

Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Прибила А.В.

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

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СЕКЦІЙНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ РЕКУПЕРАТОРІВ ТЕПЛА

У роботі розглянуто фізичну модель термоелектричного секційного рекуператора тепла. Наведено її математичний опис і розроблено комп'ютерну модель. Здійснено його моделювання для температур гарячих газів у діапазоні від 150 до 600°C. Встановлено залежності оптимальних температур секцій рекуператора від температури вхідного газу. Визначено кількість термоелектричних перетворювачів у кожній секції для досягнення оптимального розподілу температур у секціях. Розраховано питому вартість кожної із секцій термоелектричного рекуператора тепла в зазначеному діапазоні температур.

Ключові слова: рекуператор тепла, термоелектричний генератор, комп'ютерне моделювання.

The paper deals with a physical model of a thermoelectric sectional heat recuperator. Its mathematical description is given and a computer model is developed. The simulation of the recuperator is done for the hot gas temperature range from 150 to 600°C. Dependences of optimal temperatures of recuperator sections on the inlet gas temperature are established. The number of thermoelectric converters in each section for optimal temperature distribution in the sections is determined. The specific cost of each section of thermoelectric heat recuperator in the above temperature range is calculated.

Key words: heat recuperator, thermoelectric generator, computer simulation.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Щорічне споживання енергії у світі становить десь 13 ТВт. Зростання чисельності населення та розвиток промисловості, за прогнозами, вже до кінця сторіччя потроять ці показники [1-3]. Разом із цим, більшість обладнання для технологічних процесів у промисловості, теплові машини (турбіни, двигуни внутрішнього згорання й ін.) під час своєї роботи розсіюють величезну кількість теплових відходів [4]. Це тепло не тільки ніяк не використовується, але й призводить до негативних наслідків для навколишнього середовища, до його термального забруднення. Така ситуація пов'язана з тим, що температури теплових відходів перебувають в інтервалі 50-700 °С, а застосування теплових машин для цього інтервалу температур, особливо нижче 400 °С, у переважній

більшості випадків є нераціональним. Рекуперація таких відходів теплової енергії – актуальне завдання термоелектрики.

Аналіз літератури. Як показує аналіз [5], 90% теплової енергії, що скидається, виділяється на промислових об'єктах і обладнанні за температур поверхонь до 300 °С (рис.1). Для таких температур найбільш сприятливий для рекуперації тепла саме термоелектричний спосіб прямого перетворення теплової енергії в електричну [6-9].

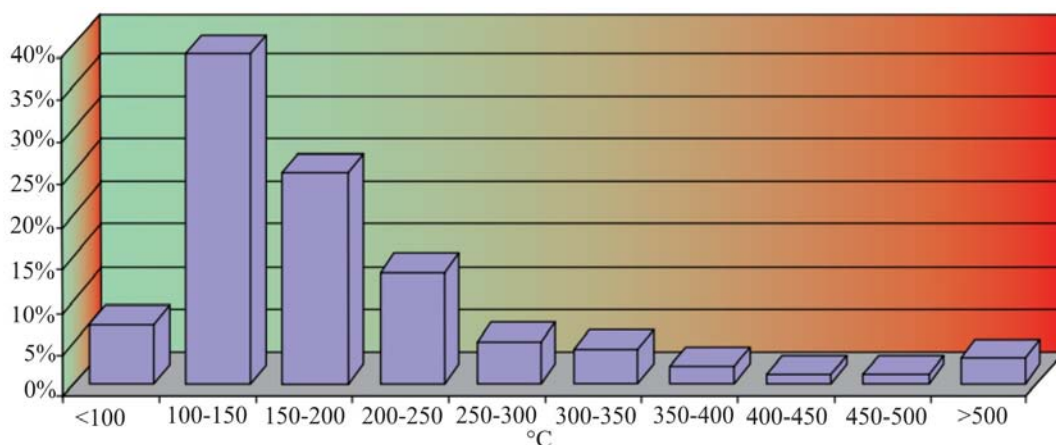


Рис. 1. Розподіл температур поверхонь промислових агрегатів [4].

