

Анатычук Л.И.², Жен-Донг Хванг¹, Гаврилюк Н.В.²,
Лысько В.В.², Прибыла А.В.²

¹Институт исследования промышленных технологий, Корп. 77,
Чунь Синь Роуд, Чутунг, Синьчжу, Тайвань;

²Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

ДИСТАНЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ

Приведены результаты проектирования термоэлектрического дистанционного измерителя теплового потока и температуры, предназначенного для исследования характеристик поверхности цементных печей. Описана конструкция изготовленного экспериментального образца такого дистанционного измерительного устройства, проведена его градуировка.

Ключевые слова: цементная печь, измерительное устройство, термоэлектричество.

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.

Введение

Общая характеристика проблемы. Характерной особенностью технологического процесса производства цемента является высокое потребление тепловой и электрической энергии [1]. Принципиальная возможность снижения энергетических затрат в процессе производства цемента путем использования термоэлектрических рекуператоров отработанного тепла цементных печей предложена одним из авторов в работах [2-4]. Для создания таких рекуператоров важной является информация о величине тепловой энергии, излучаемой поверхностью цементной печи, а также о ее температуре.

Кроме того, технология изготовления цемента требует поддержание в течение определенного времени необходимой температуры в зонах его прохождения. Поэтому важно контролировать температурные режимы таких зон, а также измерять потери тепла с поверхности печи (рис. 1) [1, 5].

Устройства для контроля величины теплоотдачи с поверхности цементных печей известны [1, 5]. Однако они не обеспечивают измерения температуры и тепловых потоков с достаточной точностью [6, 7].



Рис. 1. Внешний вид цементной печи [8].

Целью данной работы является разработка устройства для точного бесконтактного измерения теплового потока и температуры поверхности цементных печей.

Физическая и математическая модели измерительного устройства

Физическая модель термоэлектрического измерительного устройства для дистанционного определения температуры и теплового потока от поверхности цементной печи 1 длиной s и радиусом a показана на рис. 2. Тепловой поток Q_0 от поверхности печи с температурой T_0 и коэффициентом излучения ε_1 передается в окружающую среду с температурой T_a . На расстоянии b от печи находится термоэлектрическое измерительное устройство. Часть теплового потока Q_1 от цементной печи попадает на графитовую приемную пластину 2 устройства, коэффициент поглощения которой ε_2 . Тепловой поток проходит через приемную пластину, температура поверхности которой T_1 , и через термоэлектрический модуль 3 (T_2 и T_3 – температура горячей и холодной поверхностей, соответственно). Модуль преобразует тепловую энергию в электрическую W . Приемная пластина и термоэлектрический модуль находятся в теплоизолированном корпусе 4. Потери тепла через изоляцию составляют Q_3 . Отвод тепла Q_2 от термоэлектрического модуля осуществляется жидкостным теплообменником (T_4 и T_5 – температуры жидкости на входе и на выходе из теплообменника, соответственно).

Мощность потока тепла с боковой поверхности цементной печи можно подать в виде суммы:

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

где Q_{rad} и Q_{conv} – радиационная и конвективная составляющие теплового потока, соответственно.

Согласно закону Стефана-Больцмана при лучистом теплообмене между двумя произвольными серыми поверхностями выполняется условие:

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

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; S_1 и S_2 – площади излучающей и поглощающей поверхностей, соответственно; φ_{1-2} , φ_{2-1} – угловые коэффициенты излучения.

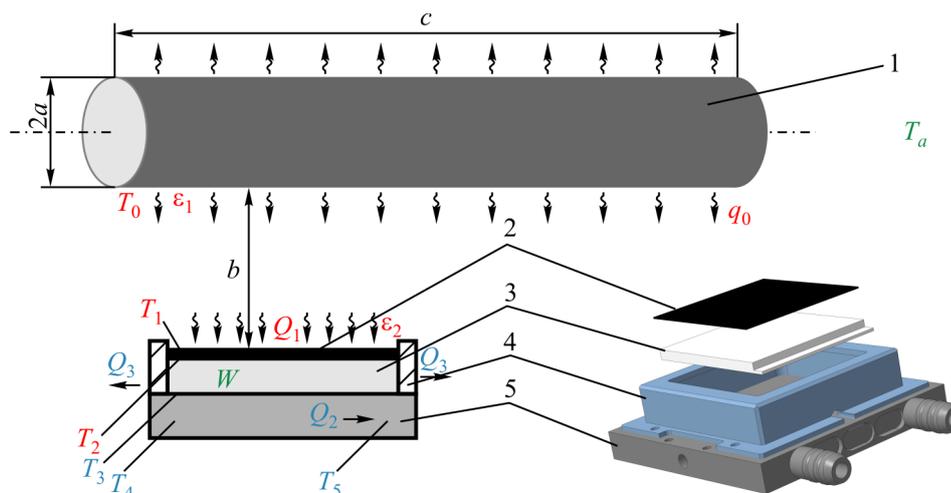


Рис. 2. Физическая модель термоэлектрического измерительного устройства: 1 – цементная печь, 2 – графитовая приемная пластина, 3 – термоэлектрический модуль, 4 – корпус, 5 – жидкостный теплообменник.

