

УДК 537.322.11

Анатичук Л.І.¹, Жен-Донг-Хванг², Лисько В.В.¹, Прибила А.В.¹

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

²Інститут дослідження промислових технологій, MCL/ITRI,
Корп.77,N 195 Сек. 4 Чунь Сінь Роуд, Чутунг, Сіньчжу, Тайвань

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ РЕКУПЕРАТОРИ ТЕПЛА ДЛЯ ЦЕМЕНТНИХ ПЕЧЕЙ

У роботі показано результати досліджень, спрямованих на вивчення можливості використання термоелектричного перетворення енергії для рекуперації тепла, випромінюваного нагрітими обертовими поверхнями цементних печей, не змінюючи при цьому температурні технологічні умови функціонування самих печей. Така можливість встановлена шляхом зміни ступеня чорноти поверхні печі. Побудовані залежності максимального ККД і температури гарячого теплообмінника термоелектричного генератора від ступеня чорноти поверхні цементної печі. Розраховано максимальний ККД термоелектричного генератора і його проектна потужність.

Ключові слова: рекуператор, цементна піч, термоелектричний модуль.

In the present work the results of the research aimed at the studies of the possibility of use of thermoelectric energy conversion for recuperation of the heat radiated by the preheated rotating surfaces of the cement kilns are presented. The temperature specifications of the kilns functioning remain unchanged, though. To reach this, the degree of emissivity of the kiln surface should be changed. The dependences were obtained of the maximum efficiency and temperature of the thermoelectric generator hot heat exchanger on the emissivity of the cement kiln surface. Both maximum efficiency of a thermoelectric generator and its designed capacity were estimated.

Key words: recuperation, cement kiln, thermoelectricity module.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Практично вся апаратура й устаткування для технологічних процесів у промисловості, теплові машини (турбіни, двигуни внутрішнього згоряння й ін.) під час своєї роботи розсіюють величезну кількість теплових відходів, які є важливою складовою термального забруднення навколишнього середовища [1]. У зв'язку з цим зниження теплових відходів, а також їх використання, (у першу чергу для одержання електричної енергії,) є винятково важливим завданням. Температури таких теплових відходів досить різні й орієнтовно перебувають в інтервалі 50-700 °С. Застосування теплових машин для цього інтервалу температур, особливо нижчих, ніж 400 °С, у більшості випадків нераціональне. Як показує аналіз, найбільш сприятливим для рекуперації тепла за таких температур є термоелектричний спосіб прямого перетворення теплової енергії в електричну [2-4]. Крім того, властивості джерел тепла (їх габарити, режими роботи, переносники тепла) досить різноманітні. Зокрема цікавою є задача рекуперації тепла випромінюваного нагрітими обертовими поверхнями цементних печей. Для таких умов термоелектричний спосіб перетворення енергії є найбільш придатним, оскільки термоелектричні перетворювачі легко адаптуються до різних джерел теплової енергії [5].

Важливою є й та обставина, що останнім часом було розроблено такі перетворювачі (модулі), питома вартість яких 0.5-2 \$/Вт забезпечує рентабельність термоелектричних рекуператорів тепла.

Аналіз літератури. Відомі термоелектричні обладнання для рекуперації відпрацьованого тепла двигунів внутрішнього згорання [6], газових прокатних печей [7], турбін газоперекачувальних агрегатів [8]. У всіх розглянутих випадках термоелектричний генератор (його гаряча теплообмінна поверхня) перебуває в контакті з нагрітою поверхнею, що віддає тепло. Однак у випадку використання тепла від оберткової цементної печі така конструкція не прийнятна. У такому випадку ефективним є використання теплового випромінювання цих нагрітих поверхонь [9]. Перешкодою до використання таких генераторів для рекуперації тепла цементних печей є те, що наявність термоелектричного генератора змінює температурний режим самої печі, що не бажано для технологічного процесу виготовлення цементу.

Мета пропонованої роботи – вивчення можливості використання термоелектричного перетворення енергії для рекуперації тепла, випромінюваного нагрітими обертковими поверхнями цементних печей, не змінюючи при цьому температурні технологічні умови функціонування самих печей.