У роботах [10-17] описано різні практичні застосування термоелектричних рекуператорів відпрацьованої теплової енергії від двигунів внутрішнього згорання, газових турбін, різних промислових пічок. У цих роботах розглядаються рекуператори, які складаються із однієї секції, що не завжди є ефективним. У [19-20] наводяться результати оптимізації термоелектричного секційного рекуператора, який використовує відходи тепла від автомобільного двигуна. Розрахунками встановлено можливість підвищення ефективності рекуперації теплової енергії до 40% за використання оптимальної кількості секцій генератора. Однак у цих роботах розрахунки проведено для діапазону температур 400-800°С, що, як було показано раніше, не відповідає найпоширенішим температурам рекуперації тепла.

Мета пропонованої роботи є підвищення ефективності термоелектричного рекуператора тепла у діапазоні температур від 150 до 600 °С шляхом оптимізації кількості секцій.

Фізична модель секційного термоелектричного рекуператора тепла

Фізичну модель термоелектричного секційного рекуператора тепла показано на рис.2. Кожна секція рекуператора складається з гарячого теплообмінника (1), термоелектричної батареї (2) з тепловим опором $R_{12}^{(i)}$ 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 $T_H^{(i)}(x)$. Розглянуто два варіанти теплообміну з холодної сторони термоелектричних батарей. У першому випадку її температура T_0 задається постійною, а в другому – враховується теплообмін холодного радіатора (3) із зовнішнім середовищем. Для розрахунків максимально можливої потужності рекуператора будемо нехтувати тепловими втратами.

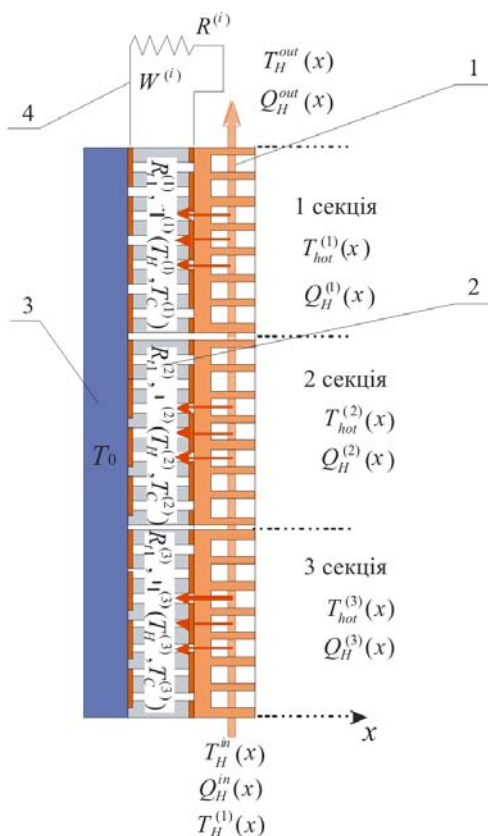


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного секційного рекуператора тепла:

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

Математичний і комп'ютерний опис моделі

Для оптимізації термоелектричного секційного рекуператора тепла необхідно знайти розподіли температур і теплових потоків у термоелектричних батареях кожної із секцій. Такі розрахунки для показаної моделі можливі тільки із застосуванням комп'ютерного моделювання.

Розглянемо одну із секцій генератора й умовно розділимо її на три області $\Omega_1 - \Omega_3$ з межами $g_1 - g_{10}$ (рис. 3). Область Ω_1 представляє гарячий теплообмінник з теплоносієм, область Ω_2 – термоелектричну батарею, область Ω_3 – гарячий і холодний теплообмінники.

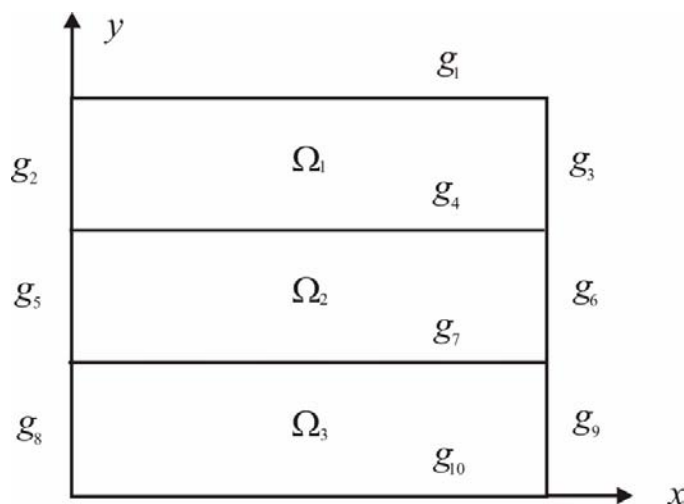


Рис. 3. Комп'ютерний показ областей і границь секції рекуператора.

