

Анатичук Л.І.<sup>1</sup>, Женн - Донг Хванг<sup>2</sup>, Гаврилюк М.В.<sup>1</sup>,  
Лисько В.В.<sup>1</sup>, Прибила А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

<sup>2</sup>Інститут дослідження промислових технологій, MCL/ITRI,  
Корп.77, N 195, Чунь Сінг Роуд Чутунг, Сінчжун, Тайвань

## ДИСТАНЦІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ Й ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЦЕМЕНТНИХ ПЕЧЕЙ

*Приведені результати проектування термоелектричного дистанційного вимірювача теплового потоку і температури, призначеного для дослідження характеристик поверхні цементних печей. Описана конструкція виготовленого експериментального зразка такого дистанційного вимірювального пристрою, проведено його градування.*

**Ключові слова:** цементна піч, вимірювальний пристрій, термоелектрика.

*The paper deals with a development of physical and mathematical models of a remote thermoelectric device for measurement of heat flux and temperature with regard to specific features of heat exchange from the surface of cement kilns. The results of calculation of convective and radiant heat flux components with consideration of kiln rotation are presented. Such a remote measuring device has been designed and manufactured, as well as its experimental calibration has been made.*

**Key words:** cement kiln, measuring device, thermoelectricity.

### Вступ

*Загальна характеристика проблеми.* Характерною особливістю технологічного процесу виробництва цементу є високе споживання теплової й електричної енергії [1]. В роботах [2 - 4] розглянута можливість зниження енергетичних витрат в процесі виробництва цементу шляхом



Рис. 1. Зовнішній вигляд цементної печі [8].

використання термоелектричних рекуператорів відпрацьованого тепла цементних печей. Для створення таких рекуператорів важливою є інформація про величину теплової енергії, яку випромінює поверхня цементної печі, а також про її температуру.

Крім того, у процесі виготовлення цементу необхідно забезпечити на певний час потрібні температури в зонах проходження цементу. При цьому важливо контролювати температурні режими цих зон, а також вимірювати втрати тепла з поверхні печі (рис. 1) [1 - 5].

Відомі пристрої для контролю величини тепловиділень з поверхні цементних печей [1 – 5].

Однак вони не забезпечують вимірювання температури й теплових потоків з достатньою точністю [6, 7].

Метою даної роботи являється розробка пристрою для точного безконтактного вимірювання теплового потоку й температури поверхні цементних печей.

### Фізична й математична моделі вимірювального обладнання

На рис. 2 показана фізична модель термоелектричного вимірювального пристрою для дистанційного визначення температури й теплового потоку від поверхні цементної печі 1 довжиною  $c$  і радіусом  $a$ . Тепловий потік  $Q_0$  від поверхні печі з температурою  $T_0$  і коефіцієнтом випромінювання  $\varepsilon_1$  передається в оточуюче середовище з температурою  $T_a$ . На відстані  $b$  від печі знаходиться термоелектричний вимірювальний пристрій. Частина теплового потоку  $Q_1$  від цементної печі попадає на графітовий приймальний майданчик 2 пристрою, коефіцієнт поглинання котрого  $\varepsilon_2$ . Тепловий потік проходить через приймальну пластину, температура поверхні якої  $T_1$ , і через термоелектричний модуль 3 ( $T_2$  – температура гарячої поверхні термоелектричного модуля,  $T_3$  – температура холодної поверхні термоелектричного модуля). Модуль перетворює теплову енергію в електричну  $W$ . Приймальна пластина і термоелектричний модуль розміщені в корпусі 4 з тепловою ізоляцією. Втрати тепла через теплоізоляцію складають  $Q_3$ . Відвід тепла  $Q_2$  від термоелектричного модуля здійснюється рідинним теплообмінником ( $T_4, T_5$  – температури рідини на вході й на виході з теплообмінника, відповідно).