Постановка задачі

Зовнішній вигляд і схема цементної печі показано на рис. 1-2.



Рис. 1. Зовнішній вигляд цементної печі [10].

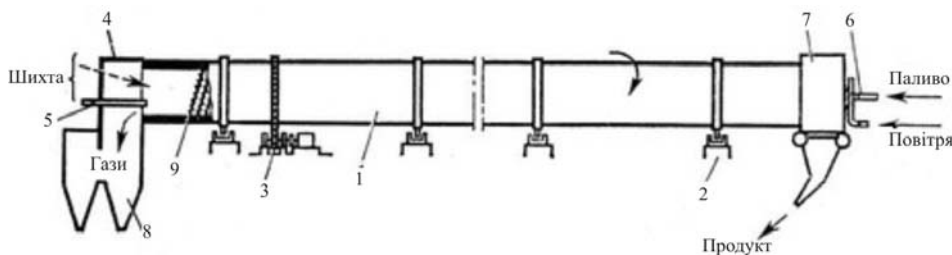


Рис. 2. Схематичне зображення цементної печі [11].

1 – металевий барабан, 2 – опорні ролики, 3 – електродвигун з редуктором і зубчастою передачею, 4 – голівка для завантаження шихти, 5 – форсунки для подачі шихти, 6 – форсунки для введення палива, 7 – гаряча голівка, 8 – система очищення від пилу, 9 – теплообмінні обладнання.

Для досягнення цілей роботи використано дві фізичні моделі теплообміну від цементної печі. У першій розглянуто теплообмін печі без наявності термоелектричного генератора (рис.3). Це було необхідно для визначення тепловіддачі без наявності зовнішнього споживача тепла. У другій моделі проводився облік наявності термоелектричного генератора, який вносить зміни в температурний і

тепловий режим цементної печі, а також розрахунки необхідного збільшення ступеня чорноти поверхні печі, за якого тепловіддача від неї не змінюється.

Теплообмін цементної печі за відсутності термоелектричного генератора

Розглянута модель цементної печі являє собою циліндр 1 діаметром $d = 4.8$ м і довжиною $L = 76$ м, підтримуваний за температури $T_1 = 300$ °С (рис. 3).

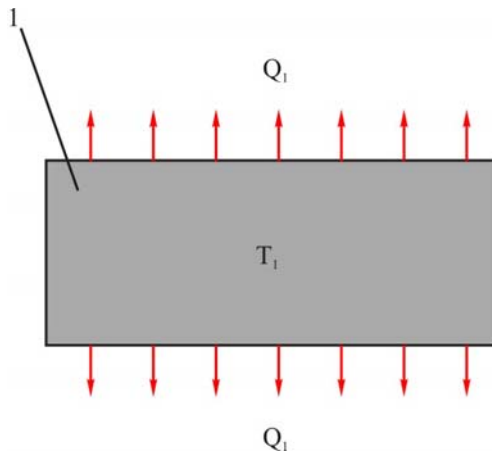


Рис. 3. Модель цементної печі за відсутності термоелектричного генератора.

Температура печі встановлюється внаслідок балансу тепла, що виділяється в її об'ємі, з теплопередачею в навколишнє середовище. При цьому передача тепла в навколишнє середовище здійснюється шляхом вільної конвекції й випромінювання. Повний тепловий потік з бічної поверхні такого циліндра можна записати у вигляді

$$Q_1 = Q_{conv} + Q_{rad}, \quad (1)$$

де Q_{conv} – тепловий потік конвекцією, Q_{rad} – тепловий потік випромінюванням.

Тепловий потік випромінюванням може бути визначений на основі закону Стефана-Больцмана

$$Q_{rad} = \varepsilon_1 \sigma S (T_1^4 - T_0^4), \quad (2)$$

де ε_1 – ступінь чорноти поверхні, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постійна Стефана-Больцмана, $S = \pi dL$ – площа бічної поверхні печі, T_0 – температура навколишнього середовища.