В області Ω_1 наявне масоперенесення гарячого теплоносія. Рівняння теплопровідності для цієї області має вигляд

$$-\nabla(\kappa_H(T)\nabla T) = -\rho_H(T)C_H(T)\bar{v}\nabla T, \quad (1)$$

де ρ_H – густина, C_H – теплоємність, κ_H – теплопровідність газу, v_H – швидкість руху газу. Граничні умови для області Ω_1 враховують неперервність потоку газу в межах секції та між секціями, потік тепла через теплообмінники.

В області Ω_2 (термоелектричній батареї) виділяється Джоулеве тепло. Для області Ω_2 рівняння теплопровідності має вигляд

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

де κ_{TE} – ефективна теплопровідність термоелектричної батареї, Q_J – питома потужність тепла Джоуля, що виділяється в термоелектричній батареї.

Граничні умови для області Ω_2 враховують взаємодію термобатареї з теплообмінниками.

Область Ω_3 у цій моделі ТЕГ вважається термостатованою з температурою T_0 .

Сукупність граничних умов математично виражається в такий спосіб:

$$g_1: \quad q_1^{(i)}(x) = 0, \quad (3)$$

$$g_2, g_3: \quad Q_H^{in(1)} = Q_H^{in}, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (4)$$

$$g_4: \quad Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t1} \quad (5)$$

$$g_5, g_6: \quad q_4^{(i)}(y) = 0, \quad (6)$$

$$g_7: \quad Q_C^{(i)}(x) = (T_C^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2},$$

$$T(x) = T_0, \quad (7)$$

$$\Omega_3, g_8, g_9, g_{10}: \quad T(x, y) = T_0. \quad (8)$$

Сукупність рівнянь (1)-(2) із граничними умовами (3-8) дають можливість знайти поле температур $T(x, y)$ у ТЕГ і визначити розподіл температур $T_H^{(i)}(x)$ по гарячих сторонах секцій термоелектричних батарей.

Тоді потужність кожної секції можна визначати з такого виразу:

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_C^{(i)}(x)) dx. \quad (9)$$

Загальна потужність генератора

$$W_{TEG} = W^{(1)} + W^{(2)} + W^{(3)}. \quad (10)$$

ККД термоелектричного генератора

$$\eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_H^{in}}. \quad (11)$$

Для розрахунків електричної потужності рекуператора з урахуванням забезпечення роботи системи тепловідводу необхідно знати ефективність повітряно-рідинного теплообмінника

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_L, T_A), \quad (12)$$

де Q_{cool} – теплова потужність системи тепловідводу, W_{cool} – електрична потужність живлення системи тепловідводу, T_L – температура рідини, T_A – температура повітря. Така залежність отримана з експериментальних досліджень теплообмінника [18].

Ефективний ККД рекуператора вводиться виразом

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in} \quad (13)$$

Система рівнянь (1)-(2) із граничними умовами (3)-(8) розв'язувалася методом кінцевих елементів [21] на двомірній сітці.

Подальша оптимізація полягає в пошуку оптимальних гарячих температур секцій шляхом варіацій теплових опорів секцій для досягнення максимального інтегрального ККД термоелектричного рекуператора.

Результати комп'ютерного моделювання

Для розрахунків ККД і потужності було обрано термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te*, що є одними із кращих за добротністю в розглянутому діапазоні температур [21].

Комп'ютерне моделювання термоелектричного секційного рекуператора теплової енергії дало можливість одержати наступні результати.

На першому етапі здійснено оптимізацію гарячих температур секцій рекуператора. Наявність такого оптимуму пов'язано із впливом двох конкуруючих факторів. Зниження теплового опору секції призводить до збільшення теплового потоку через термоелектричний перетворювач, а значить до збільшення електричної потужності секції. З іншого боку, це призводить до зменшення гарячої температури термоелектричної батареї і відповідно, до зменшення її ККД. На рис.4 показано результати оптимізації гарячої температури секцій від температури вхідного газу. На рис.5 наведено відносну кількість однотипних термоелектричних модулів у секції для досягнення оптимального розподілу температур.

