

**Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В.**

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина

---

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕКЦИОННЫХ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕКУПЕРАТОРОВ ТЕПЛА**

---

*В работе рассмотрена физическая модель термоэлектрического секционного рекуператора тепла. Приведено ее математическое описание и разработана компьютерная модель. Осуществлено его моделирование для температур горячих газов в диапазоне от 150 до 600 °С. Установлены зависимости оптимальных температур секций рекуператора от температуры входящего газа. Определено количество термоэлектрических преобразователей в каждой секции для достижения оптимального распределения температур в секциях. Рассчитана удельная стоимость каждой из секций термоэлектрического рекуператора тепла в указанном диапазоне температур.*

**Ключевые слова:** рекуператор тепла, термоэлектрический генератор, компьютерное моделирование.

*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.

## **Введение**

*Общая характеристика проблемы.* Ежегодное потребление энергии в мире составляет порядка 13 ТВт. Рост численности населения и развитие промышленности по прогнозам уже до конца столетия утратят эти показатели [1-3]. Вместе с тем, большинство оборудования для технологических процессов в промышленности, тепловые машины (турбины, двигатели внутреннего сгорания и др.) во время своей работы рассеивают громадное количество тепловых отходов [4]. Это тепло не только никак не используется, но и приводит к негативным последствиям для окружающей среды, к ее термальному

загрязнению. Такая ситуация связана с тем, что температуры тепловых отходов находятся в интервале 50-700 °С, а применение тепловых машин для этого интервала температур, особенно ниже 400 °С, в подавляющем числе случаев нерационально. Рекуперация таких отходов тепловой энергии – актуальная задача термоэлектричества.

*Анализ литературы.* Как показывает анализ [5], 90% сбрасываемой тепловой энергии выделяется на промышленных объектах и оборудовании при температурах поверхностей до 300 °С (рис. 1). Для таких температур наиболее благоприятным для рекуперации тепла является именно термоэлектрический способ прямого преобразования тепловой энергии в электрическую [6-9].

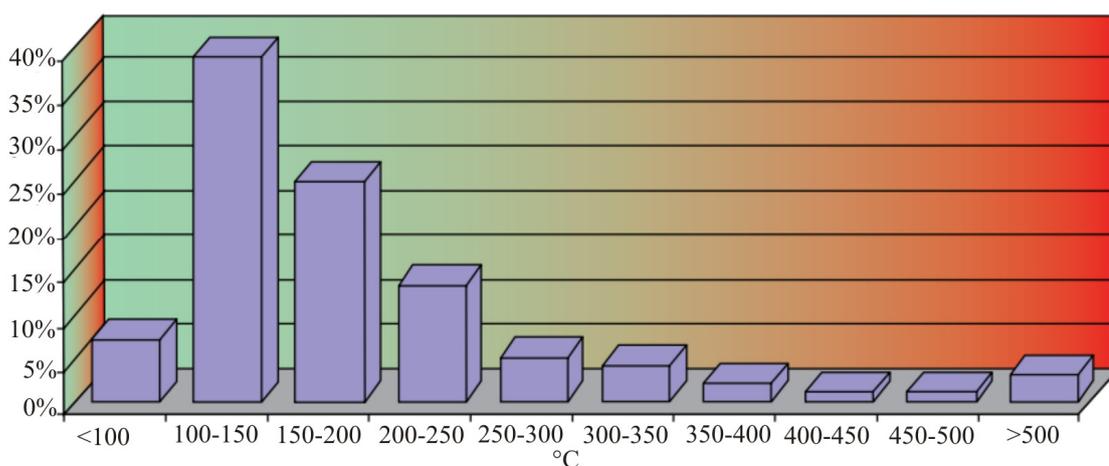


Рис. 1. Распределение температур поверхностей промышленных агрегатов [4].

В работах [10-17] описаны различные практические применения термоэлектрических рекуператоров отработанной тепловой энергии от двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин, различных промышленных печей. В этих работах рассматриваются рекуператоры, состоящие из одной секции, что не всегда является эффективным. В [19-20] приводятся результаты оптимизации термоэлектрического секционного рекуператора, который использует отходы тепла от автомобильного двигателя. Расчетами установлена возможность повышения эффективности рекуперации тепловой энергии до 40% при использовании оптимального количества секций генератора. Однако в этих работах расчеты проведены для диапазона температур 400-800 °С, что, как было показано раньше, не соответствует наиболее распространенным температурам рекуперации тепла.