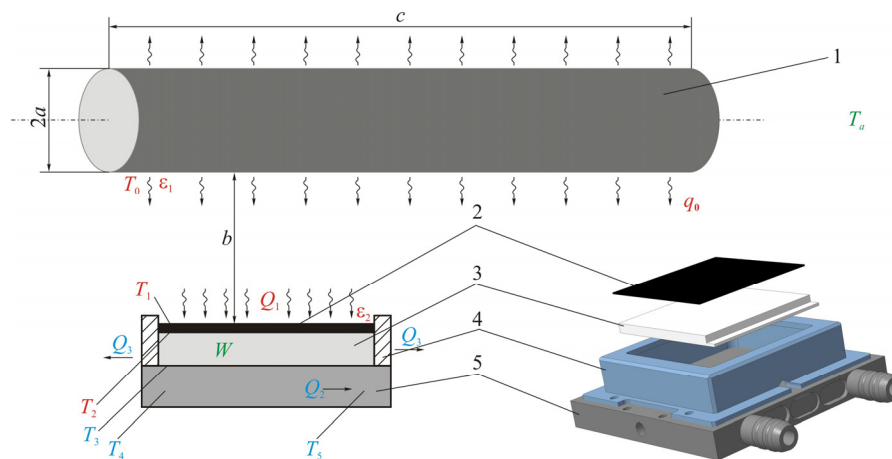


Рис. 2. Фізична модель термоелектричного вимірювального обладнання:  
 1 – цементна піч, 2 – графітове покриття приймального майданчика, 3 – термоелектричний модуль,  
 4 – корпус, 5 – рідинний теплообмінник.

Потужність потоку тепла з бічної поверхні цементної печі можна записати у вигляді:

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

де  $Q_{rad}$  – радіаційна складова теплового потоку,  $Q_{conv}$  – конвективна складова теплового потоку.

Згідно із законом Стефана-Больцмана променистий теплообмін між двома довільними сірими поверхнями визначається формулою:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_0^4 - T_1^4) \cdot S_1 \cdot \varphi_{1-2} = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_0^4 - T_1^4) \cdot S_2 \cdot \varphi_{2-1}, \quad (2)$$

де  $\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана,  $S_1$  – площа поверхні випромінювання,  $S_2$  – площа приймальної поверхні,  $\varphi_{1-2}$ ,  $\varphi_{2-1}$  – кутові коефіцієнти випромінювання.

Для визначення складової теплового потоку, який передається приймальній пластині вимірювального пристрою від поверхні цементної печі шляхом випромінювання, необхідно розрахувати кутові коефіцієнти випромінювання, використовуючи:

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{S_1} \cdot \iint_{S_1, S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\pi \cdot r^2} dS_1 dS_2, \quad (3)$$

$$\varphi_{2-1} = \frac{1}{S_2} \cdot \iint_{S_1, S_2} \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\pi \cdot r^2} dS_1 dS_2 = \frac{S_1}{S_2} \varphi_{1-2}, \quad (4)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути між напрямком випромінювання й нормаллю до поверхонь  $S_1$  і  $S_2$ , відповідно,  $r$  – відстань між двома поверхнями.

Для випадку теплообміну, шляхом випромінювання між циліндричною поверхнею й плоскою поверхнею:

$$\varphi_{2-1} = \frac{2}{\pi \cdot B} \cdot \left\{ \operatorname{ctg} \frac{C}{\sqrt{B^2 - 1}} + C \cdot \left[ \frac{X^2 - 2 \cdot B}{X \cdot Y} \cdot \operatorname{ctg} \frac{X}{Y} \sqrt{\frac{B-1}{B+1}} - \operatorname{ctg} \sqrt{\frac{B-1}{B+1}} \right] \right\}, \quad (5)$$

де  $B = \frac{b}{a}$ ,  $C = \frac{c}{a}$ ,  $X = \sqrt{(1+B^2)^2 + C^2}$ ,  $Y = \sqrt{(1-B^2)^2 + C^2}$ ,  $c$  – довжина цементної печі 1,  $a$  – її радіус,  $b$  – відстань від поверхні печі до приймального майданчика.

