

УДК

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}

Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,

вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,

вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

e-mail: anatyach@gmail.com

РАЦІОНАЛЬНІ ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ РЕКУПЕРАТОРІВ ТЕПЛА

Приведено аналіз літератури, присвяченої методам рекуперації відпрацьованого тепла від різних енергоємних. Представлено порівняльний аналіз існуючих методів рекуперації низькотемпературних відходів тепла – традиційного та органічного циклів Ренкіна, циклу Каліни та ін. Наведено характеристики існуючих термоелектричних рекуператорів тепла, а також аналіз можливостей їх подальшого розвитку та найбільш раціональні області їх застосування.

Ключові слова: 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 розсіюють величезну 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].

В табл. 1 наведено основні джерела теплових відходів та характерні їх температури. Відходи тепла за температурним діапазоном умовно поділяють на три групи [5]:

- високотемпературні ($> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- середньотемпературні ($230 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- низькотемпературні ($< 230\text{ }^{\circ}\text{C}$).

При цьому, як видно з діаграми, наведеної на рис. 1, більшість теплових відходів (понад 66 %) припадає на низькотемпературний діапазон [6]. Ще 23 % відходів тепла має температуру до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий діапазон температур є сприятливим для рекуперації тепла за допомогою термоелектричного перетворення теплової енергії в електричну.

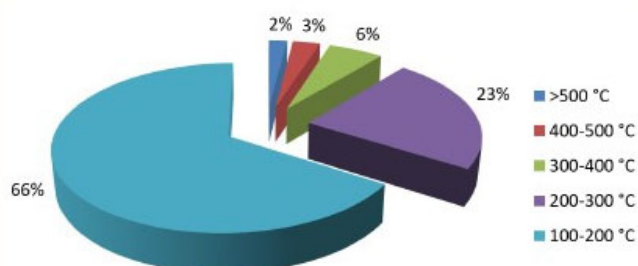


Рис. 1. Розподіл джерел відходів тепла за температурним діапазоном [6].

В той же час, при таких температурах працюються і інші методи рекуперації теплових відходів, включаючи генерацію електричної енергії через механічну роботу.

Тому *метою роботи* є аналіз можливостей практичного використання термоелектрики для рекуперації теплових відходів та визначення найбільш раціональних для цього областей, де термоелектричне перетворення енергії має конкурентну перевагу перед іншими методами.

Таблиця 1

Основні джерела теплових відходів та їх температурний діапазон [5]

Джерела теплових відходів		Діапазон температур, °C
Високотемпературні відходи тепла (> 650 °C)	Нікелеперероблювальна піч	1.370 – 1.650
	Сталева електродугова піч	1.370 – 1.650
	Основна киснева піч	1.200
	Алюмінієва ревербераційна піч	1.100 – 1.200
	Піч для рафінування міді	760 – 820
	Сталева опалювальна піч	930 – 1.040
	Мідна ревербераційна піч	900 – 1.090
	Водневі установки	650 – 980
	Вмітєспалювачі	650 – 1.430
	Піч для плавлення скла	1.300 – 1.540
	Коксова піч	650 – 1.000
	Залізний купол	820 – 980
Середньотемпературні відходи тепла (230 – 650 °C)	Вихлоп парового котла	230 – 480
	Вихлоп газової турбіни	370 – 540
	Вихлоп поршневого двигуна	320 – 590
	Печі для термообробки	430 – 650
	Сушіння та випікання	230 – 590
	Процеси цементної печі	450 – 620
Низькотемпературні відходи тепла (< 230 °C)	Вихлопні гази, що виходять з пристроїв відновлення в газових котлах, етиленових печах тощо	70 – 230
	Конденсат технологічної пари	50 – 90
	Охолоджуюча вода від:	
	пічні двері	30 – 50
	печі відпалу	70 – 230
	повітряні компресори	30 – 50
	двигуни внутрішнього згоряння	70 – 120
	кондиціонування повітря	30 – 40
	Печі для сушіння, випікання та затвердіння	90 – 230
	Гарячі оброблені рідини / тверді речовини	30 – 230

1. Традиційні методи рекуперації відходів тепла

1.1. Генерація електричної енергії через механічну роботу

Цикл Ренкіна [7, 8]. Найбільш часто використовувана система виробництва електроенергії з відпрацьованого тепла передбачає використання тепла для вироблення пари, яка потім приводить в дію парову турбіну. Схема рекуперації відходів тепла з циклом Ренкіна показана на рис. 2.

Традиційний цикл Ренкіна є найбільш ефективним варіантом для утилізації відхідного тепла з потоків відпрацьованих газів при температурі понад 340 – 370 °С.

При низьких температурах відпрацьованого тепла парові цикли стають менш економічними, оскільки пар низького тиску потребуватиме більш об'ємного обладнання. Більш того, низька температура відпрацьованого тепла не може забезпечити достатню енергію для перегріву пари, що є вимогою для запобігання конденсації пари та ерозії лопаток турбіни. Таким чином, низькотемпературне тепло краще підходить для органічного циклу Ренкіна або циклу Калини, які використовують рідини з більш низькими температурами кипіння порівняно з водою.

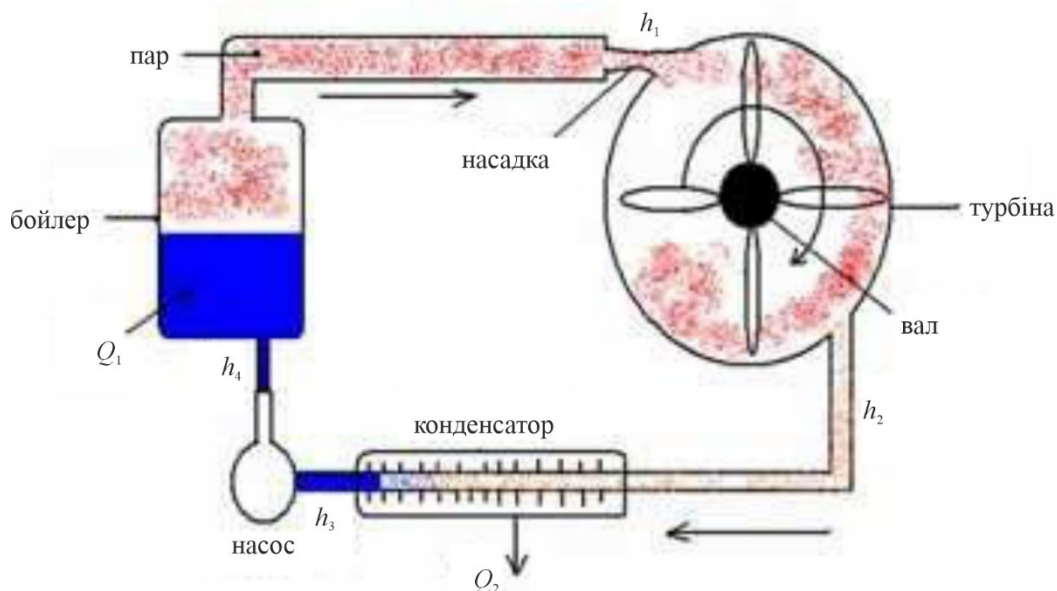


Рис. 2. Рекуперація відходів тепла за циклом Ренкіна.