*Целью данной работы* является повышение эффективности термоэлектрического рекуператора тепла путем оптимизации количества секций в диапазоне температур от 150 до 600 °С.

### **Физическая модель секционного термоэлектрического рекуператора тепла.**

Физическая модель термоэлектрического секционного рекуператора тепла представлена на рис. 2. Каждая секция рекуператора состоит из горячего теплообменника (1),

термоэлектрической батареи (2) с тепловым сопротивлением  $R_{t2}^{(i)}$  и коэффициентом полезного действия  $\eta(T_H, T_0)$ ; холодного теплообменника (3) с температурой  $T_0$ . Термоэлектрические батареи каждой из секций рекуператора нагружены на согласованную электрическую нагрузку  $R^{(i)}$  (4). Входящий поток горячего газа имеет температуру  $T_H^{in}$  и тепловую мощность  $Q_H^{in}$ . Горячий газ отдает часть тепла  $Q_H^{(i)}(x)$  при температуре  $T_{hot}^{(i)}(x)$  горячему теплообменнику. На выходе из рекуператора поток газа имеет температуру  $T_H^{out}$  и тепловую мощность  $Q_H^{out}$ . От горячего теплообменника тепло передается термоэлектрической батарее, нагревая ее горячую сторону до температуры  $T_H^{(i)}(x)$ . Рассмотрены два варианта теплообмена с холодной стороны термоэлектрических батарей. В первом случае ее температура  $T_0$  задается постоянной, а во втором – учитывается теплообмен холодного радиатора (3) с внешней средой. Для расчетов максимально возможной мощности рекуператора будем пренебрегать тепловыми потерями.

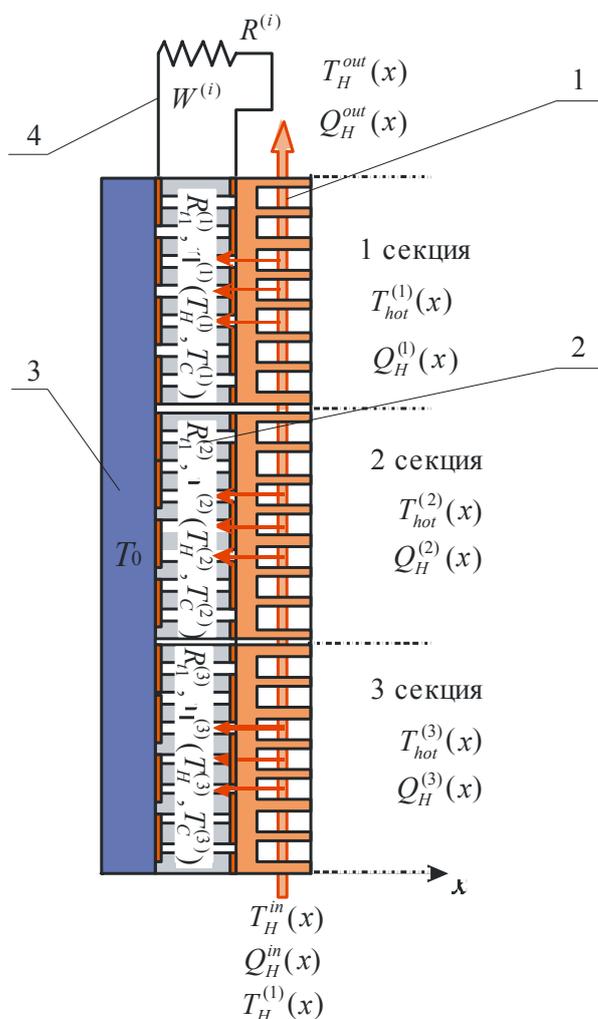


Рис. 2. Физическая модель термоэлектрического секционного рекуператора тепла:

1 – горячий теплообменник; 2 – термоэлектрические батареи;

3 – холодный теплообменник; 4 – согласованная электрическая нагрузка секции.

### Математическое и компьютерное описание модели

Для оптимизации термоэлектрического секционного рекуператора тепла необходимо найти распределения температур и тепловых потоков в термоэлектрических батареях каждой из секций. Такие расчеты для представленной модели возможны только с применением компьютерного моделирования.

Рассмотрим одну из секций генератора и условно разделим ее на три области  $\Omega_1 - \Omega_3$  с пределами  $g_1 - g_{10}$  (рис. 3). Область  $\Omega_1$  представляет горячий теплообменник с теплоносителем, область  $\Omega_2$  – термоэлектрическую батарею, область  $\Omega_3$  – горячий и холодный теплообменники.

