано його питому вартість (Рис. 8), ґрунтуючись на результатах, отриманих у роботі [128]. Як видно з рисунка, використання третьої секції в розглянутому діапазоні температур економічно недоцільне. Використання другої секції теж є сумнівним.

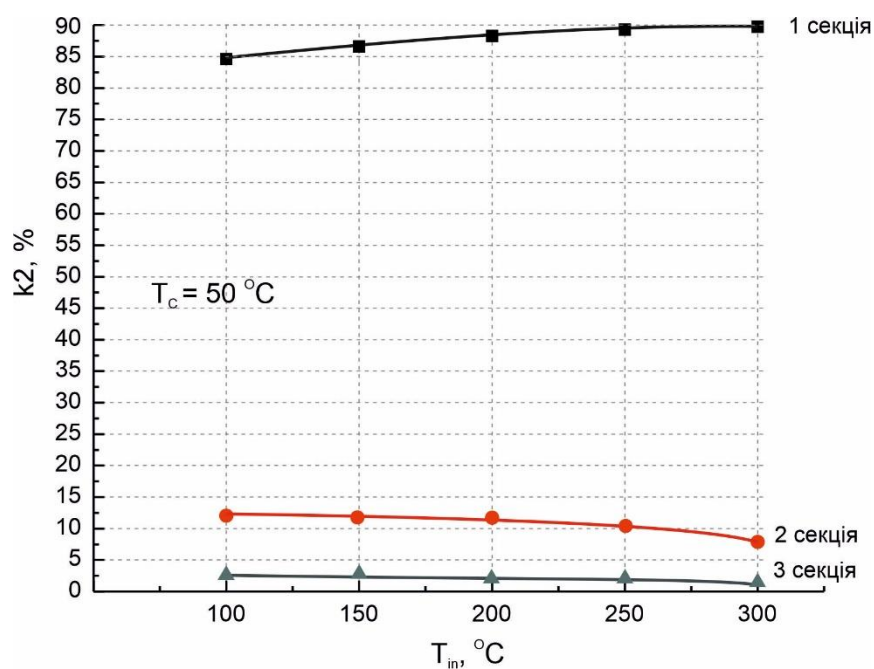


Рис. 7. Вклад кожної з секцій у загальну потужність рекуператора.

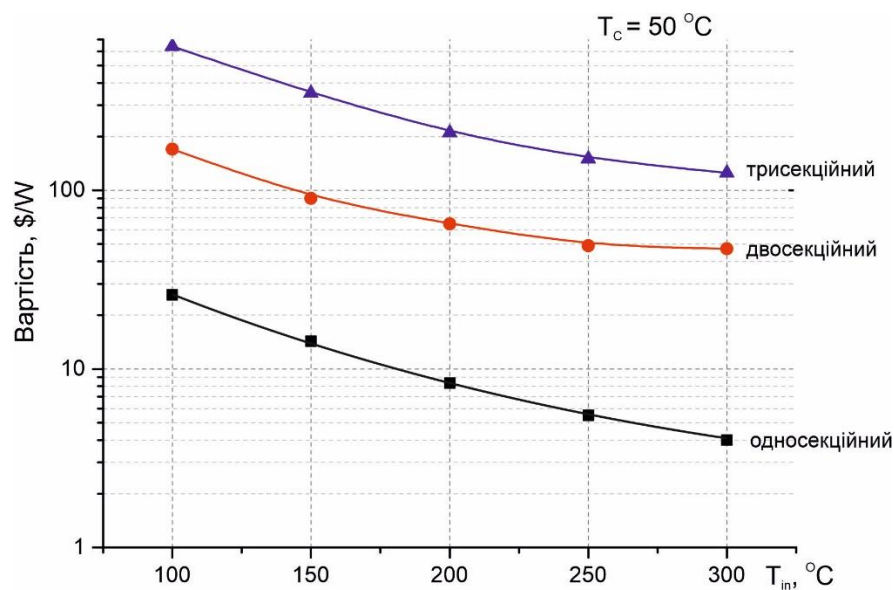


Рис. 8. Питома вартість секційних рекуператорів.

Для кращого розуміння економічної ефективності термоелектричних рекуператорів розрахуємо їх час окупності, виходячи з порівняння вартості їх електричної енергії з вартістю промислової електричної енергії. На рис. 9 наведено результати таких розрахунків. Для прикладу, порівняння було зроблено з середньою вартістю електричної енергії в Україні 0.12 \$/(кВт·год) (за даними компанії Укренерго [130]).

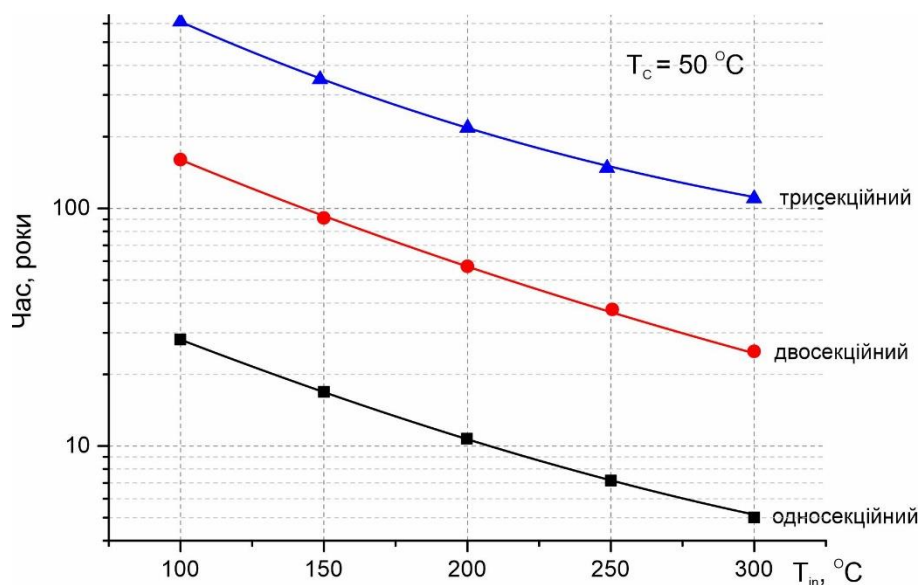


Рис. 9. Час окупності секційних рекуператорів.

З аналізу рис. 9 стає зрозумілим, для означеного діапазону температур (100 – 300 °C) економічно доцільним є використання тільки однієї секції. Незначний вииграш у потужності при застосуванні інших секцій не покриває матеріальних затрат.

Висновки

1. Установлено залежності оптимальних температур секцій рекуператора від температури вхідного газу в діапазоні від 100 до 600 °C. Для першої секції від 37 до 47 °C, другої – від 33 до 27 °C, третьої – від 32 до 25 °C.
2. Визначено кількість термоелектричних перетворювачів у кожній секції для досягнення оптимального розподілу температур у секціях. Для низьких температур вхідного газу) кількість термоперетворювачів у секціях приблизно є однаковою. З підвищенням температур збільшується частка термоперетворювачів у першій секції.
3. Розраховано питому вартість термоелектричного рекуператора та час його окупності. Показано, що вартість кожної наступної секції приблизно на порядок є більшою за вартість попередньої. Тому для діапазону гарячих температур теплоносія 100-300 °C економічно доцільним є використання тільки однієї секції.