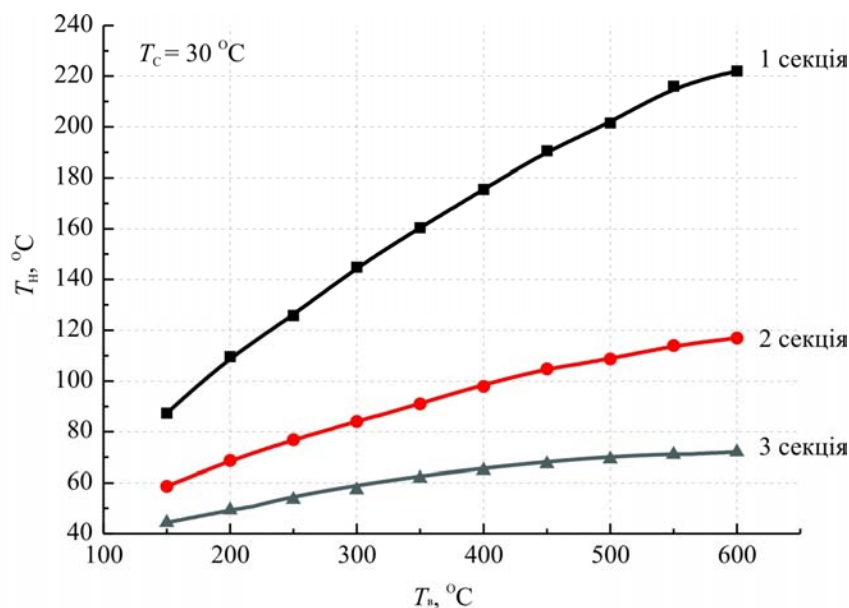


Рис. 4. Залежність оптимальної гарячої температури секцій від температури вхідного газу.

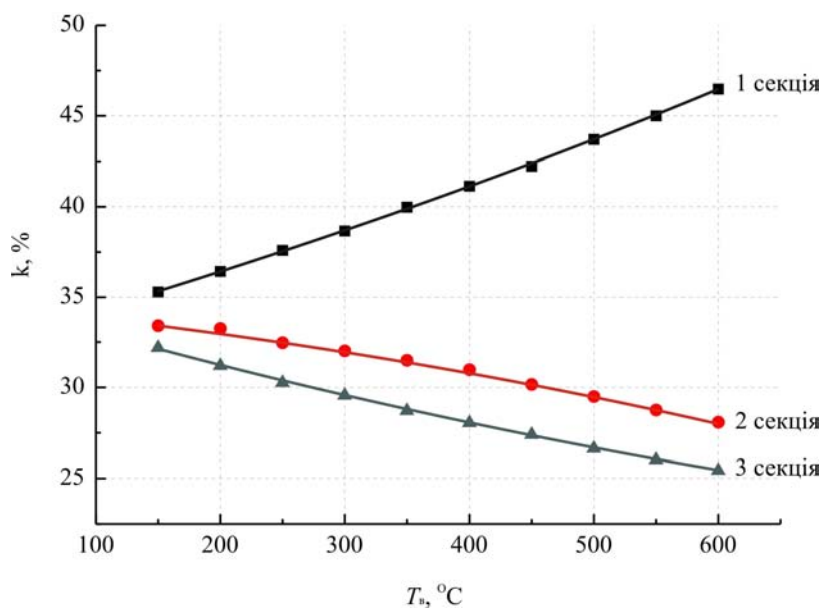


Рис. 5. Відносна кількість термоелектричних модулів у секції для досягнення оптимального розподілу температур.

Наступним етапом моделювання стало визначення залежності ККД термоелектричних модулів (рис. 6) і рекуператора тепла в цілому (рис. 7) від температур вхідного газу.

На рис. 6 наведено залежності ККД термоелектричних модулів кожної із секцій рекуператора від температур вхідного газу.

Як видно з рис. 7, використання другої секції термоелектричного рекуператора тепла призводить до збільшення ККД на ~16%, а третьої – усього на 4%.