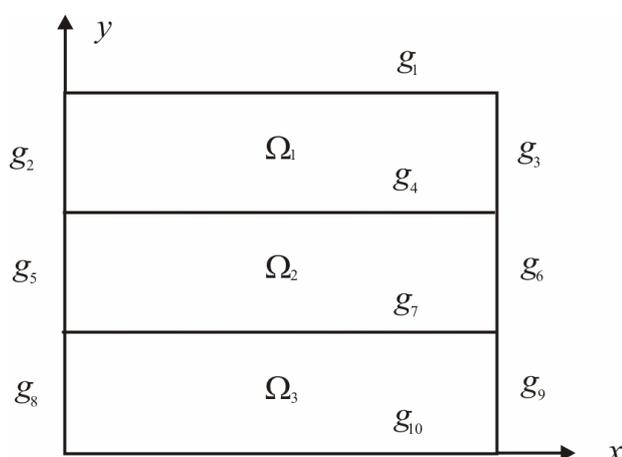


Рис. 3. Компьютерное представление областей и границ секций рекуператора.

В области  $\Omega_1$  имеет место массоперенос горячего теплоносителя. Уравнение теплопроводности для этой области имеет вид:

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

где  $\rho_H$  – плотность,  $C_H$  – теплоемкость,  $\kappa_H$  – теплопроводность газа,  $v_H$  – скорость движения газа. Граничные условия для области  $\Omega_1$  учитывают непрерывность потока газа в пределах секции и между секциями, поток тепла через теплообменники.

В области  $\Omega_2$  (термоэлектрической батарее) выделяется тепло Джоуля, для нее уравнение теплопроводности имеет вид:

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

где  $\kappa_{TE}$  – эффективная теплопроводность термоэлектрической батареи,  $Q_J$  – удельная мощность тепла Джоуля, выделяющегося в термоэлектрической батарее.

Граничные условия для области  $\Omega_2$  учитывают взаимодействие термобатареи с теплообменниками.

Область  $\Omega_3$  в данной модели ТЭГ считается термостатированной с температурой  $T_0$ .

Совокупность граничных условий математически выражается следующим образом:

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

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

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

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

$$g_7: \quad Q_C^{(i)}(x) = (T_C^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}, \quad (7)$$

$$T(x) = T_0, \quad (8a)$$

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

Совокупность уравнений (1)-(2) с граничными условиями (3-8) позволяют найти поле температур  $T(x, y)$  в ТЭГ и распределение температур  $T_H^{(i)}(x)$  по горячим сторонам термоэлектрических батарей секций. Тогда мощность каждой секции можно определять из следующего выражения:

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

Общая мощность генератора

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

а его КПД

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

Для расчетов электрической мощности рекуператора с учетом обеспечения работы системы теплоотвода необходимо знать эффективность воздушно-жидкостного теплообменника

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

где  $Q_{cool}$  – тепловая мощность системы теплоотвода,  $W_{cool}$  – электрическая мощность питания системы теплоотвода,  $T_L$  – температура жидкости,  $T_A$  – температура воздуха. Такая зависимость получена из экспериментальных исследований теплообменника [18].

Эффективный КПД рекуператора определяется выражением:

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

Система уравнений (1)-(2) с граничными условиями (3)-(8) решалась методом конечных элементов [21] на двумерной сетке.

Дальнейшая оптимизация состоит в поиске оптимальных горячих температур секций путем вариаций тепловых сопротивлений секций для достижения максимального интегрального КПД термоэлектрического рекуператора.

## Результаты компьютерного моделирования

Для расчета КПД и мощности были выбраны термоэлектрические материалы на основе *Bi-Te*, являющиеся одними из лучших по добротности в рассматриваемом диапазоне температур [21].

Компьютерное моделирование термоэлектрического секционного рекуператора тепловой энергии позволило получить следующие результаты.

На первом этапе проведена оптимизация горячих температур секций рекуператора. Наличие такого оптимума связано с влиянием двух конкурирующих факторов. Снижение теплового сопротивления секции ведет к увеличению теплового потока через термоэлектрический преобразователь, а значит – к увеличению электрической мощности секции. С другой стороны, это приводит к уменьшению горячей температуры термоэлектрической батареи, и, соответственно, к уменьшению ее КПД. На рис. 4 представлены результаты оптимизации горячей температуры секций от температуры входящего газа.