Таким чином, загальний тепловий потік від поверхні цементної печі до прямокутної приймальної поверхні термоелектричного вимірювального пристрою визначається виразом:

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_0^4 - T_1^4) \cdot S_2 \cdot \frac{2}{\pi \cdot B} \cdot \left\{ \operatorname{ctg} \frac{C}{\sqrt{B^2 - 1}} + C \cdot \left[ \frac{X^2 - 2 \cdot B}{X \cdot Y} \cdot \operatorname{ctg} \frac{X}{Y} \sqrt{\frac{B-1}{B+1}} - \operatorname{ctg} \sqrt{\frac{B-1}{B+1}} \right] \right\}. \quad (6)$$

Для розрахунку конвективної складової потоку тепла від поверхні цементної печі [4] необхідно визначити критерій Нуссельта, який при вільній конвекції є функцією критеріїв Прандтля, Грасгофа й залежить від параметрів форми тіла:

$$\frac{\alpha l}{\kappa} = f(Pr; Gr; \text{форма тіла}). \quad (7)$$

$$\frac{\nu}{a} = Pr, \quad \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t = Gr. \quad (8)$$

де  $\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення середовища,  $\Delta t$  – тепловий напір,  $\nu$  – кінематична в'язкість,  $l$  – характеристичний розмір.

У газах термічний опір визначається опором вузьким пристінним шаром газу, в якому переважає молекулярне тертя. Таким чином, система рівнянь руху буде містити тільки чотири незалежні змінні замість п'яти ( $a$ ,  $g \beta \Delta t$ ,  $\mu$ ,  $l$ ),  $\mu$  – динамічна в'язкість. Це дає тільки один визначальний критерій:

$$Pr Gr = \frac{g l^3}{a \nu} \beta \Delta t. \quad (9)$$

Формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в цьому випадку мають вигляд:

а) при  $10^{-3} < Pr Gr < 5 \cdot 10^2$ ,

$$\alpha = A_1 \left( \frac{\Delta t}{l^5} \right)^{1/3}; \quad (10)$$

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

$$\alpha = A_2 \left( \frac{\Delta t}{l} \right)^{1/4}; \quad (11)$$

в)  $Pr Gr > 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = A_3 \Delta t^{1/3}. \quad (12)$$

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

Таким чином,  $Pr Gr = 1.3 \cdot 10^{12}$ , і, відповідно,  $\alpha = 6.8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Однак, у розглянутому вище варіанті теплообміну вільною конвекцією, не враховано обертання цементної печі, тобто наявність примусового конвективного теплообміну. Вплив примусової конвекції може виявитися істотним. В задачах Куєтта-Тейлора таке обертання враховується шляхом введення безрозмірних параметрів – число Рейнольдса  $Reh$ , що характеризує вимушену течію, або число Тейлора. Для розрахунків використовується модифіковане число Тейлора у вигляді

$$Ta_m = \frac{\Omega^2 d^2 \delta^3}{2\nu(d + \delta)} \left( \frac{1697}{\pi^4} C \right), \quad (13)$$

де  $\Omega$  – кутова швидкість обертання,  $\delta$  – товщина шару,  $d$  – діаметр нагрівача.

$$C = 0.0571 \left( 1 - 0.652 \frac{2\delta}{d} \right) + 0.00056 \left( 1 - 0.652 \frac{2\delta}{d} \right)^{-1}. \quad (14)$$

До виникнення вторинних течій ( $Ta_m < 1700$ ), число Нуссельта  $Nu^*$  визначається рівністю

$$Nu^* = 2 \quad (15)$$

і не залежить від властивостей газу, розмірів і швидкості обертового циліндра.