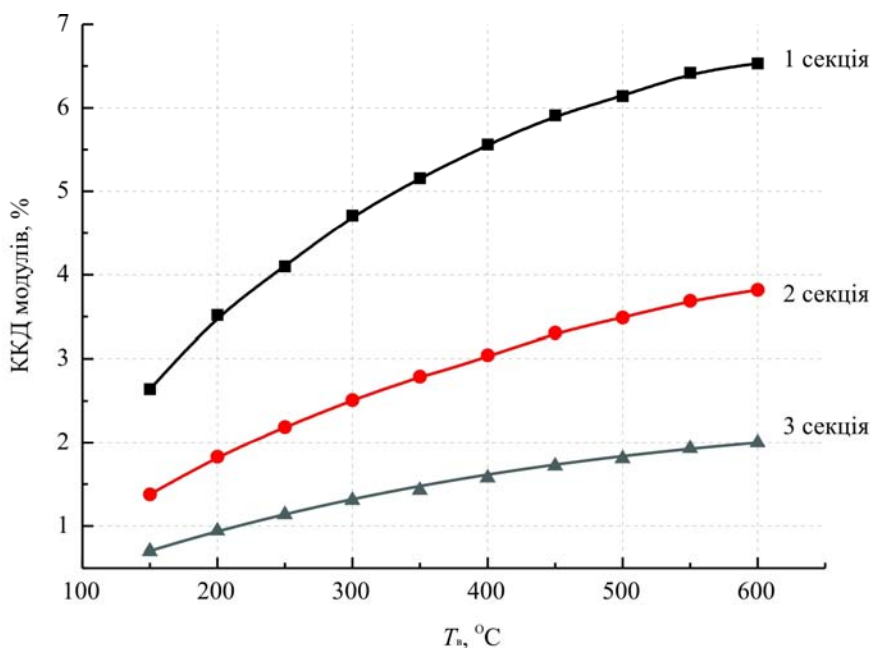


Рис. 6. Залежність ККД термоелектричних модулів секцій від температур вхідного газу.

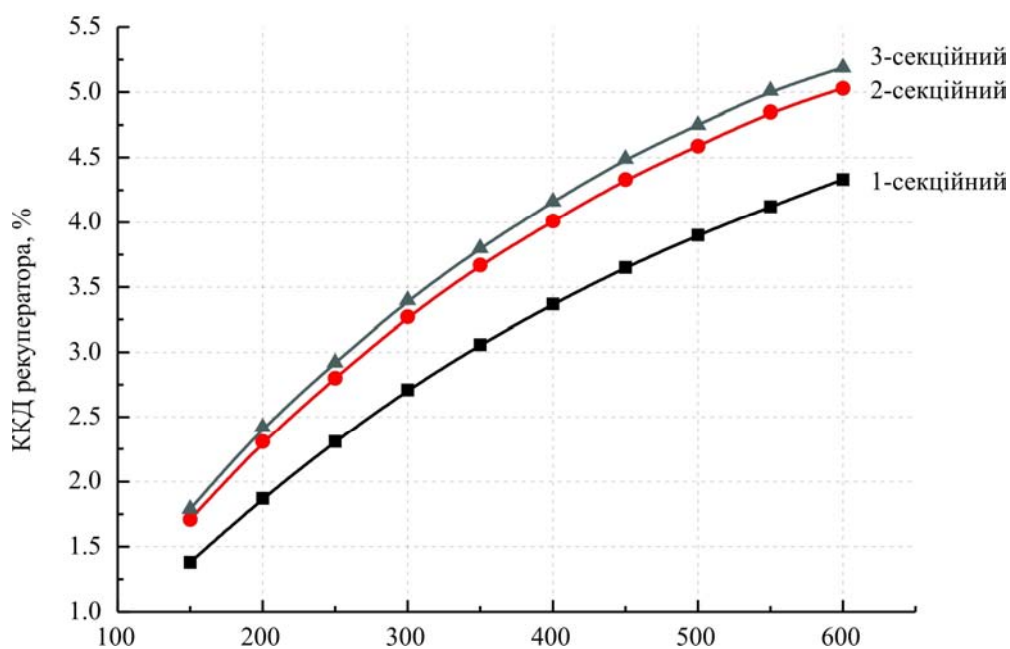


Рис. 7. Залежність ККД термоелектричного секційного рекуператора від температур вхідного газу.

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 75 – 85%, другої – 15 – 20%, третьої – близько 5%.