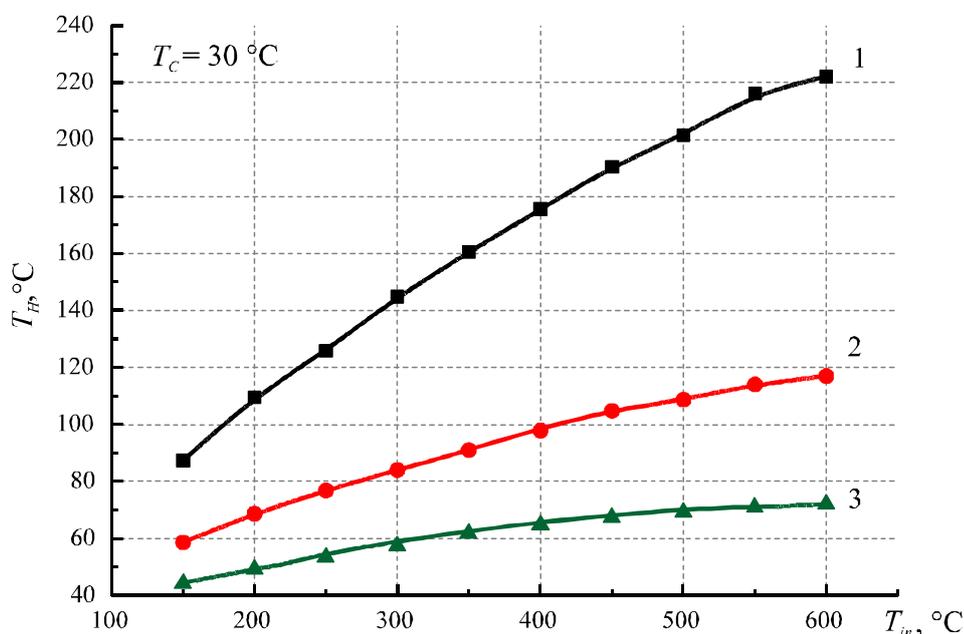


Рис. 4. Зависимость оптимальной горячей температуры секций от температуры входящего газа (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

На рис. 5 приводится относительное количество однотипных термоэлектрических модулей в секции для достижения оптимального распределения температур.

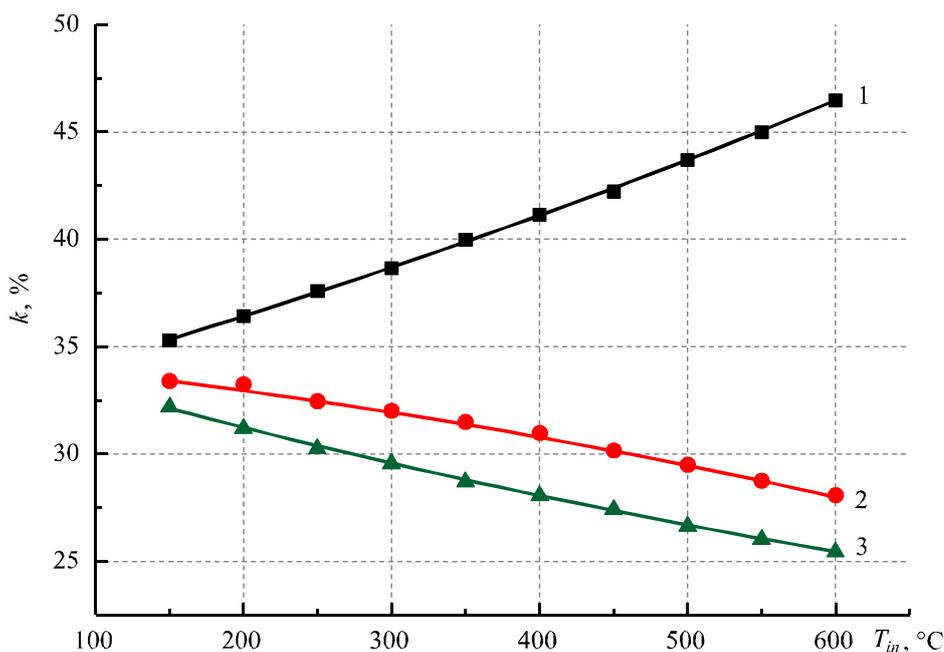


Рис. 5. Относительное количество термоэлектрических модулей в секции для достижения оптимального распределения температур (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

Следующим этапом моделирования стало определение зависимости КПД термоэлектрических модулей (рис. 6) и рекуператора тепла в целом (рис. 7) от температур входящего газа.