Органічний цикл Ренкіна (Organic Rankine Cycle – ORC) [7, 9 – 11] працює подібно до парового циклу Ренкіна, але використовує органічну робочу рідину замість пари. Варіанти включають кремнієву олію, пропан, галоалкани (наприклад, "фреони"), ізопентан, ізобутан і толуол, які мають більш низьку температуру кипіння і більш високий тиск пари, ніж вода. Це дозволяє циклу Ренкіна працювати зі значно нижчими температурами відпрацьованого тепла – іноді до низьких температур 65 °С. Найбільш відповідний діапазон температур для ORC буде залежати від використовуваної рідини, оскільки термодинамічні властивості рідин впливатимуть на ефективність циклу при різних температурах.

У порівнянні з водяною парою, рідини, що використовуються в ORC, мають більш високу молекулярну масу, дозволяючи компактні конструкції, більш високий масовий потік, і більш високу ефективність турбіни (до 80 – 85 %). Однак, оскільки цикл працює при більш низьких температурах, загальний ККД становить лише близько 10 – 20 %, в залежності від температури конденсатора і випарника. Хоча ця ефективність набагато нижча, ніж у високотемпературної

парової електростанції (30 – 40 %), важливо пам'ятати, що цикли низьких температур є менш ефективними, ніж високі температурні цикли. Межі ефективності можуть бути виражені за ефективністю Карно – максимально можлива ефективність теплового двигуна, що працює між двома температурами. Двигун Карно, що працює з джерелом тепла при 150 °С і виділяє його при температурі 25 °С, ефективний лише на 30 %. У цьому світлі ефективність 10 – 20 % є істотним відсотком теоретичної ефективності, особливо в порівнянні з іншими варіантами для низької температури, такими як використання п'єзоелектриків, які є ефективними лише на 1 %.

Цикл Каліни [7, 11] є варіацією циклу Ренкіна, що використовує суміш аміаку і води в якості робочої рідини. Ключовою відмінністю між циклами одинарної рідини і циклами, які використовують подвійні рідини, є профіль температури під час кипіння і конденсації. Для циклів одної рідини (наприклад, парового або органічного циклів Ренкіна) температура залишається постійною під час кипіння. Оскільки тепло передається в робоче середовище (наприклад, воду), температура води повільно зростає до температури кипіння, при якій температура залишається постійною, поки вся вода не випарується. Навпаки, бінарна суміш води і аміаку (кожна з яких має іншу точку кипіння) підвищить свою температуру під час випаровування. Це дозволяє краще підібрати термічну відповідність з джерелом відпрацьованого тепла і охолоджуючим середовищем в конденсаторі. Отже, ці системи забезпечують значно більшу енергоефективність.

Цикл був винайдений у 1980-х роках, і перша електростанція, заснована на циклі Каліни, була побудована в Canoga Park, штат Каліфорнія в 1991 році.

Таблиця 2

*Методи перетворення відходів тепла в електричну енергію
через механічну роботу [7 – 11]*

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

Порівняння основних параметрів механічних методів перетворення енергії відпрацьованого тепла в електричну енергію, наведено у табл. 2. Як видно з таблиці, для успішної конкуренції у низькотемпературній області термоелектричним рекуператорам енергії потрібно досягнути вартості не вище 1 \$ / Вт.

1.2. Пряме перетворення теплової енергії в електричну

Для рекуперації низькотемпературних відходів тепла найбільш сприятливим серед методів прямого перетворення теплової енергії в електричну є термоелектричний [12 – 16].

Крім термоелектричного перетворення енергії, розробляються і інші технології, які дозволяють виробляти електроенергію безпосередньо з тепла. До них належать такі методи як термоакустичний, піроелектричний, термомагнітний, термоеластичний, п'єзоелектричний та ін.

[6, 7, 17 – 22]. У літературі немає інформації про випробування таких систем в промислових приладах для утилізації тепла, хоча деякі з них пройшли певні випробування прототипів у таких програмах, як рекуперація тепла в автомобільній техніці.

2. Існуючі термоелектричні рекуператори відходів тепла

На основі аналізу літературних даних можна виділити найбільш поширені на даний час напрями використання термоелектричних рекуператорів тепла: промислові установки, двигуни внутрішнього згоряння, теплові електростанції, бойлери, газові турбіни, побутове тепло.

2.1. Термоелектричні рекуператори тепла промислових установок

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 індустриальних процесів щорічно пропадає впусту 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 [110].

На сьогоднішній день активно досліджується рекуперація відпрацьованого тепла [43 – 51] від таких енергоємних промислових об'єктів, як сталеварні заводи [26, 36 – 41, 54, 55], цементні печі [24, 27 – 35, 38 – 40, 52, 54], стекловарні печі [38 – 40, 52], печі для овідпалу вапна [38, 39, 52], печі для виготовлення етилену [38, 39], сміттєперероблювальні заводи [104, 105], печі для виплавки алюмінію і других металів [38, 39, 52] та ін.

Так вченими компаній KELK Ltd. і JFE Steel Corporation (Японія) [36, 37] спільно був створений і випробуваний термоелектричний рекуператор, що використовує відходи тепла від сталеварної печі (рис. 3). Його потужність складає біля 9 кВт при ККД на рівні 8 %.