Для розрахунків конвективної складової необхідно визначити критерій Нуссельта, який за вільної конвекції є функцією критеріїв Прандтля й Грасгофа й слабо залежить від форми тіла [12, 13]:

$$\frac{\alpha l}{\kappa} = f \left(\frac{\nu}{a}; \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t; \text{форма тіла} \right). \quad (3)$$

Тут β [1/град] – коефіцієнт об'ємного розширення середовища; Δt – тепловий напір;

$$\frac{\nu}{a} = Pr, \quad \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t = Gr. \quad (4)$$

У газах термічний опір зосереджується у вузькому пристінному шарі, у якому переважає молекулярне тертя. Таким чином, система рівнянь руху буде містити тільки чотири незалежні змінні замість п'яти (a , $g \beta \Delta t$, ν , l) і дає тільки один визначальний критерій:

$$Pr Gr = \frac{g l^3}{a \nu} \beta \Delta t. \quad (5)$$

За лінійний розмір l для горизонтальної труби береться її діаметр. Розрахункові формули мають вигляд:

а) за $10^3 < Pr Gr < 5 \cdot 10^2$

$$\alpha = A_1 \left(\frac{\Delta t}{l^5} \right)^{1/3} \quad (6)$$

б) за $5 \cdot 10^2 < Pr Gr < 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = A_2 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4} \quad (7)$$

в) $Pr Gr > 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = A_3 \Delta t^{1/3} \quad (8)$$

Для повітря за середньої температури $T_{av} = \frac{1}{2}(T_1 + T_0)$ значення коефіцієнтів A_{1-3} такі: $A_1 = 0.28$, $A_2 = 1.07$, $A_3 = 1.05$.

У розглянутому випадку $Pr Gr = 1.3 \cdot 10^{12}$ і відповідно $\alpha = 6.8$ Вт/(м²* К). Таким чином, повний тепловий потік Q_l з бічної поверхні печі буде становити 5.07 МВт, включаючи 2.1 МВт конвекцією й 2.97 МВт випромінюванням.

Теплообмін цементної печі за наявності термоелектричного генератора на її бічній поверхні

З установою на бічній поверхні печі блоків термоелектричних генераторів (рис. 2), температура гарячої сторони яких повинна перевищувати температуру навколишнього середовища, тепловий потік від печі зменшиться, що неприпустимо. Тому для забезпечення колишнього відводу тепла, ступінь чорноти поверхні печі потрібно збільшити.

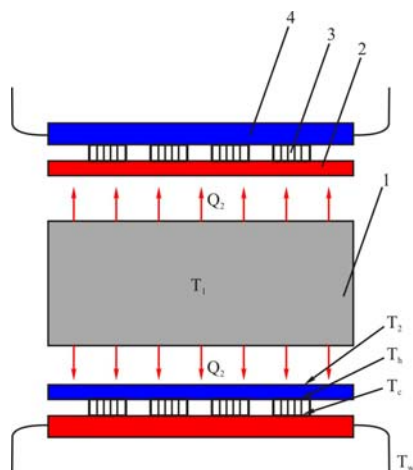


Рис. 4. Модель цементної печі за наявності термоелектричного генератора.
1 – частина поверхні печі, 2 – гарячий теплообмінник,
3 – термоелектричні модулі,
4 – холодний водяний теплообмінник.

Повний тепловий потік з бічної поверхні печі в такому випадку можна записати у вигляді

$$Q_2 = \varepsilon'_1 \varepsilon_2 \sigma S (T_1^4 - T_2^4) + Q'_{conv} \quad (9)$$

При цьому теплопередачу конвекцією Q'_{conv} можна вирахувати за формулами теплопровідності для твердої стінки за допомогою введення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності повітряного прошарку.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності прошарку, при неврахуванні тепловіддачі випромінюванням від однієї стінки до іншої визначається за формулою

$$K_{eq} = \varepsilon_{conv} K, \quad (10)$$

де κ – коефіцієнт теплопровідності середовища, що заповнює прошарок, $\kappa=0.0355$ Вт/м* К для повітря за температури 150°C), $\varepsilon_{conv} = f(Pr Gr)$ – коефіцієнт, що враховує вплив конвекції.