На рис. 6 приведены зависимости КПД термоэлектрических модулей каждой из секций рекуператора от температур входящего газа.

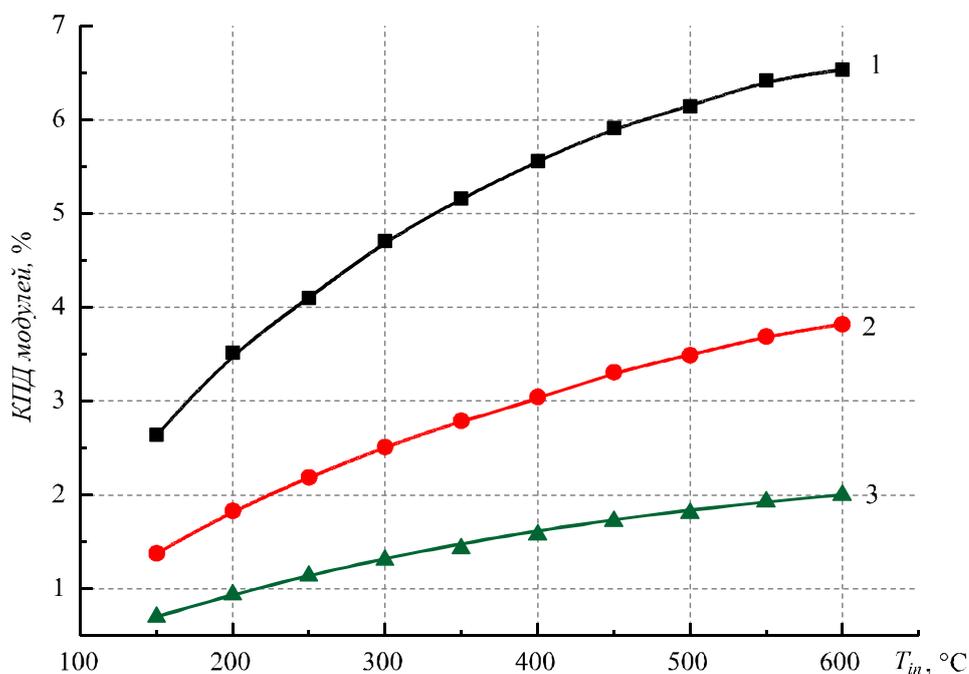


Рис. 6. Зависимость КПД термоэлектрических модулей секций от температур входящего газа (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

Как видно из рис. 7, использование второй секции термоэлектрического рекуператора тепла ведет к увеличению КПД на  $\square$  16%, а третьей – всего на 4%.

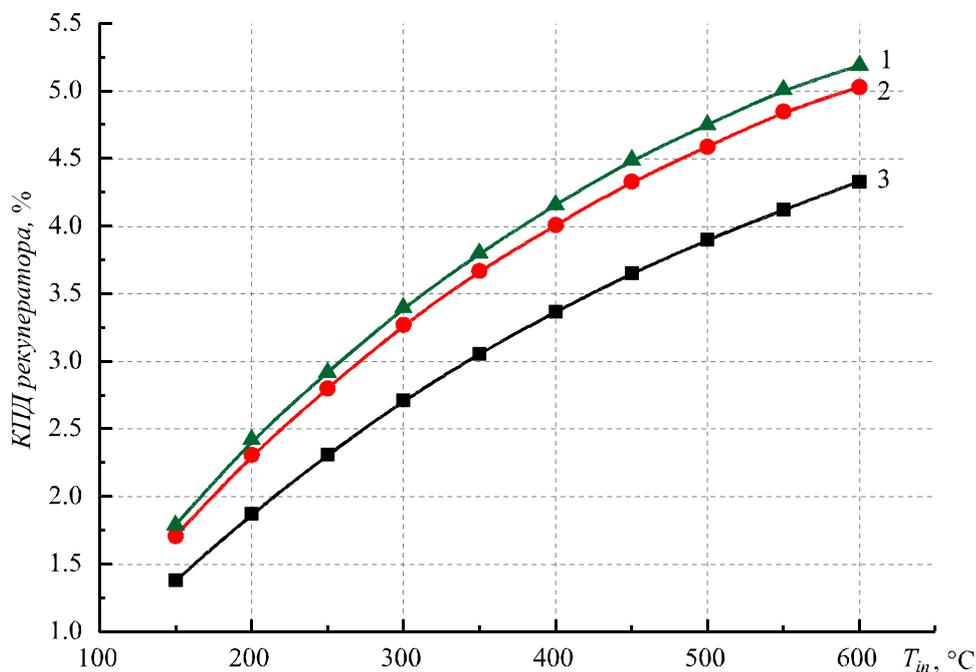


Рис. 7. Зависимость КПД термоэлектрического секционного рекуператора от температур входящего газа (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

Процентный вклад каждой из секций термоэлектрического рекуператора тепла в его общую мощность приведен на рис.8. Как следует из рисунка, процентный вклад первой секции рекуператора в общую мощность составляет 75-85%, второй – 15-20%, третьей – около 5%.