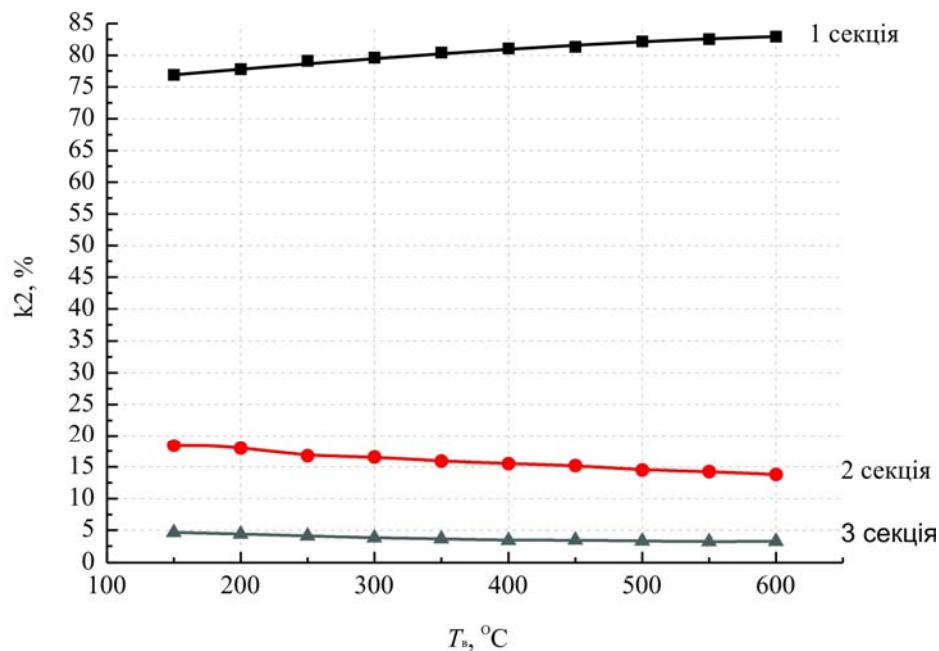


Рис. 8. Відсотковий вклад кожної із секцій рекуператора в його загальну потужність.

Для оцінки економічної доцільності використання секціонування термоелектричного рекуператора тепла здійснено розрахунки питомої вартості секцій (рис.9), ґрунтуючись на результатах, отриманих у роботі [22]. Як видно з рисунка, використання третьої секції в розглянутому діапазоні температур економічно недоцільне. Використання другої секції має сенс за температур гарячих газів від 400 °С.

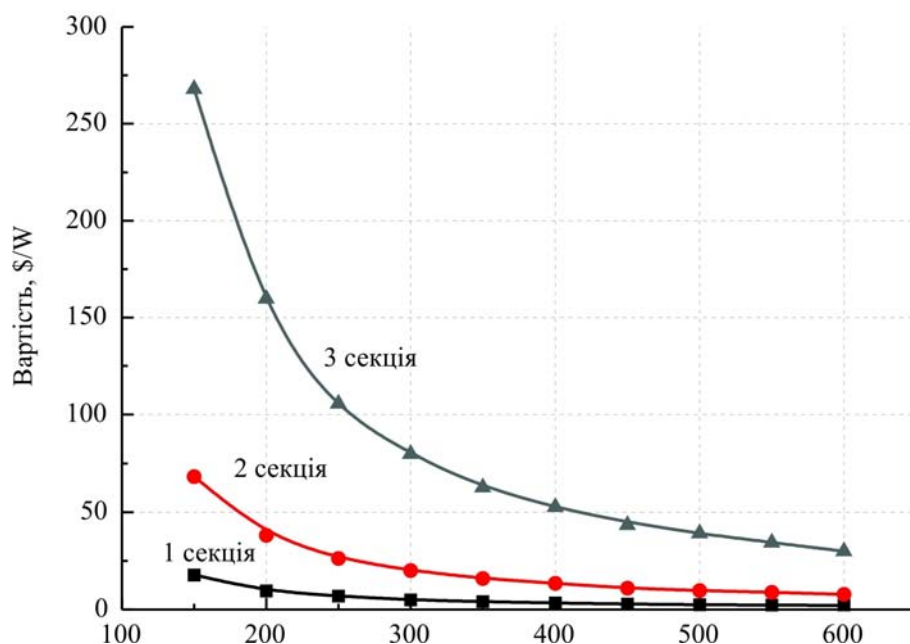


Рис. 9. Питома вартість секцій рекуператора.