При виникненні макровихрових вторинних потоків необхідно враховувати число Тейлора. У діапазоні  $Ta_m \approx 1700 \dots 10^5$  для повітря коефіцієнт тепловіддачі визначається емпіричною формулою

$$Nu^* = 0.128 Ta_m^{0.367}. \quad (16)$$

У діапазоні  $Ta_m \approx 10^4 \dots 2 \cdot 10^8$

$$Nu^* = 0.42 Ta_m^{0.25} Pr^{0.25}. \quad (17)$$

У діапазоні  $Ta_m \approx 10^7 \dots 2 \cdot 10^9$

$$Nu^* = 0.28 Ta_m^{0.285}. \quad (18)$$

Таким чином, врахування обертання печі дає підвищення коефіцієнта конвективної тепловіддачі в 2.2 рази.

Крім того, для проведення точних вимірювань важливим є також врахування конвективної складової теплового потоку, який потрапляє на приймальну поверхню вимірювального пристрою  $Q'_{conv}$ . Її можна врахувати за формулами для теплопровідності твердої стінки шляхом введення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності повітряного прошарку.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності прошарку без врахування тепловіддачі випромінюванням від однієї стінки до іншої, визначається за формулою

$$\kappa_{eq} = \varepsilon_{conv} \kappa, \quad (19)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності середовища, що заповнює прошарок, при середній температурі останньої (0.0355 Вт/(м·К) для повітря при температурі 150 °С),  $\varepsilon_{conv} = f(Pr Gr)$  – коефіцієнт, що враховує вплив конвекції.

Розрахункові формули для визначення коефіцієнта конвекції:

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

$$\varepsilon_{conv} = 0.062 \left[ Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n \right]^{1/3}; \quad (20)$$

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

$$\varepsilon_{conv} = 0.22 \left[ Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n \right]^{1/4}, \quad (21)$$

де  $\delta$  – товщина шару,  $\frac{L_1}{L_2}$  – відношення довжини шляху конвективного потоку від нижньої грані нагрівача до холодильника відстані між ними,  $d$  – діаметр нагрівача. Для похилого циліндричного шару  $\frac{L_1}{L_2} = 1, k = 3, n = 0$ . Для горизонтального циліндричного шару  $\frac{L_1}{L_2} = \frac{\pi r + \delta}{d + \delta}, k = 3, n = 0$ .

При значенні комплексу  $Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n < 10^3$  вплив конвекції в щілині практично відсутній, тому при розрахунках теплообміну враховується тільки складова за рахунок теплопровідності.

При обчисленні критеріїв використовується значення середньої температури  $T_{av} = \frac{1}{2}(T_1 + T_0)$ . Для такого випадку величина  $Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n = 7.6 \cdot 10^5$ , а  $\varepsilon_{conv} = 2.62$ . Відповідно,  $\kappa_{eq} = 0.093$  Вт/(м·К), а конвективний тепловий потік від бічної поверхні печі до приймальної поверхні вимірювального пристрою буде залежати від температури  $T_1$ , що встановилася.

### Опис конструкції й зовнішній вигляд вимірювального пристрою

Зовнішній вигляд термоелектричного вимірювального пристрою показано на рис. 3.

Вимірювальна система 1 з термоелектричним датчиком температури й теплового потоку розміщена на телескопічній щоглі 2, яка дозволяє регулювати висоту положення вимірювальної системи. Телескопічна щогла 2 прикріплена до корпусу блока керування й вимірювання 5 цанговим затискачем 3. Знімні опори 6 забезпечують стійке положення вимірювального обладнання.

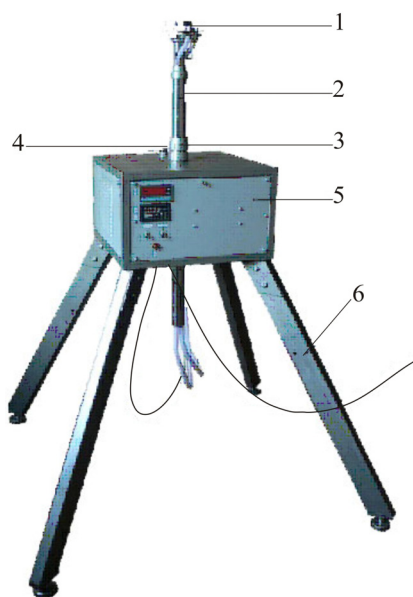


Рис. 3. Зовнішній вигляд вимірювача:  
1 – вимірювальна система,  
2 – телескопічна цюгла, 3 – цанговий  
затискач цюгли, 4 – заливна горловина  
розширювального бачка, 5 – блок  
керування й вимірювання, 6 – опори.