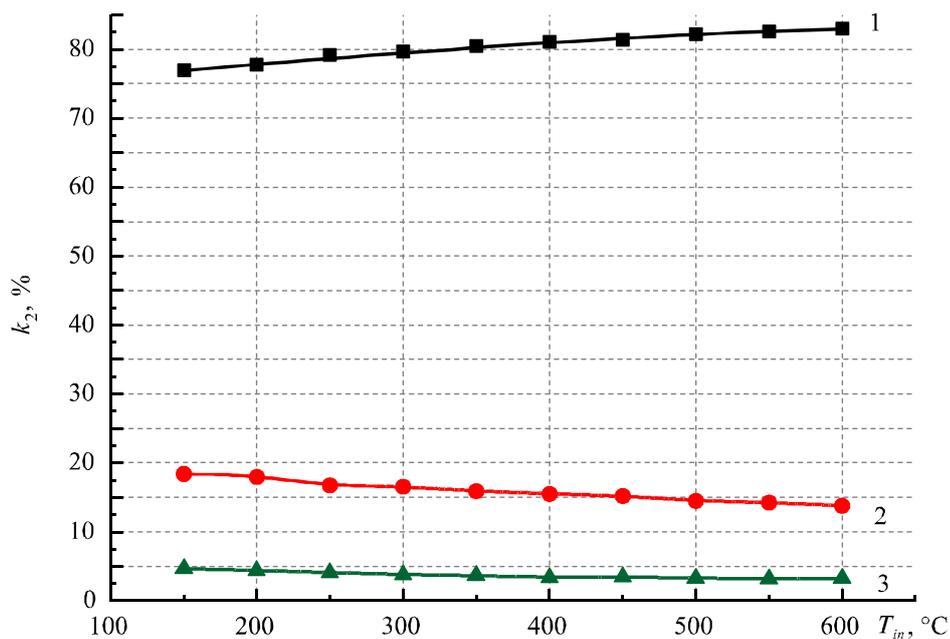


Рис. 8. Процентный вклад каждой из секций рекуператора в его общую мощность (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

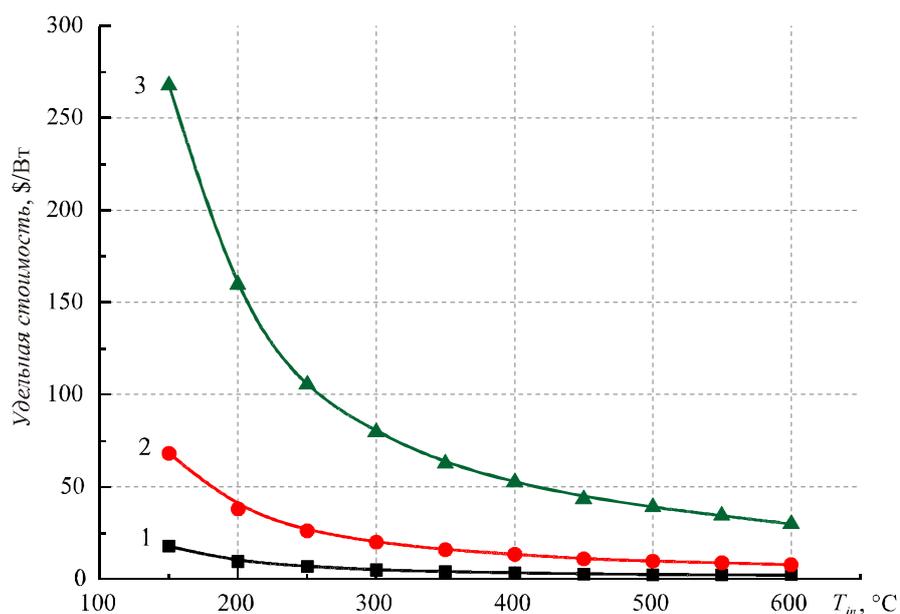


Рис. 9. Удельная стоимость секций рекуператора (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

Для оценки экономической целесообразности использования секционирования термоэлектрического рекуператора тепла проведен расчет удельной стоимости секций (рис.9), основываясь на результатах, полученных в работе [22]. Как видно из рисунка, использование третьей секции в рассматриваемом диапазоне температур является экономически нецелесообразно. Использование второй секции имеет смысл при температурах горячих газов от 400 °C.