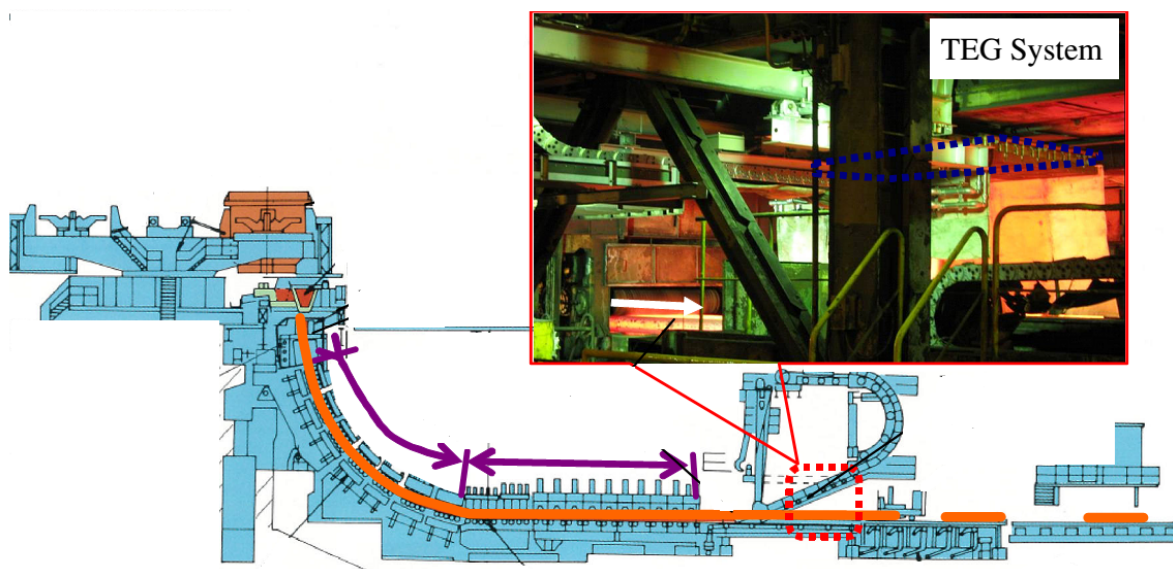


Рис. 3. Термоелектричний генератор, що встановлено на лінії виготовлення сталі компанії JFE (Японія) [36].

Термоелектричний рекуператор, що використовує відходи тепла від печі для виготовлення цементу, був встановлений на цементній печі заводу Awazu компанії Komatsu (Японія) (рис. 4). Потужність такого рекуператора становить біля 10 кВт.

Рекуператор відпрацьованого тепла цементних печей [35] розроблений також вченими Інститута досліджень промислових технологій (Тайвань) і Інституту термоелектрики (України). Особливістю такого генератора є його розміщення на деякій віддалі від цементної печі, яка обертається, при цьому він не впливає на технологічні процеси всередині печі.



Рис. 4. Установка термоелектричного генератора на цементній печі заводу Awazu компанії Komatsu (Японія) [31].

Проект по утилізації відходів тепла від сміттєпереробних заводів за допомогою термоелектрики був реалізований спільними зусиллями компанії Fudzitaka (Японія) і Інституту термоелектрики (Україна) [104, 105]. Потужність одного блока такого рекуператора, встановленого на заводі компанії Tokio Gas, склала ~1 кВт.

Інтерес до використання відходів тепла від різних технологічних процесів в промисловості проявляє Департамент енергетики США. За його підтримки був створений цикл робіт, присвячений рекуперації відпрацьованого тепла [38, 39, 52] від сталеварних заводів, цементних печей, скловарних печей, печей для відпалу вапна, печей для виготовлення етилену, печей для виплавки алюмінію та інших металів [38, 39, 52]. В цих роботах приводяться економічні та технічні оцінки можливості створення такого обладнання. Проте до реальних використань справа не дійшла.

Досить цікавими виглядають роботи, присвячені використанню відходів тепла від промисловості комбінованим методом, який поєднує термоелектричне перетворення енергії і органічний цикл Ренкіна [50, 51]. Це дозволяє підвищити ККД перетворення до 13 %.

2.2. Термоелектричні рекуператори тепла від двигунів внутрішнього згорання

Останнім часом темі рекуперації тепла від двигунів внутрішнього згорання присвячена велика кількість публікацій [28, 29, 52, 56 – 103]. Це роботи, пов'язані із рекуперацією відпрацьованого тепла переважно від двигунів легкових автомобілів (рис. 5).

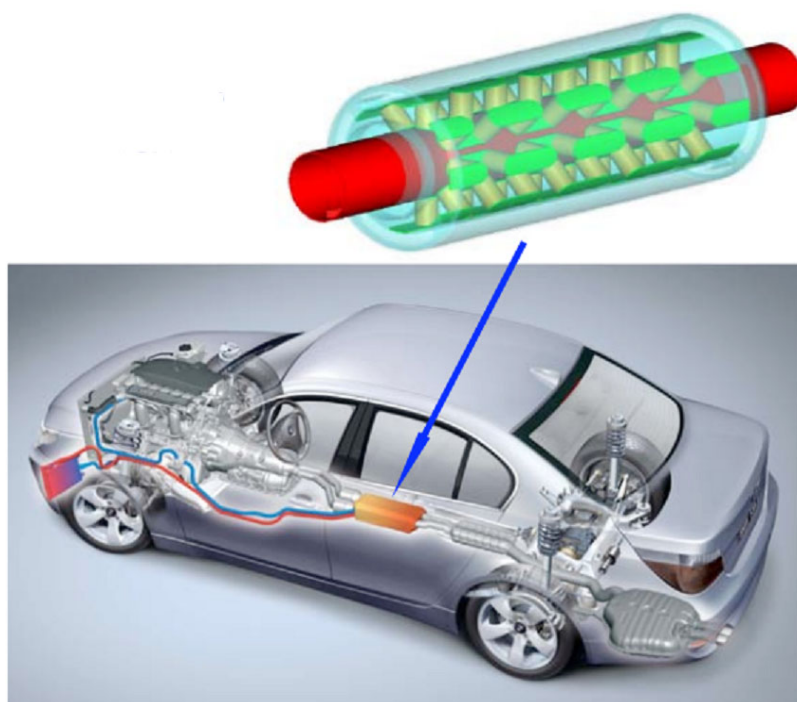


Рис. 5. Термоелектричний рекуператор для легкових автомобілів [52].

В дослідженнях японських вчених [28, 29] розглянуто використання термоелектричного рекуператора, що використовує теплову енергію викидних газів мотоциклу Suzuki. Потужність, що генерується таким чином, складає 10 Вт при вазі 3 кг і не дає можливості говорити про перспективи його масового використання.

Компанією BMW [63, 64] проведено цикл досліджень і випробувань термоелектричного рекуператора енергії викидних газів легкового автомобіля. Досягнуто потужність 200 Вт при масі рекуператора 13 кг.

Достатньо низьку ефективність показав термоелектричний рекуператор, виготовлений компанією Nissan Motors [56, 61, 77]. Його ККД склав всього 0.1 % при генерованій потужності біля 36 Вт. Проте автори вважають, що підвищення ККД до 5 % при тих же умовах дозволить збільшити вихідну потужність до 950 Вт.

Компанією Hi-Z [56, 61, 82, 83] була представлена конструкція термоелектричного рекуператора тепла, що встановлений на автомобілі GM Sierra. Максимальна генерована таким пристроєм потужність склала 255 Вт при ККД на рівні 2 %.

Результати досліджень направлених на оптимізацію параметрів термоелектричного рекуператора теплової енергії від автомобільного двигуна представлені в [66]. Проектна потужність 600 Вт при ККД на рівні 4 – 5 % підтверджена серією експериментів.