Література

1. Rowe, M.D., Gao Min, Williams, S.G.K., Aoune A. ; Matsuura K. ; Kuznetsov V.L. Li Wen Fu. Thermoelectric recovery of waste heat-case studies.– Energy Conversion Engineering Conference, 1997.– vol.2.– p. 1075 – 1079.
2. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization, Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization, USA: DOE, April 18–21, 2005.
3. European Commission. Energy. Energy 2020: Roadmap 2050. – http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm.
4. В. Паньяків. Когенерація: Как это работает // Сети и бизнес. – 2010 г. - №4.
5. Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, Report of BCS, Incorporated,

- USA. – 2008.
6. Cynthia Haddad et al. Some efficient solutions to recover low and medium waste heat: competitiveness of the thermoacoustic technology // *Energy Procedia*. – 2014. – №50. – p. 1056 – 1069.
 7. Arvind C. Thekdi. Waste Heat to Power Economic Tradeoffs and Considerations // *Proc. Of the 3rd Annual Waste Heat to Power Workshop, USA*. – 2007.
 8. Paul Cunningham P.E. Waste Heat/Cogen Opportunities in the Cement Industry // *Cogeneration and Competitive Power Journal*. – 2002. – Vol.17. – №3. – p. 31-51.
 9. S. Quoilinet al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – №22. – p. 68–186.
 10. C. Zhang et al. Implementation of industrial waste heat to power in Southeast Asia: an outlook from the perspective of market potentials, opportunities and success catalysts // *Energy Policy*. – 2017. – №106. – p. 525–535.
 11. Jarosław Milewska, Janusz Krasucki. Comparison of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery in the steel industry // *Journal of Power Technologies*. – 2017. – Vol. 97. – №4. – p. 302–307.
 12. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наук. думка. – 1979. – 768 с.
 13. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы. / А.С. Бернштейн – Москва: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с.
 14. Анатичук Л.І. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.І. Анатичук // *Термоэлектричество*. – 2001. – №1. – С. 3 – 14.
 15. Анатичук Л.І. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.І. Анатичук // *Термоэлектричество*. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
 16. Фреїк Д.М., Никируй Л.І., Криницький О.С. Досягнення і проблеми термоелектрики // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2012. – Т.13. - №2. – С.297-318.
 17. Y. Chen et al. A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery// *Applied Thermal Engineering*. – 2006. – № 26. – p. 2142–2147.
 18. X. Zhang, L. Wu, X. Wang, G. Ju, Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature // *Applied Thermal Engineering*. – 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.108>
 19. R.A. Kishore, S. Priya. A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – №8. – 1433, doi:10.3390/ma11081433.
 20. Wail Aladayleh, Ali Alahmer. Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine // *Journal of Energy*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 495418, <https://doi.org/10.1155/2015/495418>.
 21. Y. Takahashi, K. Yamamoto, M. Nishikawa. Fundamental Performance of Triple Magnetic Circuit Type Cylindrical Thermomagnetic Engine // *Electrical Engineering in Japan*. – 2006. – Vol. 154. – №4.
 22. F. N Huffman, A. H. Sommer, C. L Balestra, D. P. Briere, P. E. Oettinger. High efficiency thermionic converter studies // *NASA Technical Report*. – NASA-CR-135125. – 1976.
 23. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричний рекуператор тепла для газових турбін // XIII Міждержавний семінар «Термоелектрики і їх применение». Санкт-Петербург, Росія, 2012 // XIII Межгосударственный семинар «Термоелектрики и их применения» 13-14 ноября 2012 г. –

- Санкт-Петербург, Россия, 2012.
24. Малыгин Н.Д., Стоянов В.У. Применение термоэлектрического генератора в источнике бесперебойного питания повышенной надежности для особо важных потребителей / Н.Д. Малыгин // Строительство и техногенная безопасность. – 2004. – №9. – С. 153 – 156.
 25. Шостаковский П. Альтернативные источники электрической энергии промышленного применения на основе термоэлектрических генераторов / П. Шостаковский // Control Engineering Россия. – 2013. – №3 (45). – С. 52 – 56.
 26. L.I. Anatychuk, J.D. Hwang, H.S. Chu, H.L. Hsieh, The Design and Application of Thermoelectric Generators on the Waste Heat Recovery of Heating Furnace in Steel Industry, XIV International Forum on Thermoelectricity (May 17-20, 2011, Russian Federation, Moscow).
 27. Kaibe H., Kaijihar T., Fujimoto S., Makino K., Hachiuma H. Recovery of plant waste heat by a thermoelectric generating system / S. Sano // KOMATSU technical report. – 2011. – vol. 57.– № 164 – С. 26 – 30.
 28. T. Kajikawa, Thermoelectric Application for Power Generation in Japan, Advances in Science and Technology 74, 83-92 (2010).
 29. Kajikawa T. Advances In Thermoelectric Power Generation Technology In Japan / T. Kajikawa // J. of Thermoelectricity. – 2011. – №3. – С. 5 – 19.
 30. H. Kaibe, S. Fujimoto, H. Mizukami, S. Morimoto, Field Test of Thermoelectric Generating System at Komatsu Plant, Proceedings of Automotive 2010, Berlin (2010.12).
 31. H. Kaibe, S.Fujimoto, T.Kajihara, K.Makino, H.Hachiuma “Thermoelectric Generating System attached to a Carburizing Furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant”, Proc of 9th European Conference on Thermoelectrics, Thessaloniki, Greece, September 2011, 201E_10_O.
 32. H. Kaibe, K. Makino, T. Kajihara, S. Fujimoto and H. Hachiuma. Thermoelectric generating system attached to a carburizing furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant.– AIP Conf. Proc. 1449, 524 (2012); <http://dx.doi.org.sci-hub.org/10.1063/1.4731609>.
 33. H. Kaibe, K. Makino, T. Kajihara, Y.-H. Lee and H. Hachiuma. Study of thermoelectric generation unit for radiant waste heat.
 34. H. Kaibe, T. Kajihara, K. Nagano, K. Makino, H. Hachiuma, D. Natsuume. Power delivery from an actual thermoelectric generation system.- Journal of electronic materials.- 2014.
 35. Анатичук Л.І., Jenn-Dong Hwang, Лысько В.В., Прибыла А.В. Термоэлектрические рекуператоры тепла для цементных печей // Термоэлектричество. – 2013. №5. – С. 39-45.
 36. T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kajihara, H. Kaibe, H. Hachiuma, H. Matsuno. Thermoelectric generation using heat in steal works.- Journal of electronic materials.- 2014.
 37. Amaldi A., Tang F. Proceedings of the 11th European conference on thermoelectrics : ECT 2013. Chapter 17. Waste heat recovery in steelworks using a thermoelectric generator – Springer, 2014. – p. 143-149.
 38. T. Hendricks and W.T. Choate, Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat recovery (Washington, D.C.: Industrial Technologies Program, U.S. Department of Energy, 2006), pp. 1–76.
 39. Waste heat recovery: Technology and opportunities in U.S. industry.– U.S. department of energy: Industrial technologies program.– 2008. – P. 112.
 40. Waste heat to power systems.– Combined heat and power partnership.– U.S. environmental protection agency.– 2012. – P. 9.
 41. Villar A., Arribas J. Waste-to-energy thechnologies in continuous process industries.- Clean Techn Environ Policy.– 14.– 2012.– p.29-39.