Для определения составляющей теплового потока, передаваемого приемной пластине измерительного устройства от поверхности цементной печи путем излучения, необходимо рассчитать угловые коэффициенты излучения:

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

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

где α_1, α_2 – углы между направлением излучения и нормалью к поверхностям S_1 и S_2 , соответственно; r – расстояние между двумя поверхностями.

В случае излучательного теплообмена между цилиндрической поверхностью и плоской площадкой:

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

где $B = \frac{b}{a}$, $C = \frac{c}{a}$, $X = \sqrt{(1+B^2)^2 + C^2}$, $Y = \sqrt{(1-B^2)^2 + C^2}$, c – длина цементной печи 1, a – ее радиус, b – расстояние от поверхности печи до приемной площадки.

Таким образом, общий тепловой поток от поверхности цементной печи к прямоугольной приемной пластине термоэлектрического измерительного устройства определяется выражением:

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

Для расчета конвективной составляющей потока тепла от поверхности цементной печи [4] необходимо определить критерий Нуссельта, который при свободной конвекции является функцией критериев Прандтля, Грасгофа и зависит от параметра формы тела:

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

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

где β – температурный коэффициент объемного расширения среды; Δt – тепловой напор.

В газах термическое сопротивление определяется сопротивлением узкого приповерхностного слоя газа, в котором преобладает молекулярное трение. Таким образом, система уравнений движения будет содержать только четыре независимые переменные вместо пяти (a , $gr\beta\Delta t$, ν , l), что дает только один определяющий критерий:

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

Формулы для расчета коэффициента теплоотдачи в этом случае имеют вид:

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

$$\alpha = A_1 \left(\frac{\Delta t}{2a^5} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

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

$$\alpha = A_2 \left(\frac{\Delta t}{2a} \right)^{1/4}, \quad (11)$$

в) при $Pr Gr > 2 \cdot 10^7$

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

Для воздуха при средней температуре $T_{av} = \frac{1}{2}(T_1 + T_0)$ значения коэффициентов A_{1-3} следующие: $A_1 = 0.28$, $A_2 = 1.07$, $A_3 = 1.05$.

Таким образом, $Pr Gr = 1.3 \cdot 10^{12}$ и, соответственно, $\alpha = 6.8$ Вт/(м²·К).

Однако в рассмотренном выше варианте теплообмена свободной конвекцией не учтено вращение цементной печи, то есть наличие принудительного конвективного теплообмена. Влияние принудительной конвекции может оказаться существенным. В задачах Куэтта-Тейлора такое вращение учитывается путем введения безразмерных параметров – числа Рейнольдса Reh , характеризующего вынужденное течение, или числа Тейлора. Для расчетов используется модифицированное число Тейлора в виде

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

где Ω – угловая скорость вращения,

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

До возникновения вторичных течений ($Ta_m < 1700$), число Нуссельта Nu^* определяется равенством

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

и не зависит от свойств газа, размеров и скорости вращающегося цилиндра.

При возникновении макровихревых вторичных потоков необходимо учитывать число Тейлора. В диапазоне $Ta_m \approx 1700 \dots 10^5$ для воздуха коэффициент теплоотдачи определяется эмпирической формулой

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

в диапазоне $Ta_m \approx 10^4 \dots 2 \cdot 10^8$

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

в диапазоне $Ta_m \approx 10^7 \dots 2 \cdot 10^9$

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

Таким образом, учет вращения печи приводит к повышению коэффициента конвективной теплоотдачи в 2.2 раза.

Кроме того, для проведения точных измерений важным является также учет конвективной составляющей теплового потока, который попадает на приемную площадку измерительного устройства Q'_{conv} . Её можно учесть по формулам для определения теплопроводности твердой стенки введением эквивалентного коэффициента теплопроводности воздушной прослойки.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности прослойки, без учета теплоотдачи излучением от одной стенки к другой, определяется формулой

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

где κ – коэффициент теплопроводности среды, заполняющей прослойку, при средней температуре последней (0.0355 Вт/(м·К) для воздуха при температуре 150 °С); $\varepsilon_{conv} = f(Pr, Gr)$ – коэффициент, учитывающий влияние конвекции.