Проте слід відмітити, що використання термоелектричних термоелектричних рекуператорів в легкових автомобілях має низьку надоліків [60, 70, 71]. Реальний виграв 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 з холодної сторони термоелектричного перетворювача в оточуючу воду), а також великих вантажівок і спеціальної техніки [75, 80, 82, 93, 97].

Так компанією Hi-Z [61, 75, 80, 82] був представлений термоелектричний рекуператор енергії викидних газів від дизельного двигуна NTC-350 вантажного автомобіля. Після циклу

випробувань і допрацювань була досягнута потужність на рівні 1 кВт. ККД такого рекуператора склав всього 1.3 %.

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 [100, 103] приводяться результати розрахунків комбінованого рекуператора, що використовує термоелектричне перетворення в поєднанні з органічним циклом Ренкіна.

2.3. Термоелектричні рекуператори для теплових електростанцій

Підвищення ефективності перетворення енергії на теплових електростанціях є виключно важливою задачею.

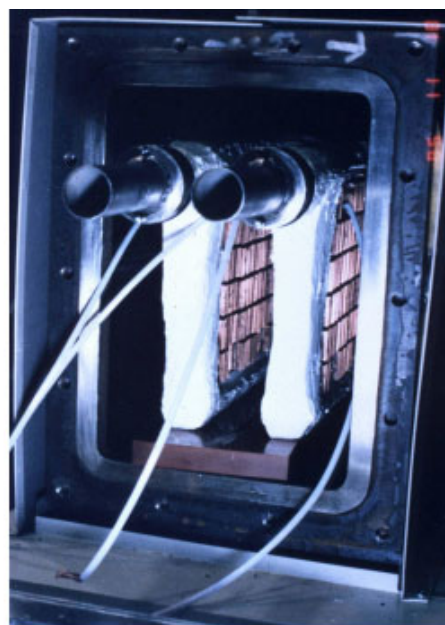


Рис. 6. Термоелектричний рекуператор, що встановлено на тепловій електростанції компанії Tokyo Electric Power Company [106].

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 (рис. 6).

Економічні і технічні оцінки можливості створення аналогічних рекуператорів були проведені також в [38, 39], проте практичної реалізації проекту не відбулося.

2.4. Термоелектричні рекуператори відходів тепла від бойлерів

Бойлери для отримання пару і гарячої води використовуються практично на любых великих підприємствах, в школах і лікарнях, великих офісних будівлях і для побутових потреб [109]. Джерелом тепла для таких бойлерів зазвичай є енергія згорання газу або іншого палива.

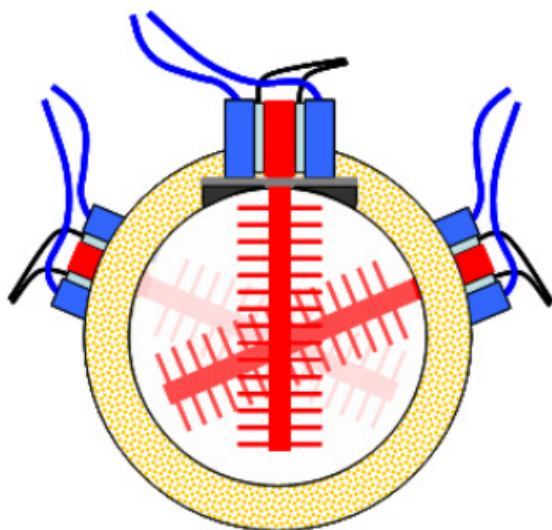


Рис. 7. Монтаж термоелектричного генератора в повітропроводі бойлера [38].

В [38, 39] проведені дослідження і розроблена конструкція термоелектричного рекуператора, який використовує відходи теплової енергії від промислових бойлерів (рис. 7). Реалізовано ККД такого перетворювача на рівні 2 %.

Вчені із Технологічного університету Брно (Чехія) розробили і провели випробування термоелектричного рекуператора для утилізації відходів тепла від бойлера, що використовує в якості палива біомасу. [108]. Потужність, що генерується таким пристроєм, становить 8.5 Вт, а загальна ефективність бойлера зростає до 76 %.

2.5. Термоелектричні рекуператори тепла від газових турбін

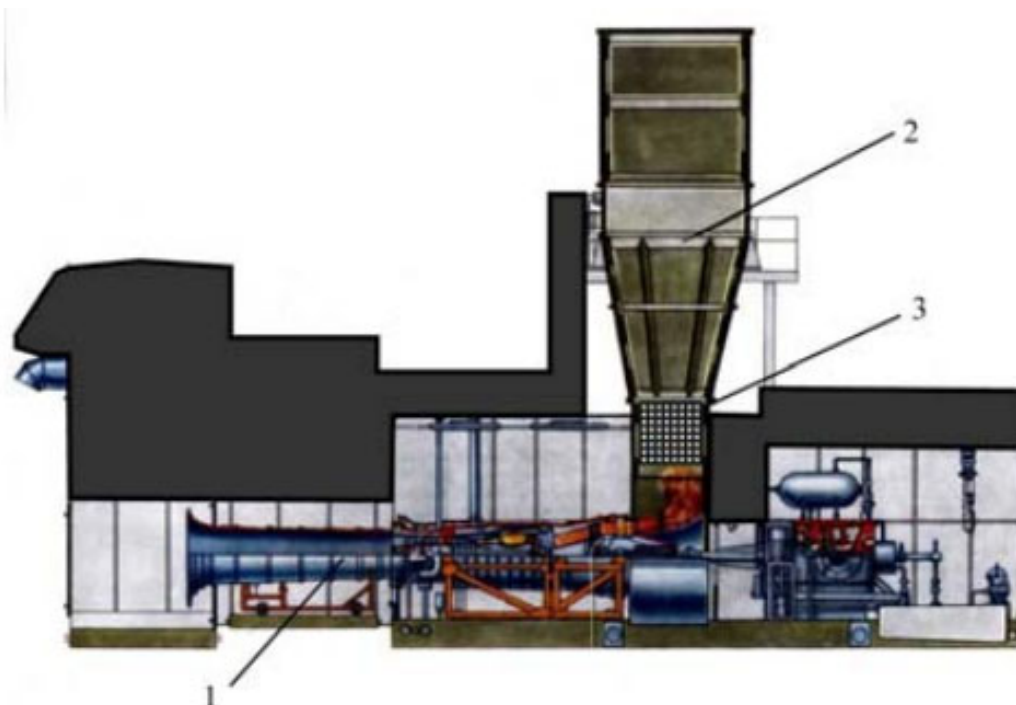


Рис. 8. Газоперекачуючий агрегат. 1 – газова турбіна, 2 – викидний пристрій, 3 – термоелектричний рекуператор тепла [110].

Темі утилізації відпрацьованого тепла від газових турбін присвячені роботи [23 – 25, 110]. В якості джерела теплової енергії використано викидні гази турбіни перекачувальних станцій на газових магістралях.