-
42. Joshi J., Patel N. Thermoelectric system to generate electricity from waste heat of the flue gases.- *Advances in Applied Science Research*.– 3 (2).– 2012.– p.1077-1084.
 43. Amaldi A., Tang F. Proceedings of the 11th European conference on thermoelectrics : ECT 2013. Chapter 26. Modeling and Design of Tubular Thermoelectric Generator Used for Waste Heat Recovery– Springer, 2014. – p. 219-226.
 44. Zhang Y., D'Angelo J., Wang X., Yang J. (2012) Multi-physics modeling of thermoelectric generators for waste heat recovery applications, DEER Conference, Michigan.
 45. Faraji A., Singh R., Mochizuki M., Akbarzadeh A. Design and numerical simulation of a symbiotic thermoelectric generation system fed by a low-grade heat source.- *Journal of electronic materials*.– 2013.
 46. Brazdil M., Pospisil J. A way to use waste heat to generate thermoelectric power.– *Acta Polytechnica*.– vol. 52.– № 4.–2012.–p.21-25.
 47. Qiu K., Hayden A. A natural-gas-fired thermoelectric power generation system.- *Journal of electronic materials*.– vol. 38.– № 7.–2009.
 48. Ono K., Suzuki R. Thermoelectric power generation: Converting low-grade heat into electricity.- *JOM*.–1998.– p. 49-51.
 49. Sasaki K., Horikawa D., Goto K. Consideration of thermoelectric power generation by using hot spring thermal energy or industrial waste heat.- *Journal of electronic materials*.–2014.
 50. Miller E., Hendricks T., Peterson R. Modeling energy recovery using thermoelectric conversion with an organic Rankine bottoming cycle.- *Journal of electronic materials*.– vol. 38.– № 7.–2009.
 51. Miller E. Integrated dual cycle energy recovery using thermoelectric conversion with an organic Rankine bottoming cycle.– An abstract of the thesis for the degree of Master of science in mechanical engineering.–2010.
 52. J.-P. Fleurial, P. Gogna, B.C.-Y. Li, S. Firdosy, B.J. Chen, C.-K. Huang, V. Ravi, T. Caillat¹, K. Star.– Waste heat recovery opportunities for thermoelectric generator.– *Thermoelectric Applications Workshop*.–2009.
 53. Energy Use, Loss and Opportunity Analysis: U. S. Manufacturing and Mining, December 2004, Energetics, Inc., E3M, Incorporated, page 10.
 54. Hachiuma H. Thermoelectric Energy Harvesting for Industrial Waste Heat Recovery.– *Energy Harvesting and Storage USA 2013*.
 55. Anatyчук Л.І., Jenn-Dong Hwang, Prybyla A.V. Thermoelectric generator for conversion of heat from gas rolling furnaces // 29-th International Conference on Thermoelectrics.– 2010. – China, Shanghai.
 56. Сакр Х.М., Мансур М.Х., Мусса М.Н. Тепловой расчет термоэлектрических генераторов, работающих на выхлопных газах автомобиля: цели и задачи / Х.М. Сакр // *Термоэлектричество*. – 2008. – №1. – С. 64 – 73.
 57. Анатичук Л.І., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного термоэлектрического генератора для автомобиля с дизельным двигателем / Л.І. Анатичук // *Термоэлектричество*. – 2014. – №4. – С. 84 – 91.
 58. Анатичук Л.І., Кузь Р.В. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля / Л.І. Анатичук // *Термоэлектричество*. – 2014. – №2. – С. 61 – 69.
 59. Anatyчук L.I., Kuz R.V. Effect of air cooling on the efficiency of a thermoelectric generator in a car with a petrol engine / L.I. Anatyчук // *J. of Thermoelectricity*. – 2014. – №3. – С. 84 – 87.
 60. Коржуев М.А., Свечникова Т.Е. Термодинамические ограничения полезной мощности

- автомобильных термоэлектрических генераторов и перспективы их использования на транспорте / М.А. Коржуев // Термоэлектричество. – 2013. – №3. – С. 58 – 73.
61. K.M. Saqr, M.K. Mansour, and M.N. Musa. Thermal Design of Automobile Exhaust-based Thermoelectric Generators: Objectivities and Challenges.– International J. Automotive Technology 9(2), 155-160 (2008).
62. D.M. Rowe, J. Smith, G. Thomas and G. Min, Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat, J. Electronic Materials 40 (5), 784-788 (2011).
63. J. Lieb, S. Neugebauer, A. Eger, M. Linde, B. Masar, W. Stütz, The Thermoelectric Generator from BMW is Making Use of Waste Heat, MTZ 70 (4) 4-11 (2009).
64. A. Eger, M. Linde, The BMW Group. Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators (San Diego, 2011), 23 p.
65. N. Espinosa, M. Lazard, L. Aixala, and H. Scherrer, Modeling Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery, JEMS 39 (9), 1446-1455 (2010).
66. L.I. Anatychuk, O.J. Luste, and R.V. Kuz, Theoretical and Experimental Study of Thermoelectric Generators for Vehicles, JEMS 40 (5), 1326-1331 (2011).
67. J.W. Fairbanks, Development of Automotive Thermoelectric Generators and Air Conditioner / Heaters, Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity (Moscow 17-20.05.2011), [On line:<http://forum.inst.cv.ua/>].
68. Анатичук Л.І. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя. / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2012. – № 2. – С. 81 – 94.
69. Файнзильбер Э.М. Использование тепла отработавших газов двигателей в термо-электрическом генераторе для питания элементов электрооборудования автомобилей / Э.М. Файнзильбер, Л.М. Драбкин // Автомобильная промышленность. – 1966. – № 7. – С. 9 – 10.
70. Коржуев М.А. Некоторые узкие места автомобильных термоэлектрических генераторов и поиск новых материалов для их устранения / М.А. Коржуев, Ю.В. Гранаткина // Термоэлектричество. – 2012. – № 1. – С. 81 – 94.
71. Коржуев М.А. О конфликте двигателей внутреннего сгорания и термоэлектрических генераторов при рекуперации тепловых потерь в автомобилях / М.А. Коржуев // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 4. – С. 8 – 15.
72. Анатичук Л.І. Эффективность термоэлектрических рекуператоров тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество, 2011. – №4. – С. 80-85.
73. L.I. Anatychuk, 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.
74. 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).
75. 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.
76. 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.
77. 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.