Розрахункові формули для визначення коефіцієнта конвекції:

$$\text{а) за } 10^4 < Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n < 10^7$$

$$\varepsilon_{conv} = 0.062 \left[Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n \right]^{1/3}, \quad (11)$$

$$\text{б) за } 10^7 < Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n < 10^{10}$$

$$\varepsilon_{conv} = 0.22 \left[Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n \right]^{1/4}, \quad (12)$$

де δ – товщина шару, L_1 / L_2 – відношення довжини шляху конвективного потоку від нижньої грані нагрівача до зустрічі з холодильником до висоти цього шляху, d – діаметр нагрівача. Для похилого циліндричного шару $L_1 / L_2 = 1$, $k=3$, $n=0$; для горизонтального циліндричного шару $L_1 / L_2 = \pi r + \delta / d + \delta$, $k=3$, $n=0$.

Зі значенням комплексу $Pr Gr (L_1/L_2)^k (d/\delta)^n < 10^3$ вплив конвекції в щілині практично відсутній і розрахунки ведуться тільки по теплопровідності.

При обчисленні критеріїв за визначальну температуру прийнято середню температуру

$$T_{av} = \frac{1}{2}(T_1 + T_0), \quad (13)$$

за визначальний розмір приймається товщина шару δ (5 см).

Для даного випадку величина $Pr Gr (L_1/L_2)^k (d/\delta)^n = 7.6 \cdot 10^5$, а $\varepsilon_{conv} = 2.62$. Відповідно $\kappa_{eq} = 0.093$ Вт/(м*К), а тепловий потік конвекцією від бічної поверхні печі до гарячого теплообмінника термоелектричного генератора буде залежати від температури, що встановилася, T_2 .

Вплив обертання внутрішнього циліндра на тепловіддачу в подібних задачах, задачах Куетта-Тейлора, враховується через безрозмірні параметри – число Рейнольдса Re_h , що характеризує вимушену кільцеву течію або число Тейлора. При цьому зручним для використання є модифіковане число Тейлора [14]

$$T_{am} = \frac{\Omega^2 d^2 \delta^3}{2\nu(d + \delta)} \left(\frac{1697}{\pi^4} C \right), \quad (14)$$

$$C = 0.0571 \left(1 - 0.652 \frac{2\delta}{d} \right) + 0.00056 \left(1 - 0.652 \frac{2\delta}{d} \right)^{-1}, \quad (15)$$

де Ω - кутова швидкість обертання.

До виникнення вторинних течій ($T_{am} < 1700$) число Нуссельта Nu^* визначається рівністю і не залежить від властивостей газу, розмірів і швидкості обертового циліндра.

$$Nu^* = 2 \quad (16)$$

З виникненням макровихрових вторинних течій уже необхідно враховувати число Тейлора $T_{am} \approx$

17000...1*10⁵ для повітря коефіцієнт тепловіддачі визначається емпіричною формулою

$$Nu^* = 0.128T_{am}^{0.367} \quad (17)$$

У діапазоні $T_{am} \approx 10^4 \dots 2 \cdot 10^8$

$$Nu^* = 0.42T_{am}^{0.25} Pr^{0.25} \quad (18)$$

У діапазоні $T_{am} \approx 10^7 \dots 2 \cdot 10^9$

$$Nu^* = 0.28T_{am}^{0.285} \quad (19)$$

У такий спосіб врахування обертання печі дає підвищення тепловіддачі конвекцією в 2.2 рази.

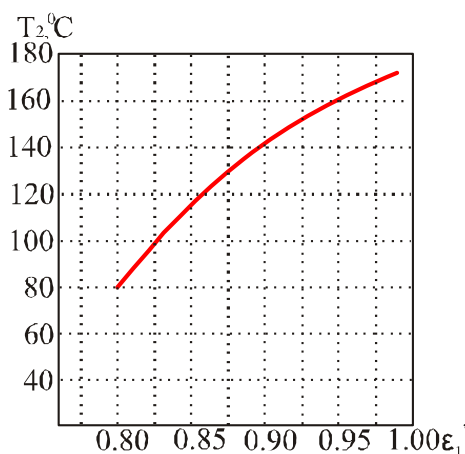


Рис. 5. Залежність температури гарячого теплообмінника від ступеня чорноти печі.