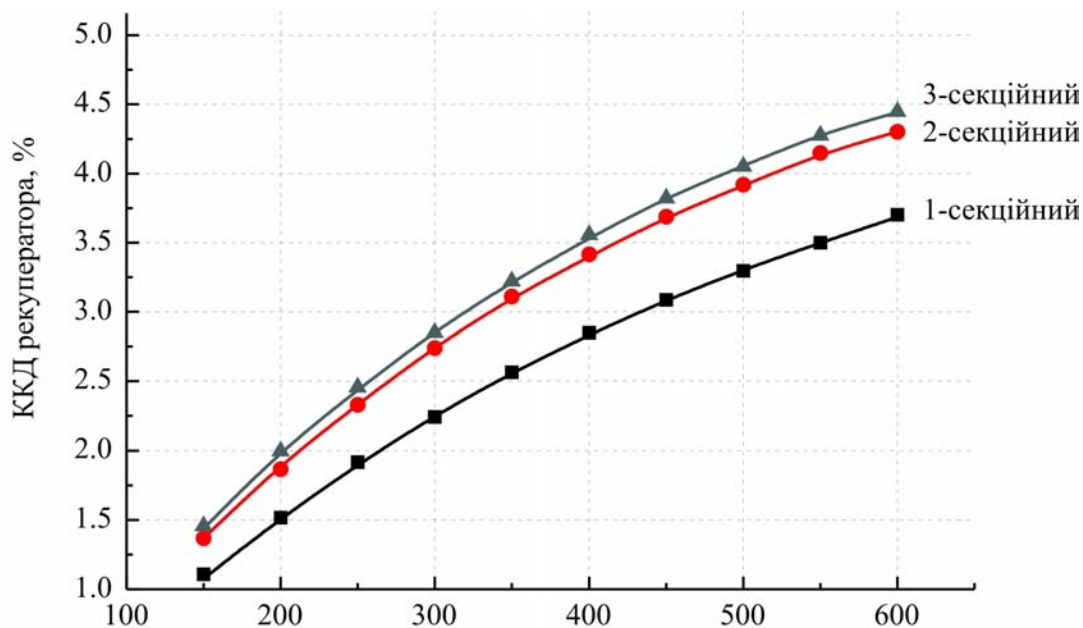


Рис. 10. Залежність ККД термоелектричного секційного рекуператора від температури вхідного газу з урахуванням витрат на забезпечення тепловідводу.

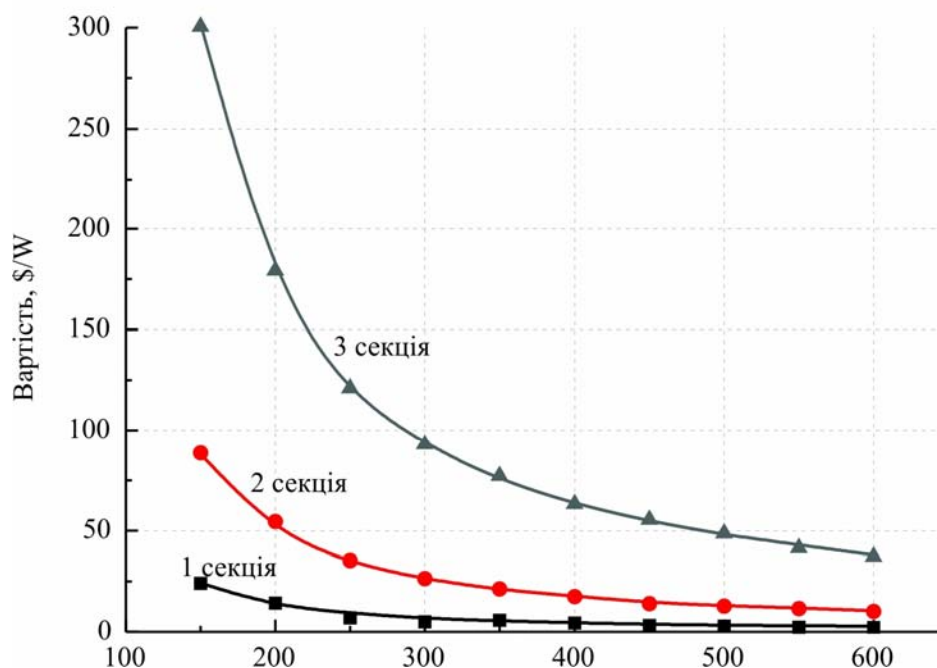


Рис. 11. Питома вартість секцій рекуператора з урахуванням витрат на забезпечення тепловідводу.