78. E. Takanose, H. Tamakoshi, The Development of Thermoelectric Generator for Passenger Car, Proc.12th International Conference on Thermoelectrics (Yokohama, Japan, 1993), p. 467 – 470.
79. Stabler F. Automotive application of high efficiency thermoelectrics. DARPA/ONR Program review and DOE high efficiency thermoelectric workshop.– San Diego (CA), March 24-27? 2002/
80. Bass J. et al. Thermoelectric Generator Development for Heavy-Duty Truck Applications // Proceedings of Annual Automotive Technology Development Contractors Coordination Meeting, 1992. – Dearborn (USA). – P. 743-748.
81. Bass J. et al. Performance 1 kW Thermoelectric Generator for Diesel Engines // Proc. AIP Conference, 1995. – P. 295-298.
82. Thacher E. F., Helenbrook B. T., Karri M. A. and Richter C. J. Testing an automobile thermoelectric exhaust based thermoelectric generator in a light truck // Proceedings of the IMechE Part D Journal of Automobile Engineering. – 2007. – V. 221. – No 1. – P. 95-107(13).
83. Kushch A., Karri M. A., Helenbrook B. T. and Richter C. J. The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck // Proceedings of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) conference, 2004. – Coronado (California, USA).
84. Jadhao J., Thombare D. Review on exhaust gas heat recovery for I.C. engine.– International journal of engineering and innovative technology.– Vol.2.– Issue 12.–2013.–p. 93-100.
85. Baker C., Vuppuluri P., Shi L., Hall M. Model of heat exchangers for waste heat recovery from diesel engine exhaust for thermoelectric power generation.- Journal of electronic materials.– vol. 41.– № 6.– 2012.
86. Kim S., Won B., Rhi S., Kim S.H., Yoo J. Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas.- Journal of electronic materials.– vol. 40.– № 5.–2011.
87. Su C., Ye B., Guo X., Hui P. Acoustic optimization of automotive exhaust heat thermoelectric generator.- Journal of electronic materials.– vol. 41.– № 6.–2012.
88. Deng Y., Zhang Y., Su C. Modular analysis of automotive exhaust thermoelectric power generation system.- Journal of electronic materials.– 2014.
89. Quan R., Tang X., Quan S., Huang L. A novel optimization method for the electric topology of thermoelectric modules used in an automobile exhaust thermoelectric generator.- Journal of electronic materials.– vol. 42.– № 7.–2013.
90. Fleurial G.-P. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities.– JOM.– Vol. 61.–№ 4.– p.79-85.
91. Kumar C., Sonthalia A., Goel R. Experimental study on waste heat recovery from an IC Engine using thermoelectric technology.– THERMAL SCIENCE.– 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 1011-1022.
92. Vázquez, J., et al., State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles, Proceedings, 7th European Workshop on Thermoelectrics, Paper 17, Pamplona, Spain, 2002.
93. K. T. Wojciechowski, R. Zybala, J. Leszczynski, P. Nieroda, M. Schmidt, J. Merkisz, P. Lijewski, P.Fuc, “Analysis of Possibilities Of Waste Heat Recovery In Off-Road Vehicles”, AIP Conf. Proc. 1449, 2012, 501 – 504.
94. Wojciechowski K. T., Zybala R., Tomankiewicz J., Fuc P., Lijewski P., Wojciechowski J., Merkisz J.: “Influence of Back Pressure on Net Efficiency of TEG Generator mounted in the Exhaust System of a Diesel Engine”, published in book: Thermoelectrics Goes Automotive II, edited by Daniel Jänsch and Co-Authors by expert verlag 2012, pp. 177 – 188.
95. Baskar P., Seralathan S., Dipin D., Thangavel S. Experimental analysis of thermoelectric waste heat recovery system retrofitted to two stroke petrol engine.– International journal of advanced mechanical

- engineering.– Vol.4, Number 1.– 2014.– p.9-14.
96. LaGrandeur J., Crane D., Hung S. Hight-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle application.– Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report, p. 232 – 236.
97. Willigan R., Hautman D., Krommenhoek D., Martin P. Cost-effective fabrication routes for the production of quantun well structures and recovery of waste heat from heavy duty trucks.– Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report, p. 237 – 241.
98. Nelson C. Exhaust energy recovery.– Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report, p. 247 – 250.
99. Schock H., Case E., Downey A. Thermoelectric conversion of waste heat to electricity in an IC engine powered vehicle.– Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report, p. 242 – 246.
100. Shu G., Zhao J., Tian H., Liang X., Wei H. Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123.– Energy.– 45.– 2012.– p. 806-816.
101. J. Merkisz, P. Fuc, P. Lijewski, A. Ziolkowski, K. Wojciechowski. The Analysis of Exhaust Gas Thermal Energy Recovery Through a TEG Generator in City Traffic Conditions Reproduced on a Dynamic Engine Test Bed.– Journal of electronic materials.–2014.
102. S.L Nadaf, P.B Gangavat. A Review On Waste Heat Recovery And Utilization From Diesel Engines.– International journal of engineering and innovate technology.– Vol.5.– Issue 4.–2014.–p. 31-39.
103. A. Noor, R. Puteh, S. Rajoo. Waste Heat Recovery Technologies In Turbocharged Automotive Engine – A Review.– Journal of Modern Science and Technology.– Vol.2 No.1 March 2014. Pp.108-119.
104. Anatychuk. L.I., Rozver. Yu.Yu., Misawa. K., Suzuki. N. Thermal Generators for Waste Heat Utilization.– Report on ICT'97.
105. Anatychuk L.I., Razinkov V.V., Rozver Yu. Yu., Mikhailovsky V.Ya.– Thermoelectric Generator Modules and Blocks.– Report on ICT'97.
106. Uemura K. History of thermoelectricity development in Japan / K. Uemura // J. of Thermoelectricity. – 2002. – №3. – С. 7 – 16.
107. R. Ohba and S. Nakamura: “Wind Tunnel Experiment of Gas Diffusion in Thermally Stratified Flow”, Proc. 3rd Int. Workshop on Wind & Water Tunnel Modelling Atmospheric Flow & Dispersion, Lausanne, YMG-1, 1986.
108. Brazdil M., Pospil J. Thermoelectric power generation utilizing the waste heat from a biomass boiler.- Journal of electronic materials.– vol. 42.– № 7.–2013.
109. Characterization of the U.S. Industrial/Commercial boiler population, Oak Ridge National Laboratory, May 2005, prepared by Energy and Enviromental Analysis, Inc.
110. Anatychuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. Thermoelectric recupirator for gas turbines / 31-th International and 10-th European Conference on Thermoelectrics. – 2012. – Aalborg, Denmark.
111. Date As., Date Ab., Dixon C., Akbarzadeh A. Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation.– Renewable and Sustainable Energy Reviews.– 33.– 2014.– p.371-381.
112. Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. Energy 2010;35(2):935–42.
113. Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. Renew Energy 2003;28 (2):205–22.
114. Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove

- thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Convers Manag* 2005;46(9–10):1631–43.
115. Lertsatitthanakorn C. Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol* 2007;98(8):1670–4.
116. Maneewan S., Chindaruksa S. Thermoelectric power generation using waste heat from a biomass drying. – *Journal of electronic materials*. – vol. 38. – № 7. – 2009.
117. Elefsiniotis A., Becker Th., Schmid U. Thermoelectric energy harvesting using phase change materials in high temperature environments in aircraft. – *Journal of electronic materials*. – vol. 43. – № 6. – 2013.
118. Elefsiniotis A., Kiziroglou M., Wright S., Becker Th., Yeatman E., Schmid U. Performance evaluation of a thermoelectric energy harvesting device using various change materials. – *Journal of Physics: Conference Series*. – 476. – 2013.
119. Elefsiniotis A., Kokorakis N., Becker Th., Schmid U. A novel high-temperature aircraft-specific energy harvester using PCMs and state of the art TEGs / 12-th European Conference on Thermoelectrics. – 2014.
120. Samson D, Kluge M., Fuss T., Becker Th., Schmid U. Flight test results of a thermoelectric energy harvester for aircraft. – *Journal of electronic materials*. – vol. 41. – № 6. – 2012.
121. Elefsiniotis A., Weiss M., Becker Th., Schmid U. Efficient power management for energy-autonomous wireless sensor nodes for aeronautical application. – *Journal of electronic materials*. – vol. 42. – № 7. – 2013.
122. Samson D, Kluge M., Otterpohl T., Becker Th., Schmid U. Aircraft-specific thermoelectric generator module. – *Journal of electronic materials*. – vol. 39. – № 9. – 2010.
123. Shan Yeung. Thermoelectricity: Experiments, Application and Modelling. – An abstract of the thesis for the degree of Master of science in materials engineering and nanotechnology. – 2010.
124. <http://kryothermtec.com/ru/thermoelectric-generator-b25-12.html>
125. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного питания // Новые технологии. № 12. с.131-138- (2010).
126. T. Hendricks, Shannon Yee, S. Leblanc. Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive // *Journal of Electronic Materials*. – 2016. – Vol. 45. – №3.
127. Anatychuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // *Proc. of ICT-2011, Michigan, USA*.
128. Anatychuk L.I., Kuz R.V., Hwang J.D. The energy and economic parameters of Bi-Te based thermoelectric generator modules for waste heat recovery / L.I. Anatychuk // *J. of Thermoelectricity*. - 2012. - №4. - P. 73 - 79.
129. Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Прибила А.В. Підвищення ефективності секційних термоелектричних рекуператорів тепла // *Термоелектрика*, №6. - 2014. - С. 77-88.
130. <https://ua.energy>

Надійшла до редакції 17.07.2020

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}
Кузь Р.В., *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України,
ул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatykh@gmail.com;

²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,
Чернівці, 58012, Україна

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕКУПЕРАТОРОВ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

В работе приводятся результаты анализа термоэлектрических рекуператоров тепловых отходов для диапазона температур теплоносителя 100 -300⁰С. На основе компьютерной модели проведена оптимизация секционных рекуператоров, рассчитан КПД каждой секции и рекуператора в целом. Рассчитаны удельная стоимость и время окупаемости секционных генераторов. Сделаны выводы об экономической целесообразности использования таких рекуператоров. Библи. 126, рис. 9, табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический рекуператор, отработанное тепло, КПД, мощность, удельная стоимость.

L.I. Anatychuk *acad. National Academy of
Sciences of Ukraine*^{1,2}
R.V. Kuz *cand. phys. - math. Sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS
and MES of Ukraine,

1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatykh@gmail.com

EFFECTIVENESS OF THERMOELECTRIC RECUPERATORS FOR RATIONAL TEMPERATURES OF HEAT SOURCES

The paper presents the results of analysis of thermoelectric recuperators of waste heat for the temperature range 100 -300⁰C of the heat carrier. Based on computer model, optimization of sectional recuperators is carried out, the efficiency of each section and recuperator as a whole is calculated. The specific cost and payback time of sectional generators is calculated. Conclusions are made on the economic feasibility of using such recuperators. Bibl. 130, Fig. 9, Tabl. 1.

Key words: thermoelectric recuperator, waste heat, efficiency, power, specific cost.

References

1. Rowe, M.D., Gao Min, Williams, S.G.K., Aoune A., Matsuura K., Kuznetsov V.L., Li Wen Fu. (1997). Thermoelectric recovery of waste heat-case studies. *Energy Conversion Engineering Conference* (1997, vol.2, 1075 – 1079).
2. Basic research needs for solar energy utilization. Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization. USA: DOE, April 18–21, 2005.
3. European Commission. Energy. Energy 2020: *Roadmap* 2050. – http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm.
4. Paniakin V. (2010). Kogeneratsiia: Kak eto rabotaiet [Cogeneration: How it works]. *Seti i biznes – Networks and Business*, 4 [in Russian].
5. Waste heat recovery: technology and opportunities in U.S. industry. *Report of BCS, Incorporated, USA*. – 2008.
6. Cynthia Haddad, et al. (2014). Some efficient solutions to recover low and medium waste heat: competitiveness of the thermoacoustic technology. *Energy Procedia*, 50, 1056 – 1069.
7. Thekdi, Arvind C. (2007). Waste heat to power economic tradeoffs and considerations. *Proc. of the 3rd Annual Waste Heat to Power Workshop* (USA, 2007).
8. Paul Cunningham P.E. (2002). Waste heat/cogen opportunities in the cement industry. *Cogeneration and Competitive Power Journal*, 17 (3), 31-51.
9. Quoilinetal S. (2013). Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 68–186.
10. Zhang C., et al. (2017). Implementation of industrial waste heat to power in Southeast Asia: an outlook from the perspective of market potentials, opportunities and success catalysts. *Energy Policy*, 106, 525–535.
11. Milewskia Jarosław, Krasuckib Janusz (2017). Comparison of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery in the steel industry. *Journal of Power Technologies*, 97 (4), 302–307.
12. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva: Spravochnik [Thermoelements and thermoelectric devices: Reference book]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
13. Bernshteyn A.S. (1956). Termoelektricheskie generatory [Thermoelectric generators]. Moscow: Gosenergoizdat [in Russian].
14. Anatyshuk L.I. (2001). Rational areas of research and applications of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 3 – 14.
15. Anatyshuk L.I. (2007). Current state and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20.
16. Freik D.M., Nykyrui L.I., Krynytskyi O.S. (2012). Dosiahnennia i problemy termoelektryky [Achievements and problems of thermoelectricity]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila - Physics and Chemistry of Solid State*, 13(2), 297-318 [in Ukrainian].
17. Y. Chen, et al. (2006). A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic Rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 26, 2142–2147.
18. Zhang X., Wu L., Wang X., Ju G. (2016). Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature. *Applied Thermal Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.108>
19. Kishore R.A., Priya S. (2018). A review on low-grade thermal energy harvesting: materials, methods and devices. *Materials*, 11 (8), 1433. doi:10.3390/ma11081433.
20. Aladayleh Wail, Alahmer Ali. (2015). Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type