Вимірювач теплового потоку складається з тепломіра, який розташований на теплообміннику для відведення тепла. На теплообміннику біля пасивної сторони тепломіра закріплений датчик температури. Теплообмінник з'єднаний з контуром відведення тепла рідинним теплоносієм. Контур містить термоелектричний охолоджувач рідини й циркуляційний насос. В якості охолоджуючої рідини може використовуватися дистильована вода. Температура рідини в контурі охолодження підтримується двоканальним терморегулятором, в якому один канал підтримує постійною температуру теплоносія в контурі тепломіра, а другий - використовується в якості вимірювача температури пасивної сторони тепломіра. Датчиками температури у вимірювачі служать мініатюрні термометри опору, з номінальною статичною характеристикою – 100 Pt. Сигнал тепломіра вимірюється цифровим вольтметром. Тепломір разом з датчиком температури й теплообмінником утворюють вимірювальну систему.

Зовнішній вигляд вимірювальної системи показано на рис 4. Контур водяного охолодження містить також розширювальний бачок із запасом води близько 4 л, що дозволяє зменшити температурні коливання в процесі роботи терморегулятора. В якості охолоджувачів у контурі використовуються 10 термоелектричних модулів, що працюють у режимі максимальної холодопродуктивності. Від модулів тепло відводиться за допомогою теплообмінників з примусовим обдувом двома повітряними вентиляторами. Живлення термоелектричних модулів здійснюється імпульсним струмом.



Рис. 4. Зовнішній вигляд вимірювальної системи.

Блок керування й вимірювання показано на рис. 5.

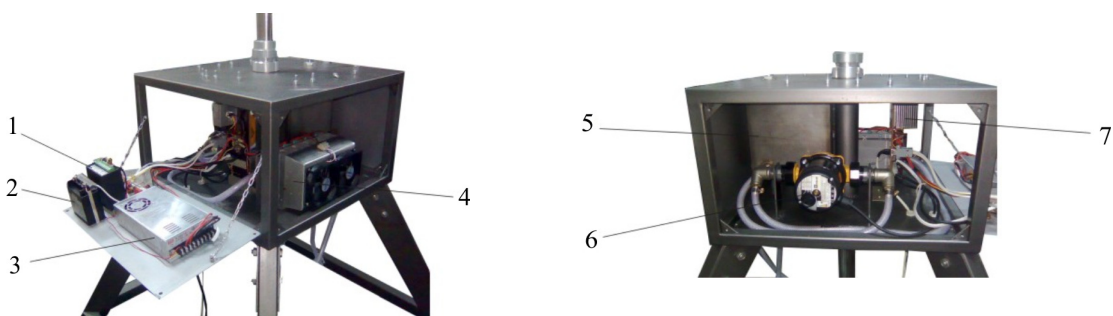


Рис 5. Розташування складових частин всередині блоку керування.

1- цифровий вольтметр, 2 – терморегулятор, 3 – блок живлення, 4 - термоелектричний охолоджувач води в контурі охолодження, 5 – розширювальний бачок, 6 – циркуляційний насос, 7 – силовий ключ системи терморегулювання.

Потужність випромінюваного тепла й температура досліджуваного об'єкта визначаються за результатами вимірювання термоЕРС термоелектричного модуля і температури його гарячої поверхні. Модуль попередньо градуують. Для цього експериментально визначають коефіцієнт чорноти приймального майданчика і, користуючись виразами (22), (24), розраховують тепловий потік, що випромінюється об'єктом, і температуру об'єкта.