Для знаходження нового ступеня чорноти бічної поверхні печі ϵ_1' , необхідної для забезпечення заданого тепловідводу, потрібно добитися рівності потоків тепла Q_1 і Q_2 . При цьому температура гарячого теплообмінника буде залежати від значення ϵ_1' . Розрахунки показали, що значення температури гарячого теплообмінника T_2 з покриттям поверхні печі спеціальною фарбою зі ступенем чорноти від 0.80 до 0.99 будуть перебувати в діапазоні від 80 до 172°C (рис. 5).

Залежність ККД термоелектричної батареї від ϵ_1' , отримана з експериментальних залежностей η від перепаду температур ($T_h - T_c$), наведено на рис. 6.

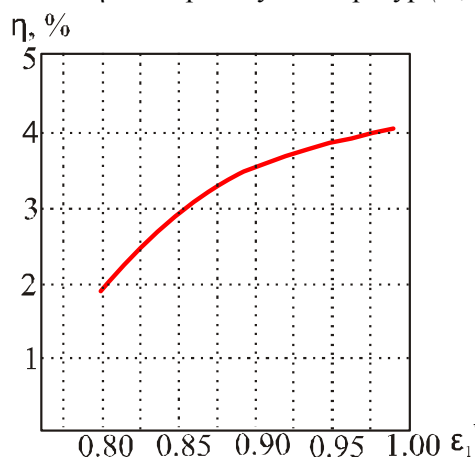


Рис. 6. Залежність максимального ККД термоелектричної батареї від ступеня чорноти печі.

Таким чином, максимальний ККД спеціалізованих для даних умов термоелектричних модулів компанії «Алтек-М» (Україна), з урахуванням того, що температура їх холодної сторони з використанням водяного охолодження $T_c \approx 30^\circ\text{C}$, буде дорівнювати 4.05%. При цьому проектна

потужність генератора з урахуванням витрат на забезпечення живлення системи охолодження термоелектричних модулів становить 130 Вт/м².

Висновки

1. Побудовано математичну модель, яка дає можливість розрахувати вплив термоелектричного генератора на теплообмін цементної печі з урахуванням її обертання. Встановлена можливість усунення цього впливу шляхом зміни ступеня чорноти поверхні печі.
2. Побудовано залежності максимального ККД і температури гарячого теплообмінника термоелектричного генератора від ступеня чорноти поверхні цементної печі.
3. Розраховано максимальний ККД термоелектричного генератора для розглянутого варіанта конструкції цементної печі, який становить 4.05%.
4. Проектна потужність генератора з урахуванням витрат на забезпечення живлення системи охолодження термоелектричних модулів становить 130 Вт/м².

Література

1. Паньякив В. Когенерация: Как это работает /В. Паньякив // Сети и бизнес. – 2010 - №4.–С.96–101.
2. Анатычук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2001. – №1. – С. 3 – 14.
3. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
4. Бернштейн А.С. Термоэлектрические генераторы. / А.С. Бернштейн // – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 47 с.
5. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – К.: Наук. Думка, 1979. – 768 с.
6. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, 2011. P. 1326
7. Anatyshuk L.I., Jenn-Dong Hwang, Prybyla A.V. Thermoelectric generator for conversion of heat from gas rolling furnaces // 29-th International Conference on Thermoelectrics.– 2010. – China, Shanghai.
8. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Термоелектричний рекуператор тепла для газових турбін // XIII Міждержавний семінар «Термоелектрики и их применение». Санкт-Петербург, Росія, 2012// XIII Межгосударственный семинар «Термоелектрики и их применения» 13-14 ноября 2012 г. – Санкт-Петербург, Россия, 2012.
9. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрического генерирования мощности в Японии / Т.Кадзикава // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 21 – 31.
10. <http://www.innovaterussia.ru/project/gallery/current/16325>
11. Ходоров Е. И. Печи цементной промышленности / Е.И. Ходоров // Л., 1968. С.3–7
12. Кутателадзе С.С. Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – // С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский // Л.; М.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
13. Цветков Ф.Ф. Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев // М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
14. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами. –// Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства. – № 3/1(11), 2013. – №3.– С.45–49

Надійшла до редакції 12.09.2013