Висновки

1. Установлено залежності оптимальних температур секцій рекуператора від температури вхідного газу в діапазоні від 150 до 600 °C. Для першої секції від 90 до 220 °C, другої – від 60 до 120 °C, третьої – від 40 до 70 °C.
2. Визначено кількість термоелектричних перетворювачів у кожній секції для досягнення оптимального розподілу температур у секціях. Для низьких температур вхідного газу (>150°C) кількість термоперетворювачів у секціях приблизно є однаковою. З підвищенням температур збільшується частка термоперетворювачів у першій секції.
3. Використання другої секції термоелектричного рекуператора тепла в діапазоні температур вхідного газу від 150 до 600 °C призводить до збільшення його ККД на ~ 16%, а третьої – усього на 4%.
4. Розраховано питому вартість кожної із секцій термоелектричного рекуператора тепла в зазначеному діапазоні температур. Установлено, що питома вартість третьої секції рекуператора на порядок є вищою вартості першої секції, що робить її застосування недоцільним. Використання другої секції має сенс за температур гарячих газів від 400 °C.
5. Ефективність рекуперації тепла з урахуванням енергетичних витрат на забезпечення тепловідводу знижується на ~ 15 – 20%, а питома вартість збільшується відповідно на цю ж величину.

Література

1. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization, Report of the Basic Energy Sciences

- Workshop on Solar Energy Utilization, USA: DOE, April 18-21, 2005.
2. 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.
 3. Фреїк Д.М. Досягнення і проблеми термоелектрики / Д.М. Фреїк, Л.І. Никируй, О.С. Криницький // Фізика і хімія твердого тіла. - 2012. - Т.13. - №2. - С.297-318.
 4. В. Паньяків. Когенерація: Как это работает // Сети и бизнес. – 2010 г. - №4.
 5. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного питания // Новые технологии. № 12. с.131-138- (2010).
 6. Анатичук Л.І. Рациональні області досліджень і застосувань термоелектрики / Л.І. Анатичук // Термоелектрика. – 2001. – №1. – С. 3 – 14.
 7. Анатичук Л.І. Сучасний стан і деякі перспективи термоелектрики / Л.І. Анатичук // Термоелектрика. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
 8. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы. / А.С. Бернштейн – Москва: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с.
 9. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наук. думка. – 1979. – 768 с.
 10. Sano S., Mizukami H., Kaibe H. Development of high-efficiency thermoelectric power generation system / S. Sano // KOMATSU technical report. – 2003. – vol. 49.– № 152 – С. 1 – 7.
 11. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричний рекуператор тепла для газових турбін // XIII Міждержавний семінар «Термоелектрики і їх застосування». Санкт-Петербург, Росія, 2012 // XIII Міждержавний семінар «Термоелектрики і їх застосування» 13-14 листопада 2012 р. – Санкт-Петербург, Росія, 2012.
 12. L.I. Anatyshuk, 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).
 13. Kaibe H., Kajihara 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.
 14. Kajikawa T. Advances In Thermoelectric Power Generation Technology In Japan / T. Kajikawa // J. of Thermoelectricity. – 2011. – №3. – P. 5 – 19.
 15. 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)
 16. Термоелектричні рекуператори тепла для цементних печей / Л.І. Анатичук, Хен-Дон Хванг, В.В. Лисько [і. інш.] Термоелектрика. - 2013. №5. - С. 39-45.
 17. 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.

18. Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь // Термоелектрика, 2014. – №2. – С. 61-69.
19. Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь // Термоелектрика, 2014. – №4. – С. 84-92.
20. Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з бензиновим двигуном / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь // Термоелектрика, 2014. – №3. – С. 87-92.
21. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.
22. Anatyshuk 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. Anatyshuk // J. of Thermoelectricity. – 2012. – №4. – P. 73 – 79.

Надійшла до редакції 11.12.2014