Кроме того, была проведена оценка энергетических и экономических показателей термоэлектрического рекуператора тепла с учетом энергетических затрат на обеспечение теплоотвода. На рис. 10 приведена зависимость КПД термоэлектрического секционного рекуператора от температуры входящего газа с учетом затрат на обеспечение теплоотвода.

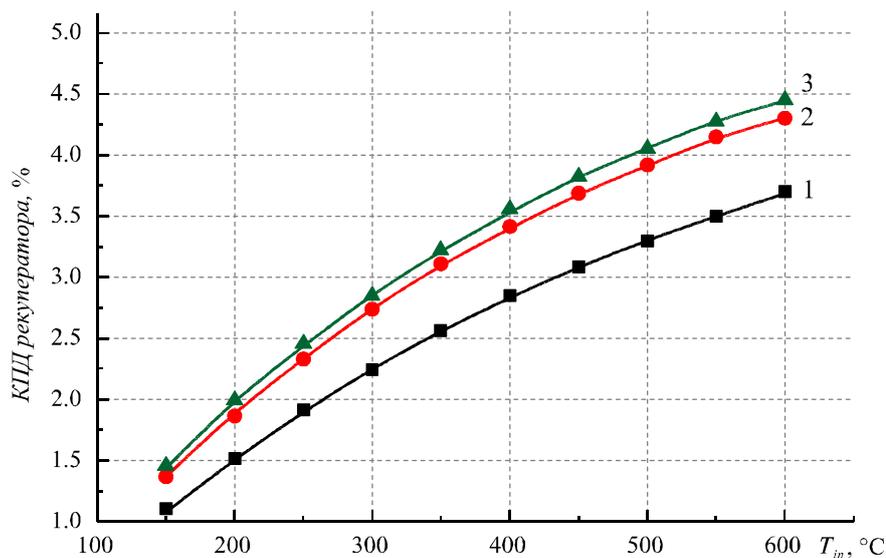


Рис. 10. Зависимость КПД термоэлектрического секционного рекуператора от температуры входящего газа с учетом затрат на обеспечение теплоотвода. (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция)

На рис. 11 показана удельная стоимость секций рекуператора с учетом затрат на обеспечение теплоотвода.

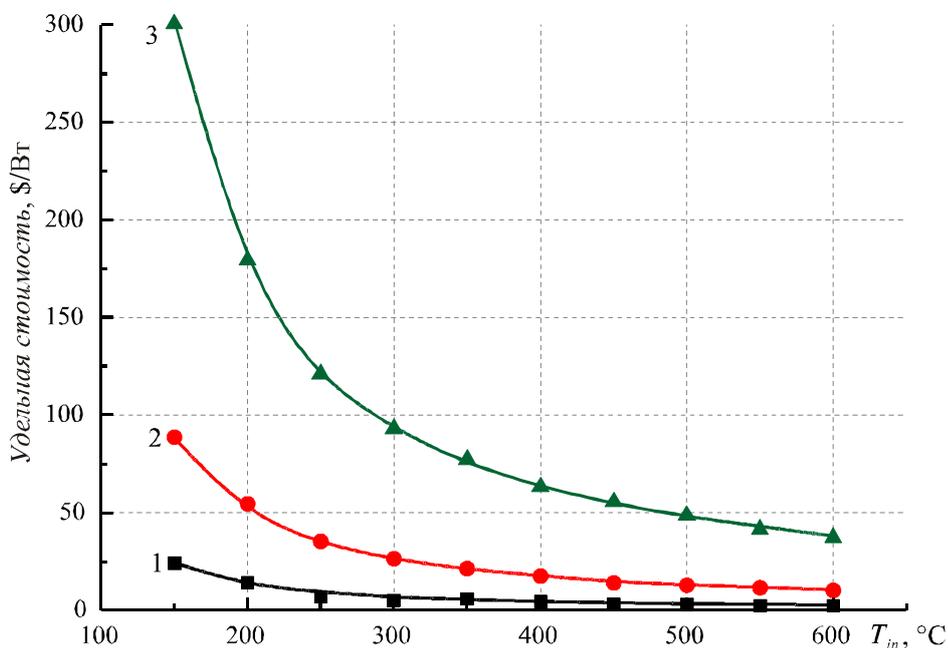


Рис. 11. Удельная стоимость секций рекуператора с учетом затрат на обеспечение теплоотвода (1 – 1 секция, 2 – 2 секция, 3 – 3 секция).