### Градування датчика температури й теплового потоку нагрітої поверхні

Для проведення градування вимірювача температури й теплового потоку використовується спеціальний стенд з нагрівачем, теплове випромінювання від якого аналогічне випромінюванню від поверхні нагрітої цементної печі. Отримані експериментальні вольт-ватна й вольт-градусна характеристики термоелектричного вимірювача показані на рис. 6 - 7.

Експериментальна вольт-ватна характеристика вимірювального пристрою описується поліномом вигляду:

$$Q = A_1 \cdot E + A_2 \cdot E^2, \quad (22)$$

де  $E$  – тепловий потік (Вт),  $Q$  – термоЕРС (В),  $A_1 = 3.788$  (Вт/В),  $A_2 = 0.03$  (Вт/В<sup>2</sup>) – числові коефіцієнти.

Температура приймального майданчика тепломіра (у градусах Кельвіна) визначається як

$$T_1 = 273.15 + t_{\text{heater}} + \Delta T, \quad (23)$$

де  $t_{\text{heater}}$  – показання каналу 1 терморегулятора, у градусах Цельсія,  $\Delta T$  - перепад температури на термоелектричному перетворювачі.

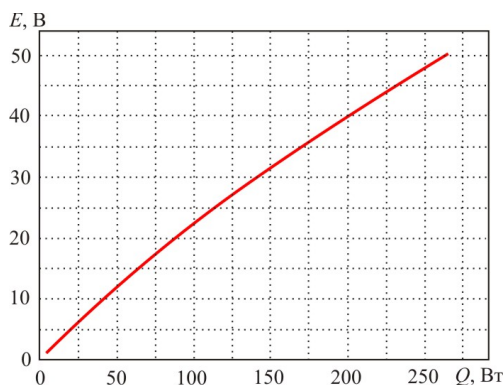


Рис. 6 Вольт-ватна характеристика вимірювача.



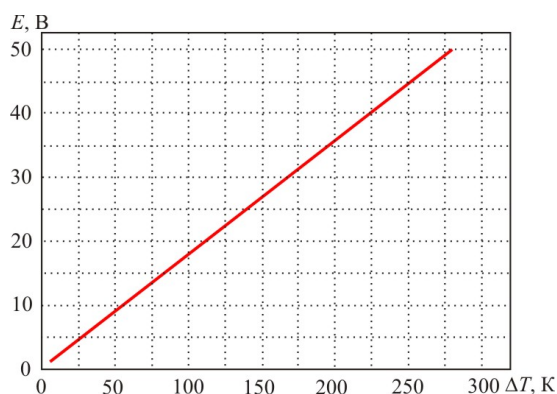


Рис. 7. Вольт-градусна характеристика модуля.

З використанням вольт-градусного калібрування термоелектричного перетворювача перепад температури в тепломірі визначається як:

$$\Delta T = 5.59446 \cdot E_{\text{heater}} \quad (24)$$

де  $E_{\text{heater}}$  – показання вольтметра (В),  $A_3 = 5.59446$  (К/В).

Виходячи з (1) – (4), одержимо температуру об'єкта:

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{3.788 \cdot E_{\text{heater}} + 0.03 \cdot E_{\text{heater}}^2}{\sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot S} + (273.15 + t_{\text{heater}} + 5.5945 \cdot E_{\text{heater}})^4} \quad (25)$$

Якщо точне значення коефіцієнта  $\varepsilon_1$  невідоме, то температуру об'єкта можна більш точно визначити, здійснивши градування. Для цього необхідно визначити значення температури об'єкта незалежним приладом і співставити зі значенням сигналу тепломіра. Так можна визначити узагальнені константи. В цьому випадку:

$$T_0 = \sqrt[4]{k \cdot E_{\text{heater}} \cdot (E_{\text{heater}} + 126.3) + (273.15 + t_{\text{heater}} + 5.5945)^4} \quad (26)$$

При  $T_0 = T$  одержимо значення для  $k$  – узагальненого коефіцієнта теплообміну

$$k = \frac{T^4 - (273.15 + t_{\text{heater}} + 5.5945)^4}{E_{\text{heater}} \cdot (E_{\text{heater}} + 126.3)} = \text{const} \quad (27)$$

де  $T$  – фактичне значення абсолютної температури об'єкта, визначене незалежно.