Конструкція такого рекуператора (рис. 8) забезпечує генерацію електричної потужності на рівні 7 кВт, що достатньо для живлення газоперекачувальних станцій при аварійних режимах роботи. Таким чином забезпечується резервне живлення станцій, що значно збільшує надійність її роботи.

2.6. Термоелектричні рекуператори побутових відходів тепла

Можливості термоелектричної рекуперації не обмежуються виключно великими промисловими джерелами теплової енергії. В останній час все активніше розвивається напрямок утилізації теплової енергії різноманітних побутових пристроїв для отримання електричної енергії, яка необхідна для живлення малопотужного обладнання (освітлення приміщення безпечною напругою 12 В; зарядка акумуляторів побутових пристроїв; забезпечення циркуляції повітря за рахунок використання вентиляторів; живлення РК-телевізорів і іншої радіоапаратури) [16].

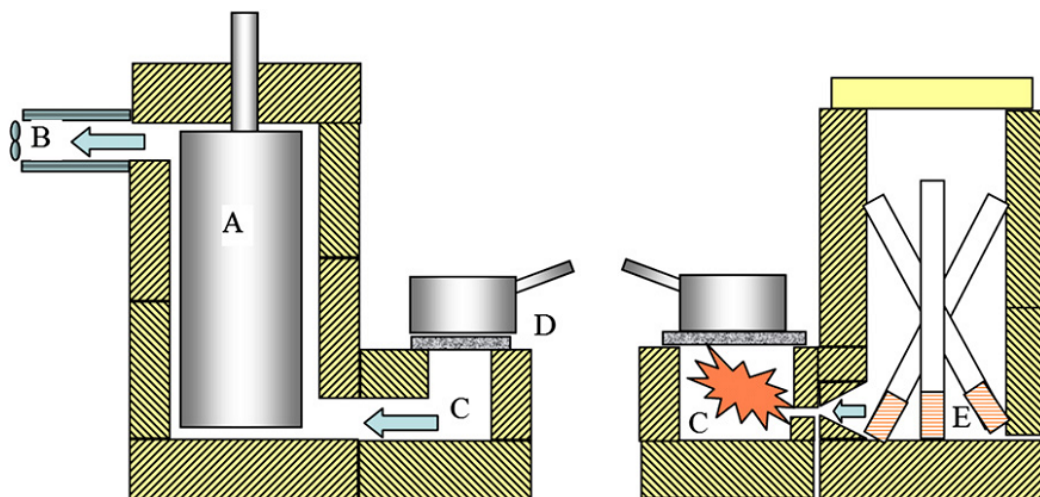


Рис. 9. Система рекуперації тепла від згорання біомаси в побутовій плиті (А – водяний бак, В – вихід газів і вентилятор, С – гарячі гази від згорання палива, D – кухонна плита, Е – камера згорання) [112].

В роботах [111 – 115] приводяться результати розробки термоелектричного рекуператора тепла від згорання біомаси в побутовій кухонній плиті (рис. 9). Перепад температур на термоелектричних модулях створюється з однієї сторони полум'ям С, а з другої – водяним баком А. ККД таких генераторів складає близько 4 – 5 %, а питома вартість виробленої електроенергії – 2.7 – 5 \$ / Вт.

Аналогічні прилади, що дозволяють утилізувати побутові відходи тепла, розробляються багатьма організаціями, проте, на жаль, наразі рано говорити про їх масовий випуск і доступність такої продукції.

1.7. Інші використання термоелектричних рекуператорів тепла

Одним із застосувань термоелектрики для утилізації відпрацьованого тепла є рекуператор, що використовує відходи тепла від процесу сушки біомаси [116]. Схема такого рекуператора

приведена на рис. 11. Потужність, що ним генерується, використовується для живлення вентиляторів, які забезпечують циркуляцію горячого повітря в такій системі.

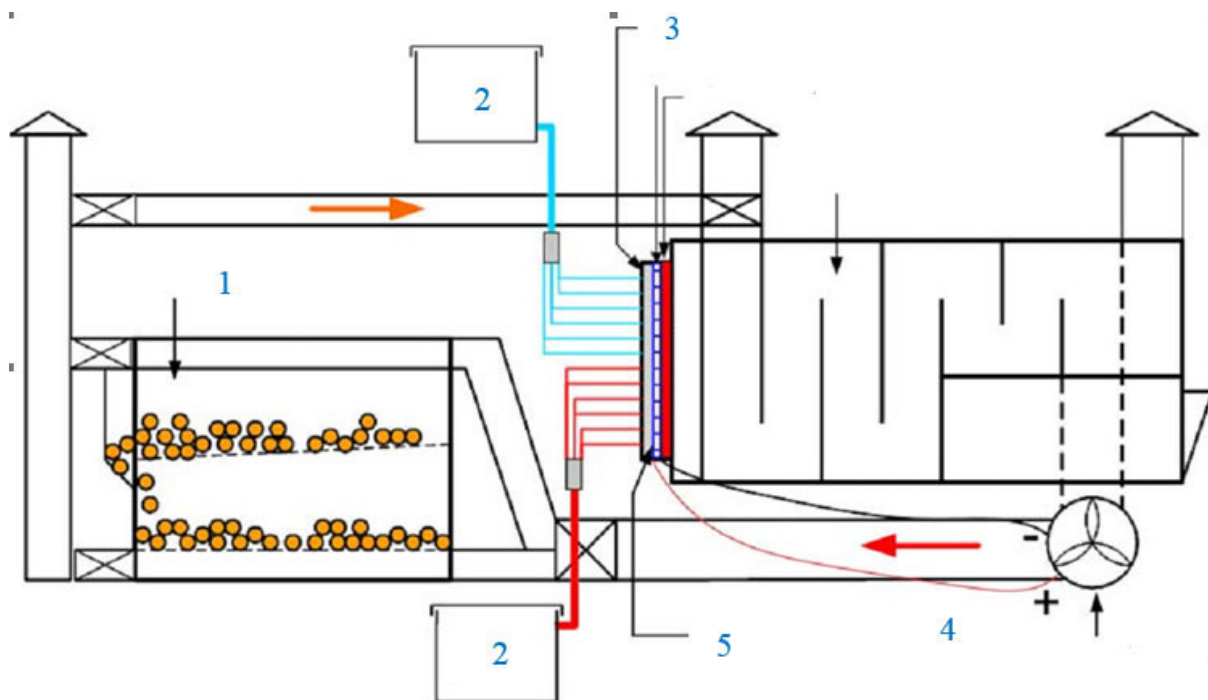


Рис. 11. Термоелектричний рекуператор, що використовує відходи тепла від процесу сушки біомаси:
1 – сушильна камера, 2 – ємність з гарячою водою, 3 – система охолодження генератора,
4 – подача горячого повітря, 5 – термоелектричний перетворювач [116].