- Stirling engine. *Journal of Energy*. Article ID 495418, <https://doi.org/10.1155/2015/495418>.
21. Takahashi Y., Yamamoto K., Nishikawa M. (2006). Fundamental performance of triple magnetic circuit type cylindrical thermomagnetic engine. *Electrical Engineering in Japan*, 154 (4).
 22. Huffman F.N., Sommer A.H., Balestra C.L., Briere D.P., Oettinger P.E. (1976). High efficiency thermionic converter studies. *NASA Technical Report*. – NASA-CR-135125.
 23. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2012). Thermoelectric heat recuperator for gas turbines. *XIII Interstate Workshop "Thermoelectrics and their applications"* (Russia, Saint-Petersburg, November 13-14, 2012).
 24. Malygin N.D., Stoianov V.U. (2004). Primeneniie termoelektricheskogo generatora v istochnike bespereboynogo pitaniia povyshennoi nadezhnosti dlia osobo vazhnykh potrebitelei [The use of thermoelectric generator in high reliability uninterrupted supply for critical consumers]. *Stroitelstvo i tekhnogennaia bezopasnost'*, 9, 153 – 156 [in Russian].
 25. Shostakovskiy P. (2013). Alternativnyie istochniki elektricheskoi energii promyshlennogo primeneniia na osnove termoelektricheskikh generatorov [Alternative sources of electric energy for industrial use based on thermoelectric generators]. *Control Engineering Russia*, 3 (45), 52 – 56 [in Russian].
 26. Anatychuk L.I., Hwang J.D., Chu H.S., Hsieh H.L. (2011). The design and application of thermoelectric generators on the waste heat recovery of heating furnace in steel industry. *XIV International Forum on Thermoelectricity (May 17-20, 2011, Russian Federation, Moscow)*.
 27. Kaibe H., Kaijiharara T., Fujimoto S., Makino K., Hachiuma H. (2011) Recovery of plant waste heat by a thermoelectric generating system [S. Sano] *KOMATSU technical report*, 57(164), 26 – 30.
 28. Kajikawa T. (2010). Thermoelectric application for power generation in Japan. *Advances in Science and Technology*, 74, 83-92.
 29. Kajikawa T. (2011). Advances In thermoelectric power generation technology in Japan. *J. of Thermoelectricity*, 3 (5 – 19).
 30. Kaibe H., Fujimoto S., Mizukami H., Morimoto S. (2010). Field test of thermoelectric generating system at Komatsu Plant. *Proceedings of Automotive 2010, Berlin (2010.12)*.
 31. Kaibe H., Fujimoto S., Kaijiharara T., Makino K., Hachiuma H. (2011). Thermoelectric generating system attached to a carburizing furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant. *Proc of 9th European Conference on Thermoelectrics (Thessaloniki, Greece, September 2011, 201E_10_O.)*
 32. Kaibe H., Makino K., Kaijiharara K., Fujimoto S. and Hachiuma H. (2012). Thermoelectric generating system attached to a carburizing furnace at Komatsu Ltd., Awazu Plant. *AIP Conf. Proc.* 1449, 524; <http://dx.doi.org.sci-hub.org/10.1063/1.4731609>.
 33. Kaibe H., Makino K., Kaijiharara K., Lee Y.-H. and Hachiuma H. *Study of thermoelectric generation unit for radiant waste heat*.
 34. Kaibe H., Kaijiharara T., Nagano K., Makino K., Hachiuma H., Natsuume D. (2014). Power delivery from an actual thermoelectric generation system. *Journal of Electronic Materials*.
 35. Anatychuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity*, 5, 39-45.
 36. Kuroki T., Kabeya K., Makino K., Kaijiharara T., Kaibe H., Hachiuma H., Matsuno H. (2014). Thermoelectric generation using heat in steal works. *Journal of Electronic Materials*.
 37. Amaldi A., Tang F. (2014). *Proceedings of the 11th European conference on thermoelectrics : ECT 2013. Chapter 17. Waste heat recovery in steelworks using a thermoelectric generator*. Springer, 143-149.
 38. Hendricks T. and Choate W.T. (2006). *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator*

- Systems for Industrial Waste Heat recovery* (Washington, D.C.: Industrial Technologies Program, U.S. Department of Energy, 2006), 1–76.
39. Waste heat recovery: Technology and opportunities in U.S. industry.– *U.S. department of energy: Industrial technologies program*, 2008, 112.
40. Waste heat to power systems.– Combined heat and power partnership. *U.S. environmental protection agency*, 2012, 9.
41. Villar A., Arribas J. (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Techn Environ Policy*, 14, 29-39.
42. Joshi J., Patel N. (2012). Thermoelectric system to generate electricity from waste heat of the flue gases. *Advances in Applied Science Research*, 3(2), 1077-1084.
43. Amaldi A., Tang F. (2014). *Proceedings of the 11th European conference on thermoelectrics : ECT 2013. Chapter 26. Modeling and design of tubular thermoelectric generator used for waste heat recovery*. Springer.
44. Zhang Y., D'Angelo J., Wang X., Yang J. (2012) Multi-physics modeling of thermoelectric generators for waste heat recovery applications. (*DEER Conference, Michigan*).
45. Faraji A., Singh R., Mochizuki M., Akbarzadeh A. (2013). Design and numerical simulation of a symbiotic thermoelectric generation system fed by a low-grade heat source. *Journal of Electronic Materials*.
46. Brazdil M., Pospisil J. (2012). A way to use waste heat to generate thermoelectric power. *Acta Polytechnica*, 52(4), 21-25.
47. Qiu K., Hayden A. (2009). A natural-gas-fired thermoelectric power generation system. *Journal of Electronic Materials*, 38(7).
48. Ono K., Suzuki R. (1998). Thermoelectric power generation: Converting low-grade heat into electricity. *JOM*, 49-51.
49. Sasaki K., Horikawa D., Goto K. (2014). Consideration of thermoelectric power generation by using hot spring thermal energy or industrial waste heat. *Journal of Electronic Materials*.
50. Miller E., Hendricks T., Peterson R. (2009). Modeling energy recovery using thermoelectric conversion with an organic Rankine bottoming cycle. *Journal of Electronic Materials*, 38(7).
51. Miller E. (2010). Integrated dual cycle energy recovery using thermoelectric conversion with an organic Rankine bottoming cycle. *An abstract of the thesis for the degree of Master of Science in mechanical engineering*.
52. Fleurial J.-P., Gogna P., Li, B.C.-Y., Firdosy S., Chen B.J., Huang C.-K., Ravi V., Caillat T., Star K. (2009). Waste heat recovery opportunities for thermoelectric generator. *Thermoelectric Applications Workshop*.
53. Energy Use, Loss and Opportunity Analysis: U. S. Manufacturing and Mining, December 2004, Energetics, Inc., E3M, Incorporated, page 10.
54. Hachiuma H. (2013). Thermoelectric energy harvesting for industrial waste heat recovery. *Energy Harvesting and Storage USA*.
55. Anatyshuk L.I., Jenn-Dong Hwang, Prybyla A.V. (2010). Thermoelectric generator for conversion of heat from gas rolling furnaces. *29-th International Conference on Thermoelectrics* (China, Shanghai).
56. Saqr K.M., Mansour M.K., Musa M.N. (2008). Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: objectives and challenges. *J. Thermoelectricity*, 1, 64 – 73.
57. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator in a car with a diesel engine. *J. Thermoelectricity*, 4, 84 – 91.