Как видно из рисунков, эффективность рекуперации тепла в таком случае снижается на ~15-20%, а удельная стоимость увеличивается, соответственно, на эту же величину.

## Выводы

1. Установлены зависимости оптимальных температур секций рекуператора от температуры входящего газа в диапазоне от 150 до 600 °C: для первой секции от 90 до 220 °C, второй – от 60 до 120 °C, третьей – от 40 до 70 °C.
2. Определено количество термоэлектрических преобразователей в каждой секции для достижения оптимального распределения температур в секциях. Для низких температур входящего газа (~50 °C) количество термопреобразователей в секциях приблизительно одинаково. С повышением температур увеличивается доля термопреобразователей в первой секции.
3. Использование второй секции термоэлектрического рекуператора тепла в диапазоне температур входящего газа от 150 до 600 °C ведет к увеличению его КПД на ~16%, а третьей – всего на 4%.
4. Рассчитана удельная стоимость каждой из секций термоэлектрического рекуператора тепла в указанном диапазоне температур. Установлено, что удельная стоимость третьей секции рекуператора на порядок выше стоимости первой секции, что делает ее

применение нецелесообразным. Использование второй секции имеет смысл при температурах горячих газов от 400 °С

5. Эффективность рекуперации тепла с учетом энергетических затрат на обеспечение теплоотвода снижается на ~15-20%, а удельная стоимость увеличивается, соответственно, на эту же величину.

## **Литература**

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., Никируй Л.І., Криницький О.С. Досягнення і проблеми термоелектрики // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – Т.13. – №2. – С. 297 – 318.
4. В. Паньяків. Когенерація: Як це працює // Сеті і бізнес. – 2010. – №4.
5. Шостаковський П. Термоелектричні джерела альтернативного живлення // Нові технології. – № 12. – 2010. – С. 131 – 138.
6. Анатичук Л.І. Рациональні області досліджень і застосувань термоелектричності / Л.І. Анатичук // Термоелектричність. – 2001. – №1. – С. 3 – 14.
7. Анатичук Л.І. Сучасний стан і деякі перспективи термоелектричності / Л.І. Анатичук // Термоелектричність. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
8. Бернштейн А.С. Термоелектричні генератори. / А.С. Бернштейн – М.: Госенергоиздат, 1956. – 47 с.
9. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: 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., Прибыла А.В. Термоелектричний рекуператор тепла для газових турбін // XIII Міждержавний семінар «Термоелектрики і їх застосування». Санкт-Петербург, Росія, 2012 // XIII Міжгосударственный семинар «Термоелектрики і їх застосування» 13 – 14 листопада 2012 г. – 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., 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.
14. Kajikawa T. Advances In Thermoelectric Power Generation Technology In Japan / T. Kajikawa // J. of Thermoelectricity. – 2011. – №3. – С. 5 – 19.
  15. H. Kaibe, K. Makino, T. Kajihara, S. Fujimoto and H. Nachiума. 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>.
  16. Анатычук Л.И., Jenn-Dong Hwang, Лысько В.В., Прибыла А.В. Термоэлектрические рекуператоры тепла для цементных печей // Термоэлектричество. – 2013. – №5. – С. 39 – 45.
  17. T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kajihara, H. Kaibe, H. Nachiума, H. Matsuno. Thermoelectric generation using heat in steal works.- Journal of electronic materials. – 2014.
  18. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество. – 2014. – №2. – С. 61 – 69.
  19. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного термоэлектрического генератора для автомобиля с дизельным двигателем / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество. – 2014. – №4. – С. 84 – 92.
  20. Анатычук Л.И. Влияние воздушного охлаждения на эффективность секционного термоэлектрического генератора для автомобиля с бензиновым двигателем / Л.И. Анатычук, Р.В. Кузь // Термоэлектричество. – 2014. – №3. – С. 87 – 92.
  21. Anatyчук L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.
  22. Anatyчук 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. Anatyчук // J. of Thermoelectricity. – 2012. – №4. – С. 73 – 79.

Поступила в редакцию 11.12.2014