Компанією Toshiba розроблений термоелектричний рекуператор потужністю 55 Вт з ККД 1.8 % [111]. Для перетворення він використовує побічне тепло роботи електричного трансформатора.

Цікавим напрямком розвитку термоелектрики є її застосування для живлення малопотужних пристроїв. Зниження потужності споживання і поява високоефективних перетворювачів напруги, що починають працювати при рівні 30 мВ, визначили появу на ринку нового рішення для живлення малопотужних пристроїв. Воно працює за рахунок перетворення побічного тепла в електричну енергію. Це дозволяє підвищити строк служби і надійність широкого спектру автономних пристроїв, що потребують регулярної заміни батарей живлення [124].

Зокрема, таким чином вирішується живлення безпроводних датчиків, сенсорів, вимірювачів показників, систем контролю параметрів і систем передачі інформації в важкодоступних чи рухомих частинах обладнання, що дає можливість здійснювати контроль стану обладнання і планувати його технічне обслуговування. Інше перспективна область – застосування в системах управління опалення приміщень всередині будинку і зняття показників з різноманітних лічильників витрати ресурсів.

Мініатюрні термоелектричні рекуператори, що використовуються для живлення малопотужної апаратури і датчиків на борту літака. Розглянуті в роботах [117 – 122]. На рис. 12 показано монтаж такого пристрою під крилом літака. Авторами приводяться результати серії випробувань таких джерел, що підтверджує їх високу ефективність.



Рис. 12. Місце встановлення і зовнішній вигляд термоелектричного рекуператора, що використовує теплові відходи турбіни літака Airbus A 380 [116].

Таким чином, ефективність створених на даний час термоелектричних рекуператорів енергії знаходиться в межах 1 – 7 % в діапазоні температур відпрацьованого тепла 50 – 500 °С. Вартість таких генераторів становить від 2.7 до 13.5 \$ / Вт при терміні служби 10 – 30 років.

Такі показники не дозволяють термоелектриці конкурувати з паровими циклами Ренкіна та Каліни і говорять про потребу подальшого вдосконалення термоелектричних рекуператорів.

Детальний аналіз можливостей зниження вартості термоелектричних рекуператорів відходів тепла наведений в роботі [125]. З нього слідує, що досягнення потрібної вартості 1 \$ / Вт є можливим за умови створення теплообмінних систем з вартістю до 1 \$ / (Вт/К).

Висновки

1. Розглянуто найбільш поширені напрямки використання термоелектричних рекуператорів тепла, а саме – промислові установки, двигуни внутрішнього згоряння, теплові електростанції, бойлери, газові турбіни, побутове тепло.
2. Встановлено, що найбільш ефективним є використання термоелектричних рекуператорів відпрацьованого тепла від енергоємних промислових об'єктів, а також від потужних двигунів внутрішнього згоряння встановлених, наприклад, на великих вантажівках або кораблях.
3. Перспективним також є використання мініатюрних термоелектричних рекуператорів для живлення малопотужної апаратури, а також утилізація побутових відходів тепла.
4. Наведено порівняльний аналіз існуючих методів рекуперації низькотемпературних відходів тепла – традиційного та органічного циклів Ренкіна, циклу Каліни та ін. Показано, що для успішної конкуренції у низькотемпературній області термоелектричним рекуператорам енергії потрібно досягнути вартості не вище 1 \$ / Вт, що є можливим за умови створення теплообмінних систем з вартістю до 1 \$ / (Вт/К).

Література

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*, 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. Паньків В. Когенерація: Як це працює // Мережі і бізнес. – 2010 р. – № 4. – http://www.ges-ukraine.com/uploaded/articles/kogeneracia-SiB_obzor.pdf
 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. Arvind C. Thekdi. (2007). Waste heat to power economic tradeoffs and considerations. *Proc. of the 3rd Annual Waste Heat to Power Workshop, USA*.
 8. Paul Cunningham P.E. (2002). Waste heat/cogen opportunities in the cement industry. *Cogeneration and Competitive Power Journal*, 17 (3), 31 – 51.
 9. S. Quoilinet al (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. Milewska Jarosław, Krasucki 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. Anatychuk L.I. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2 – Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Institute of Thermoelectricity.
 13. Goldsmid H.J. (1960). *Applications of Thermoelectricity*. Methuen & Co Ltd., London and John Wiley & Sons Inc. New York.
 14. Anatychuk L.I. (2001). Rational areas of research and applications of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 3 – 14.
 15. Anatychuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 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. Chen Y. 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. Wail Aladayleh, Ali Alahmer (2015). Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type Stirling engine. *Journal of Energy*, 2015. – 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. – 1976.

23. Onoroh, Francis & Ikebudu, Kingsley & Muhammed-Thani, Abdulqadir. (2012). Improved efficiency performance of a gas turbine with a thermoelectric generator. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3, 1 – 8.
24. Mirhosseini, M., Rezaia, A., Rosendahl, L. (2019). Harvesting waste heat from cement kiln shell by thermoelectric system. *Energy*, 168, 358 – 369.
25. Wu, Yongjia & Zhang, Haifeng & Zuo, Lei. (2018). Thermoelectric energy harvesting for the gas turbine sensing and monitoring system. *Energy Conversion and Management*, 157. 215 – 223. 10.1016/j.enconman.2017.12.009.
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)*.
27. Kaibe H., Kajihara T., Fujimoto S., Makino K., Hachiuma H. (2011). Recovery of plant waste heat by a thermoelectric generating system. *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., Kajihara 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. 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 (2015). Study of thermoelectric generation unit for radiant waste heat. *Materials Today*, 2.
34. Kaibe H., Kajihara T., Nagano K., Makino K., Hachiuma H., Natsuume D. (2014). Power delivery from an actual thermoelectric generation system. *Journal of Electronic Materials*, 43 (6), 2099 – 2103
35. Anatychuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., and Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity* 5, 36 – 42.
36. Kuroki T., Kabeya K., Makino K., Kajihara T., Kaibe H., Hachiuma H., Matsuno H. (2014). Thermoelectric generation using heat in steal works. *Journal of Electronic Materials*.
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. 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), 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. (2012). Waste-to-energy thechnologies 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*, 50 (12), 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*, 23 (4).
 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, 2010, China, Shanghai*.
 56. Saqr K.M., Mansour M.K., and Musa M.N. (2008). Thermal calculation of thermoelectric generators operating on automobile exhaust gases: objectives and goals. *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, 76 – 82.
 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 limitations of useful power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport. *J. Thermoelectricity*,