-
58. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric generator in a diesel-engined car. *J. Thermoelectricity*, 2, 61 – 69.
59. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of a thermoelectric generator in a car with a petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 3, 84 – 87.
60. Korzhuev M.A., Svechnikova T.E. (2013). Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport. *J. Thermoelectricity*, 3, 58 – 73.
61. Saqr K.M., Mansour M.K., and Musa M.N. (2008). Thermal design of automobile exhaust-based thermoelectric generators: objectivities and challenges. *International J. Automotive Technology*, 9(2), 155-160.
62. Rowe D.M., Smith J., Thomas G. and Min G. (2011). Weight penalty incurred in thermoelectric recovery of automobile exhaust heat. *J. Electronic Materials*, 40 (5), 784-788.
63. Lieb J., Neugebauer S., Eger A., Linde M., Masar B., Stütz W. (2009). The thermoelectric generator from BMW is making use of waste heat. *MTZ*, 70 (4), 4-11.
64. Eger A., Linde M. (2011). The BMW Group. Roadmap for the application of thermoelectric generators (San Diego, 2011), 23 p.
65. Espinosa N., Lazard M., Aixala L., and Scherrer H. (2010). Modeling thermoelectric generator applied to diesel automotive heat recovery. *JEMS* 39 (9), 1446-1455.
66. Anatyshuk L.I., Luste O.J., and Kuz R.V. (2011). Theoretical and experimental study of thermoelectric generators for vehicles. *JEMS* 40(5), 1326-1331.
67. Anatyshuk L.I., Luste O.J., and Kuz R.V. (2011). Theoretical and experimental study of thermoelectric generators for vehicles. *JEMS* 40 (5), 1326-1331.
68. Fairbanks W. (2011). Development of automotive thermoelectric generators and air conditioner / heaters. Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity (Moscow 17-20.05.2011), [On line: <http://forum.inst.cv.ua/>].
69. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 81 – 94.
70. Fainzilber E.M., Drabkin L.M. (1966). Ispolzovaniie tepla otrabotavshikh gazov dvigatelei v termoelektricheskom generatore dlia pitaniia elementov elektrooborudovaniia avtomobilei [Use of heat from exhaust gases of engines in a thermo-electric generator for powering elements of electrical equipment of cars]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 7, 9 – 10 [in Russian].
71. Korzhuev M.A., Granatkina Yu.V. (2012). Some bottlenecks of automobile thermoelectric generators and search for new materials to eliminate them. *J. Thermoelectricity*, 1, 81 – 94.
72. Korzhuev M.A. (2011). On the conflict of internal combustion engines and thermoelectric generators in the recovery of heat losses in cars. *Letters to JTP*, 37(4), 8 – 15.
73. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2011). Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas heat of internal combustion engines. *J. Thermoelectricity*, 4, 80-85.
74. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Misawa K., and Suzuki N. (1997). Thermal generators for waste heat utilization. *Proc. of 16th International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, 1997), p. 586 – 587.
75. Zhang X., Chau K.T., and Chan C.C. (2008). Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *J. Asian Electric Vehicles*, 6 (2), 1119 – 1124.
76. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., and Snowden D. (2005). Diesel truck thermoelectric generator. Advanced combustion engine technologies. *FY 2005 Progress Report*, p. 301 – 305.

-
77. Yang Jihui, Seker F., Venkatasubramanian R., Nolas G.S., Uher C., and Wang H. (2006). Developing thermoelectric technology for automotive waste heat recovery. Advanced combustion engine technologies. *FY 2006 Progress Report*, p. 227 – 231.
 78. Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., and Shinohara K. (1998). Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles. *Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics* (Nagoya, Japan, 1998), p. 464 – 467.
 79. Takanose E., Tamakoshi H. (1993). The development of thermoelectric generator for passenger car. *Proc. 12th International Conference on Thermoelectrics* (Yokohama, Japan, 1993), p. 467 – 470.
 80. Stabler F. (2002). Automotive application of high efficiency thermoelectrics. DARPA/ONR Program review and DOE high efficiency thermoelectric workshop. (San Diego (CA), March 24-27).
 81. Bass J. et al. (1992). Thermoelectric generator development for heavy-duty truck applications. *Proceedings of Annual Automotive Technology Development Contractors Coordination Meeting* (Dearborn (USA)). – P. 743-748.
 82. Bass J. et al. (1995). Performance 1 kW thermoelectric generator for diesel engines. *Proc. AIP Conference*, P. 295-298.
 83. Thacher E. F., Helenbrook B. T., Karri M. A. and Richter C. J. (2007). Testing an automobile thermoelectric exhaust based thermoelectric generator in a light truck. *Proceedings of the IMECH E Part D. Journal of Automobile Engineering*, 221(1), 95-107(13).
 84. Kushch A., Karri M. A., Helenbrook B. T. and Richter C. J. (2004). The effects of an exhaust thermoelectric generator of a GM Sierra pickup truck. *Proceedings of Diesel Engine Emission Reduction (DEER) Conference* (Coronado, California, USA).
 85. Jadhao J., Thombare D. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for I.C. engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(12), 93-100.
 86. Baker C., Vuppuluri P., Shi L., Hall M. (2012). Model of heat exchangers for waste heat recovery from diesel engine exhaust for thermoelectric power generation. *Journal of Electronic Materials*, 41(6).
 87. Kim S., Won B., Rhi S., Kim S.H., Yoo J. (2011). Thermoelectric power generation system for future hybrid vehicles using hot exhaust gas. *Journal of Electronic Materials*, 40(5).
 88. Su C., Ye B., Guo X., Hui P. (2012). Acoustic optimization of automotive exhaust heat thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 41(6).
 89. Deng Y., Zhang Y., Su C. (2014). Modular analysis of automotive exhaust thermoelectric power generation system. *Journal of Electronic Materials*.
 90. Quan R., Tang X., Quan S., Huang L. (2013). A novel optimization method for the electric topology of thermoelectric modules used in an automobile exhaust thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 42(7).
 91. Fleurial G.-P. (2009). Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities. *JOM*, 61(4), 79-85.
 92. Kumar C., Sonthalia A., Goel R. (2011). Experimental study on waste heat recovery from an IC Engine using thermoelectric technology. *Thermal Science*, 15(4), 1011-1022.
 93. Vázquez, J., et al., State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles. *Proceedings of 7th European Workshop on Thermoelectrics*, Paper 17 (Pamplona, Spain, 2002).
 94. Wojciechowski K.T., Zybała R., Leszczynski J., Nieroda P., Schmidt M., Merksiz J., Lijewski P., Fuc P. (2012). Analysis of possibilities of waste heat recovery in off-road vehicles. *AIP Conf. Proc.*, 1449, 501 – 504.
 95. Wojciechowski K. T., Zybała R., Tomankiewicz J., Fuc P., Lijewski P., Wojciechowski J., Merksiz