Расчетные формулы для определения коэффициента конвекции:

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

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

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

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

где δ – толщина слоя, L_1/L_2 – отношение длины пути конвективного потока от нижней грани нагревателя до холодильника к высоте этого пути, d – диаметр нагревателя. Для наклонного цилиндрического слоя $L_1/L_2 = 1$, $k = 3$, $n = 0$. Для горизонтального цилиндрического слоя $\frac{L_1}{L_2} = \frac{\pi r + \delta}{d + \delta}$, $k = 3$, $n = 0$.

При $Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^k \left(\frac{d}{\delta} \right)^n < 10^3$ влияние конвекции в щели практически отсутствует, поэто-

му при расчетах теплообмена учитывается только составляющая потока, определяемая теплопроводностью.

При вычислении критериев используется значение средней температуры $T_{av} = \frac{1}{2}(T_1 + T_0)$.

Для такого случая величина $Pr Gr \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^k \left(\frac{d}{\delta}\right)^n = 7.6 \cdot 10^5$, а $\varepsilon_{conv} = 2.62$. Соответственно, $\kappa_{eq} = 0.093$ Вт/(м·К), а конвективный тепловой поток от боковой поверхности печи к приемной поверхности измерительного устройства будет зависеть от установившейся температуры T_1 .

Описание конструкции измерительного устройства

Внешний вид термоэлектрического измерительного устройства показан на рис.3.

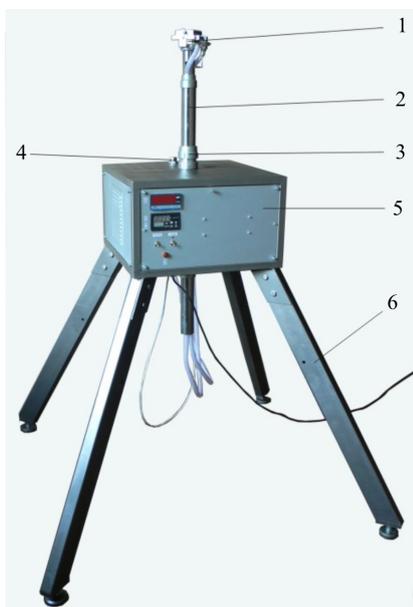


Рис. 3. Внешний вид измерителя: 1 – измерительная головка, 2 – телескопическая мачта, 3 – цанговый зажим мачты, 4 – заливная горловина расширительного бачка, 5 – блок управления и измерения, 6 – опоры.

Измерительная головка 1 с термоэлектрическим датчиком температуры и теплового потока размещена на телескопической мачте 2, позволяющей регулировать высоту положения измерительной головки. Телескопическая мачта 2 прикреплена к корпусу блока управления и измерения 5 цанговым зажимом 3. Съемные опоры 6 обеспечивают устойчивое положение измерительного устройства.

Измеритель теплового потока состоит из тепломера, расположенного на теплообменнике для отвода тепла. На теплообменнике возле пассивной стороны тепломера закреплен датчик температуры. Теплообменник соединен с контуром отвода тепла жидким теплоносителем. Контур имеет термоэлектрический охладитель жидкости и циркуляционный насос. В качестве охлаждающей жидкости может использоваться дистиллированная вода. Температура жидкости в контуре охлаждения поддерживается двухканальным терморегулятором, в котором один канал поддерживает постоянной температуру теплоносителя в контуре тепломера, а второй – используется в качестве измерителя температуры пассивной стороны тепломера. Датчиками температуры

в измерителе служат миниатюрные термометры сопротивления, с номинальной статической характеристикой – 100 Pt. Сигнал тепломера измеряется цифровым вольтметром. Тепломер вместе с датчиком температуры и теплообменником образуют измерительную головку.

Внешний вид измерительной головки показан на рис. 4. Контур водяного охлаждения содержит также расширительный бачок с запасом воды около 4 л, позволяющий уменьшить температурные колебания в процессе работы терморегулятора. В качестве охладителей в контуре используются 10 термоэлектрических модулей, работающих в режиме максимальной холодопроизводительности. От модулей тепло отводится при помощи теплообменников с принудительным обдувом двумя воздушными вентиляторами. Питание термоэлектрических модулей обеспечивается источником импульсного тока.



Рис. 4. Внешний вид измерительной головки.

Блок управления и измерения показан на рис. 5.