- 3, 58 – 73.
61. K.M. Saqr, M.K. Mansour, and M.N. Musa. (2008). Thermal design of automobile exhaust-based thermoelectric generators: objectivities and challenges. *International J. Automotive Technology* 9 (2), 155 – 160.
 62. D.M. Rowe, 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)*.
 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. Fairbanks J.W. (2011). Development of automotive thermoelectric generators and air conditioner / heaters. *Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity (17-20.05.2011)*, [On line: <http://forum.inst.cv.ua/>].
 68. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for a gasoline engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 81 – 94.
 69. Kim, Tae Young & Negash, Assmelash & Cho, Gyubaek. (2016). Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*. 124. 280-286. 10.1016/j.enconman.2016.07.013.
 70. Korzhuev M.A., Granatkina Yu.V. (2012). Some bottlenecks of automotive thermoelectric generators and the search for new materials to eliminate them. *J. Thermoelectricity*, 1, 81 – 94.
 71. Liu X., Deng Y.D., Li Z., Su C.Q. (2014). Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. *Energ Conver Manage*, 90, 121 – 127, 10.1016/j.enconman. / 2014.11.015
 72. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2011). Efficiency of thermoelectric heat recuperators for internal combustion engine exhaust gases. *J. Thermoelectricity*, 4, 80 – 85.
 73. 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.
 74. 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.
 75. 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.
 76. 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.
 77. 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.
 78. 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.

79. 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, 2002.
80. Bass J. et al. (1992). 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. (1995). 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. (2007). Testing an automobile thermoelectric exhaust based thermoelectric generator in a light truck. *Proceedings of the IMECH E 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. (2004). 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. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for I.C. engine. *International Journal of Engineering and Innovate Technology*, 2 (12), 93 – 100.
85. 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).
86. 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).
87. Su C., Ye B., Guo X., Hui P. (2012). Acoustic optimization of automotive exhaust heat thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6).
88. Deng Y., Zhang Y., Su C. (2014). Modular analysis of automotive exhaust thermoelectric power generation system. *Journal of Electronic Materials*, 44, 1724 – 1732.
89. 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).
90. G.-P. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities. *JOM*, 61 (4), 79 – 85.
91. 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.
92. Vázquez, J., et al. (2002). 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. Wojciechowski K.T., Zybala 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, 2012, 501 – 504.
94. Wojciechowski K.T., Zybala 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*, edited by Daniel Jänsch and Co-Authors by expert verlag 2012, pp. 177 – 188.
95. 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.
96. 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.
97. 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*, p. 237 – 241.
98. Nelson C. (2006). Exhaust energy recovery. – *Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report*, p. 247 – 250.
99. Schock H., Case E., Downey A. (2006). 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. (2012). Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123. *Energy*, 45, 806 – 816.
101. Merksiz J., Fuc P., Lijewski P., Ziolkowski A., Wojciechowski K. (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*.
102. 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.
103. 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.
104. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Misawa K., Suzuki N. (1997). Thermal generators for waste heat utilization. *Report on ICT'97*.
105. Anatyshuk L.I., Razinkov V.V., Rozver Yu. Yu., Mikhailovsky V.Ya. (1997). Thermoelectric generator modules and blocks. *Report on ICT'97*.
106. Uemura K. (2002). History of thermoelectricity development in Japan. *J. Thermoelectricity*, 3, 7 – 16.
107. 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-I, 1986*.
108. Brazdil M., Pospil J. (2013). Thermoelectric power generation utilizing the waste heat from a biomass boiler. *Journal of Electronic Materials*, 42 (7).
109. Characterization of the U.S. Industrial/Commercial boiler population, Oak Ridge National Laboratory, May 2005, prepared by Energy and Environmental Analysis, Inc.
110. Anatyshuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. (2012). Thermoelectric recuperator 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. (2014). Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 371 – 381.
112. Champier D., Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35 (2), 935 – 42.
113. Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. (2003). Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renew Energy*, 28 (2), 205 – 22.

114. 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.
115. Lertsatitthanakorn C. (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol*, 98 (8), 1670 – 4.
116. Maneewan S., Chindaruksa S. (2009). Thermoelectric power generation using waste heat from a biomass drying. *Journal of Electronic Materials*, 38 (7).
117. 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).
118. 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.
119. 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*.
120. 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).
121. 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).
122. Samson D, Kluge M., Otterpohl T., Becker Th., Schmid U. (2010). Aircraft-specific thermoelectric generator module. *Journal of Electronic Materials*, 39 (9).
123. 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*.
124. 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).

Надійшла до редакції: 16.08.2022.

Anatychuk L.I., *Acad. NAS Ukraine*^{1,2}
Lysko V.V., *Cand. Sc (Phys & Math)*^{1,2}
Prybyla A.V., *Cand. Sc (Phys & Math)*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

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

RATIONAL AREAS OF USING THERMOELECTRIC HEAT RECUPERATORS

An analysis of the literature devoted to the methods of recovery of waste heat from various energy-intensive devices is presented. A comparative analysis of existing methods of recuperation of low-temperature waste heat is presented – the conventional and organic Rankine cycles, the Kalina cycle, etc. The characteristics of the existing thermoelectric heat recuperators are given, as well as the analysis of the possibilities of their further development and the most rational areas of their application.

Key words: 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*, 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. Pankiv V. (2010). Koheneratsiia: Iak tse pratsiuie [Cogeneration: How it Works]. *Merezhi i Biznes (Networks and Business)*, 4. – http://www.ges-ukraine.com/uploaded/articles/kogeneracia-SiB_obzor.pdf
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. Arvind C. Thekdi. (2007). Waste heat to power economic tradeoffs and considerations. *Proc. of the 3rd Annual Waste Heat to Power Workshop*, USA.
8. Paul Cunningham P.E. (2002). Waste heat/cogen opportunities in the cement industry. *Cogeneration and Competitive Power Journal*, 17 (3), 31 – 51.
9. S. Quoilinet al (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. Milewska Jarosław, Krasucki 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. (2005). *Thermoelectricity. Vol. 2 – Thermoelectric Power Converters*. Kyiv, Institute of Thermoelectricity.
13. Goldsmid H.J. (1960). *Applications of Thermoelectricity*. Methuen & Co Ltd., London and John Wiley & Sons Inc. New York.
14. Anatyshuk L.I. (2001). Rational areas of research and applications of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 1, 3 – 14.
15. Anatyshuk L.I. (2007). Current status and some prospects of thermoelectricity. *J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20.
16. Freik D.M., Nikyru L.I., Krynytskyi O.S. (2012). Achievements and problems of thermoelectricity. *Physics and Chemistry of the Solid State*, 13 (2), 297 – 318.
17. Chen Y. 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. Wail Aladayleh, Ali Alahmer (2015). Recovery of exhaust waste heat for ICE using the beta type Stirling engine. *Journal of Energy*, 2015. – 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. – 1976.
 23. Onoroh, Francis & Ikebodu, Kingsley & Muhammed-Thani, Abdulqadir. (2012). Improved efficiency performance of a gas turbine with a thermoelectric generator. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 3, 1 – 8.
 24. Mirhosseini, M., Rezaia, A., Rosendahl, L. (2019). Harvesting waste heat from cement kiln shell by thermoelectric system. *Energy*, 168, 358 – 369.
 25. Wu, Yongjia & Zhang, Haifeng & Zuo, Lei. (2018). Thermoelectric energy harvesting for the gas turbine sensing and monitoring system. *Energy Conversion and Management*, 157. 215 – 223. 10.1016/j.enconman.2017.12.009.
 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)*.
 27. Kaibe H., Kajihara T., Fujimoto S., Makino K., Hachiuma H. (2011). Recovery of plant waste heat by a thermoelectric generating system. *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., Kajihara 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. 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 (2015). Study of thermoelectric generation unit for radiant waste heat. *Materials Today*, 2.
 34. Kaibe H., Kajihara T., Nagano K., Makino K., Hachiuma H., Natsuume D. (2014). Power delivery from an actual thermoelectric generation system. *Journal of Electronic Materials*, 43 (6), 2099 – 2103
 35. Anatychuk L.I., Hwang Jenn-Dong, Lysko V.V., and Prybyla A.V. (2013). Thermoelectric heat recuperators for cement kilns. *J. Thermoelectricity* 5, 36 – 42.