- J. (2012). Influence of back pressure on net efficiency of TEG generator mounted in the exhaust system of a diesel engine, published in book: *Thermoelectrics Goes Automotive II*. Daniel Jansch (Ed.). Expert Verlag.
96. Baskar P., Seralathan S., Dipin D., Thangavel S. (2014). Experimental analysis of thermoelectric waste heat recovery system retrofitted to two stroke petrol engine. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(1), 9-14.
97. LaGrandeur J., Crane D., Hung S. (2006). High-efficiency thermoelectric waste energy recovery system for passenger vehicle application. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*, p. 232 – 236.
98. Willigan R., Hautman D., Krommenhoek D., Martin P. (2006). Cost-effective fabrication routes for the production of quantum well structures and recovery of waste heat from heavy duty trucks. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*.
99. Nelson C. (2006). Exhaust energy recovery. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*, p. 247 – 250.
100. Schock H., Case E., Downey A. (2006)ю Thermoelectric conversion of waste heat to electricity in an IC engine powered vehicle. *Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report*, p. 242 – 246.
101. Shu G., Zhao J., Tian H., Liang X., Wei H. (2012). Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123. *Energy*, 45, 806-816.
102. J. Merksiz, P. Fuc, P. Lijewski, A. Ziolkowski, K. Wojciechowski (2014). The analysis of exhaust gas thermal energy recovery through a TEG generator in city traffic conditions reproduced on a dynamic engine test bed. *Journal of Electronic Materials*.
103. Nadaf S.L., Gangavat P.B. (2014). A review on waste heat recovery and utilization from diesel engines. *International Journal of Engineering and Innovate Technology*, 5(4), 31-39.
104. Noor A., Puteh R., Rajoo S. (2014). Waste heat recovery technologies in turbocharged automotive engine – A Review. *Journal of Modern Science and Technology*, 2(1), 108-119.
105. Anatyshuk L.I., Rozver. Yu.Yu., Misawa. K., Suzuki. N. (1997). Thermal generators for waste heat utilization. *Report on ICT'97*.
106. Anatyshuk L.I., Razinkov V.V., Rozver Yu. Yu., Mikhailovsky V.Ya.(1997). Thermoelectric generator modules and blocks. *Report on ICT'97*.
107. Uemura K. (2002). History of thermoelectricity development in Japan. *J. of Thermoelectricity*, 3, 7 – 16.
108. Ohba R. and Nakamura S. (1986). Wind tunnel experiment of gas diffusion in thermally stratified flow. *Proc. 3rd Int. Workshop on Wind & Water Tunnel Modelling Atmospheric Flow & Dispersion* (Lausanne, YMG-1, 1986).
109. Brazdil M., Pospil J. (2013). Thermoelectric power generation utilizing the waste heat from a biomass boiler. *Journal of Electronic Materials*, 42(7).
110. *Characterization of the U.S. Industrial/Commercial boiler population*. Oak Ridge National Laboratory, May 2005. Prepared by Energy and Enviromental Analysis, Inc.
111. Anatyshuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. (2012). Thermoelectric recupirator for gas turbines. *31-th International and 10-th European Conference on Thermoelectrics* (Aalborg, Denmark).
112. Date As., Date Ab., Dixon C., Akbarzadeh A. (2014). Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 33, 371-381.
113. Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35(2), 935–42.
 114. Nuwayhid R.Y., Rowe D.M., Min G. (2003). Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renew Energy*, 28 (2), 205–22.
 115. Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N. (2005). Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energy Convers Manag*, 46(9–10), 1631–43.
 116. Lertsatitthanakorn C. (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol*, 98(8), 1670–4.
 117. Maneewan S., Chindaruksa S. (2009). Thermoelectric power generation using waste heat from a biomass drying. *Journal of Electronic Materials*, 38, 7.
 118. Elefsiniotis A., Becker Th., Schmid U. (2013). Thermoelectric energy harvesting using phase change materials in high temperature environments in aircraft. *Journal of Electronic Materials*, 43 (6).
 119. Elefsiniotis A., Kiziroglou M., Wright S., Becker Th., Yeatman E., Schmid U. (2013). Performance evaluation of a thermoelectric energy harvesting device using various change materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 476.
 120. Elefsiniotis A., Kokorakis N., Becker Th., Schmid U. (2014). A novel high-temperature aircraft-specific energy harvester using PCMs and state of the art TEGs. *12-th European Conference on Thermoelectrics*.
 121. Samson D, Kluge M., Fuss T., Becker Th., Schmid U. (2012). Flight test results of a thermoelectric energy harvester for aircraft. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6).
 122. Elefsiniotis A., Weiss M., Becker Th., Schmid U. (2013). Efficient power management for energy-autonomous wireless sensor nodes for aeronautical application. *Journal of Electronic Materials*, 42 (7).
 123. Samson D, Kluge M., Otterpohl T., Becker Th., Schmid U. (2010). Aircraft-specific thermoelectric generator module. *Journal of Electronic Materials*, 39(9).
 124. Shan Yeung (2010). Thermoelectricity: Experiments, Application and Modelling.– *An abstract of the Thesis for the Degree of Master of Science in materials engineering and nanotechnology*.
 125. <http://kryothermtec.com/ru/thermoelectric-generator-b25-12.html>
 126. Shostakovskii P. (2010). Termoelektricheskie istochniki alternativnogo pitaniia [Thermoelectric sources of alternative power supply]. *Novyie Tekhnologii – Novel Technologies*, 12, 131-138- (2010) [in Russian].
 127. Hendricks T., Yee Shannon, Leblanc S. (2016). Cost scaling of a real-world exhaust waste heat recovery thermoelectric generator: a deeper dive. *Journal of Electronic Materials*, 45(3).
 128. Anatychuk L.I., Kuz R.V. (2011). Materials for vehicular thermoelectric generators. Proc. of ICT'2011 (Michigan, USA).
 129. Anatychuk L.I., Kuz R.V., Hwang J.D. (2012). The energy and economic parameters of Bi-Te based thermoelectric generator modules for waste heat recovery. *J. of Thermoelectricity*, 4, 73 - 79.
 130. Anatychuk L.I., Kuz R.V., Prybyla A.V. (2014). Efficiency improvement of sectional thermoelectric heat recuperators. *J. Thermoelectricity*, 6, 77-88.
 131. <https://ua.energy>

Submitted 17.07.2020