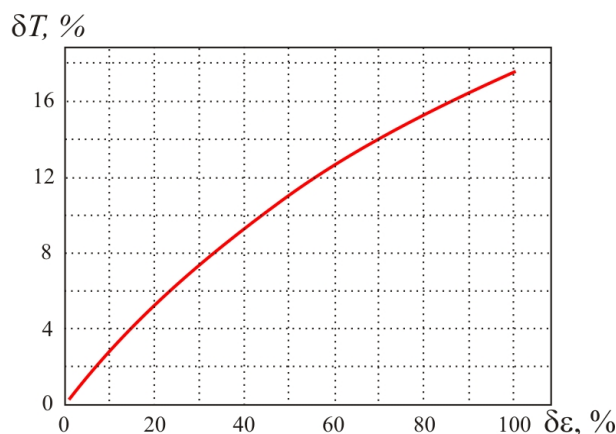


Рис. 8. Залежність похибки у вимірюванні температури  $\delta T$  об'єкта від похибки у визначенні його коефіцієнта чорноти  $\delta \varepsilon$ .



Крім того, у роботі проведені оцінки впливу похибки визначення коефіцієнта випромінювання вимірюваної поверхні на точність вимірювання її температури. Встановлено, що відносна похибка визначення температури незначно залежить від точності визначення коефіцієнта випромінювання поверхні (рис.8). Тому для вимірювання температури з похибкою до 10% досить знати значення коефіцієнта випромінювання поверхні з точністю до 44%.

## **Висновки**

1. Розроблено фізичну й математичну моделі термоелектричного дистанційного вимірювача теплового потоку й температури з урахуванням специфіки теплообміну з поверхні цементних печей.
2. Розраховано вплив конвективної і променистої складових теплового потоку з врахуванням обертання поверхні цементної печі. Внесок конвективної складової потоку не перевищує 30 % від загального теплового потоку.
3. Розроблено й виготовлено конструкцію термоелектричного пристрою для дистанційного вимірювання теплового потоку й температури поверхні цементних печей.
4. Експериментально отримані вольт-ватне й вольт-градусне градування такого термоелектричного вимірювального пристрою.
5. Здійснено розрахунки залежності похибки у вимірюванні температури об'єкта від похибки у визначенні його коефіцієнта чорноти. Встановлено, що для забезпечення точності у визначенні температури 10% досить знати коефіцієнт чорноти випромінюючої поверхні з точністю 44%.

## **Література**

1. M. Bolliger, E. Gallestey, G. Crosley, M. Kiener, Energy management in cement manufacturing, The corporate technical journal of the ABB Group 2, (2007).
2. Анатичук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. – 2001. – № 1. – С. 3 – 14.
3. Анатичук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
4. Анатичук Л.И. Термоэлектрические рекуператоры тепла для цементных печей / Л.И. Анатичук, Жен-Донг Хванг, В.В. Лысько, А.В. Прибила // Термоэлектричество. – 2013. – № 5. – С. 41 – 48.
5. Гусев Г.В. Система бесконтактных измерений температур вращающихся печей и оценки миграции бандажей. / Г.В. Гусев // – <http://www.tekno.ru>.
6. Анатичук Л.І. Про вплив теплообміну на ефективність термоелектричних приладів / Л.І. Анатичук, А.В. Прибила // Термоелектрика. – 2012. № 3. – С. 39-45.
7. Анатичук Л.І. Про вплив теплообміну на ККД термоелектричного генератора / Л.І. Анатичук, А.В. Прибила // Термоелектрика. – 2012. № 4. – С. 83-88.
8. [http://ayan-tula.ru/page/public\\_art1.html](http://ayan-tula.ru/page/public_art1.html).

Надійшла до редакції 24.06.2014