36. Kuroki T., Kabeya K., Makino K., Kajihara T., Kaibe H., Hachiuma H., Matsuno H. (2014). Thermoelectric generation using heat in steel works. *Journal of Electronic Materials*.
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. 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), 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. (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*, 50 (12), 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*, 23 (4).
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, 2010, China, Shanghai*.
56. Saqr K.M., Mansour M.K., and Musa M.N. (2008). Thermal calculation of thermoelectric generators operating on automobile exhaust gases: objectives and goals. *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, 76 – 82.
 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 limitations of useful power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport. *J. Thermoelectricity*, 3, 58 – 73.
 61. K.M. Saqr, M.K. Mansour, and M.N. Musa. (2008). Thermal design of automobile exhaust-based thermoelectric generators: objectivities and challenges. *International J. Automotive Technology* 9 (2), 155 – 160.
 62. D.M. Rowe, 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)*.
 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. Fairbanks J.W. (2011). Development of automotive thermoelectric generators and air conditioner / heaters. *Proceedings of XIV International Forum on Thermoelectricity (17-20.05.2011)*, [Online: <http://forum.inst.cv.ua/>].
 68. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for a gasoline engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 81 – 94.
 69. Kim, Tae Young & Negash, Assmelash & Cho, Gyubaek. (2016). Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*. 124. 280-286. 10.1016/j.enconman.2016.07.013.
 70. Korzhuev M.A., Granatkina Yu.V. (2012). Some bottlenecks of automotive thermoelectric generators and the search for new materials to eliminate them. *J. Thermoelectricity*, 1, 81 – 94.
 71. Liu X., Deng Y.D., Li Z., Su C.Q. (2014). Performance analysis of a waste heat recovery thermoelectric generation system for automotive application. *Energ Conver Manage*, 90, 121 – 127, 10.1016/j.enconman. / 2014.11.015
 72. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2011). Efficiency of thermoelectric heat recuperators for internal combustion engine exhaust gases. *J. Thermoelectricity*, 4, 80 – 85.
 73. 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.

74. 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.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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.
79. 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, 2002*.
80. Bass J. et al. (1992). 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. (1995). 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.(2007). Testing an automobile thermoelectric exhaust based thermoelectric generator in a light truck. *Proceedings of the IMECH E 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. (2004). 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. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for I.C. engine. *International Journal of Engineering and Innovate Technology*, 2 (12), 93 – 100.
85. 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).
86. 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).
87. Su C., Ye B., Guo X., Hui P. (2012). Acoustic optimization of automotive exhaust heat thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 41 (6).
88. Deng Y., Zhang Y., Su C. (2014). Modular analysis of automotive exhaust thermoelectric power generation system. *Journal of Electronic Materials*, 44, 1724 – 1732.
89. 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).
90. G.-P. Thermoelectric power generation materials: technology and application opportunities. *JOM*, 61 (4), 79 – 85.
91. 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.
92. Vázquez, J., et al. (2002). 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. 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, 2012, 501 – 504*.
94. 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, edited by Daniel Jänsch and Co-Authors by expert verlag 2012, pp. 177 – 188*.
95. 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.
96. 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*.
97. 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, p. 237 – 241*.
98. Nelson C. (2006). Exhaust energy recovery. – *Advanced Combustion Engine Technologies, FY 2006 Progress Report, p. 247 – 250*.
99. Schock H., Case E., Downey A. (2006). 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. (2012). Parametric and exergetic analysis of waste heat recovery system based on thermoelectric generator and organic rankine cycle utilizing R123. *Energy*, 45, 806 – 816.
101. Merksiz J., Fuc P., Lijewski P., Ziolkowski A., Wojciechowski K. (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*.
102. 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.
103. 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.
104. Anatychuk L.I., Rozver. Yu.Yu., Misawa. K., Suzuki. N. (1997). Thermal generators for waste heat utilization. *Report on ICT'97*.
105. Anatychuk L.I., Razinkov V.V., Rozver Yu. Yu., Mikhailovsky V.Ya. (1997). Thermoelectric generator modules and blocks. *Report on ICT'97*.
106. Uemura K. (2002). History of thermoelectricity development in Japan. *J. Thermoelectricity*, 3, 7 – 16.
107. 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*.
108. Brazdil M., Pospil J. (2013). Thermoelectric power generation utilizing the waste heat from a

- biomass boiler. *Journal of Electronic Materials*, 42 (7).
109. Characterization of the U.S. Industrial/Commercial boiler population, Oak Ridge National Laboratory, May 2005, prepared by Energy and Environmental Analysis, Inc.
110. Anatyshuk L.I., Morozov V.I., Mitin V.P., Prybyla A.V. (2012). Thermoelectric recuperator 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. (2014). Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 371 – 381.
112. Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F. (2010). Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy*, 35 (2), 935 – 42.
113. Nuwayhid RY, Rowe DM, Min G. (2003). Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply. *Renew Energy*, 28 (2), 205 – 22.
114. 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.
115. Lertsatitthanakorn C. (2007). Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator. *Bioresour Technol*, 98 (8), 1670 – 4.
116. Maneewan S., Chindaruksa S. (2009). Thermoelectric power generation using waste heat from a biomass drying. *Journal of Electronic Materials*, 38 (7).
117. 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).
118. 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.
119. 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*.
120. 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).
121. 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).
122. Samson D, Kluge M., Otterpohl T., Becker Th., Schmid U. (2010). Aircraft-specific thermoelectric generator module. *Journal of Electronic Materials*, 39 (9).
123. 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.
124. 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).

Submitted: 16.08.2022.