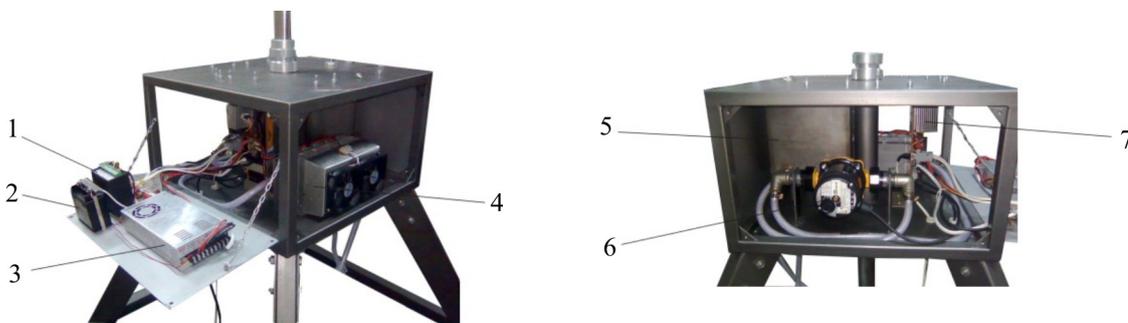


Рис. 5. Расположение составляющих частей внутри блока управления. 1 – цифровой вольтметр, 2 – терморегулятор, 3 – блок питания, 4 – термоэлектрический охладитель воды в контуре охлаждения, 5 – расширительный бачок, 6 – циркуляционный насос, 7 – силовой ключ системы терморегулирования.

Мощность излучаемого тепла и температура исследуемого объекта определяются по результатам измерения термоЭДС термоэлектрического модуля и температуры его горячей поверхности. Модуль предварительно градуируют. Для этого экспериментально определяют коэффициент черноты приемной площадки и, пользуясь выражениями (22), (24), рассчитывают тепловой поток, излучаемый объектом, и температуру объекта.

Градуировка датчика температуры и теплового потока нагретой поверхности

Градуировка измерителя температуры и теплового потока осуществляется использованием специального стенда с нагревателем, тепловое излучение от которого аналогично излучению от поверхности нагретой цементной печи. Полученные экспериментальные вольт-ваттная и вольт-градусная характеристики термоэлектрического измерителя показаны на рис. 6, 7.

Экспериментальная вольт-ваттная характеристика измерительного устройства описывается полиномом:

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

где Q – тепловой поток [Вт], E – термоЭДС [В], $A_1 = 3.788$ [Вт/В], $A_2 = 0.03$ [Вт/В²] – числовые коэффициенты.

Температура приемной площадки измерителя (в градусах Кельвина) определяется как

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

где t_{heater} – показания канала 1 терморегулятора в градусах Цельсия, ΔT – перепад температуры на термоэлектрическом преобразователе.

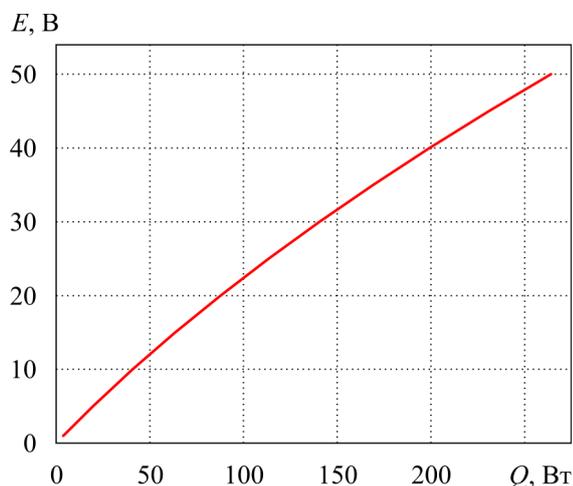


Рис. 6. Вольт-ваттная характеристика измерителя.

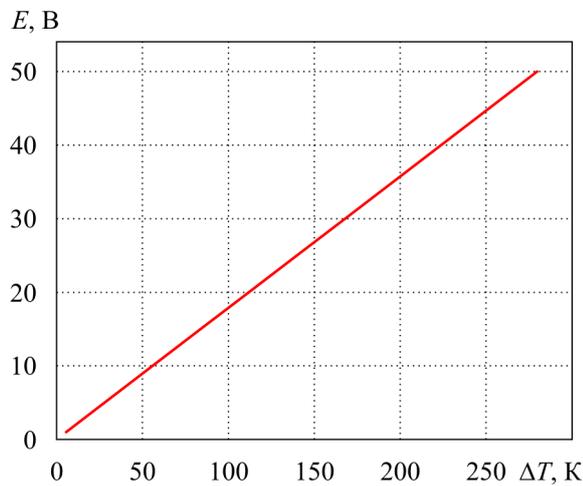


Рис. 7. Вольт-градусная характеристика термоэлектрического преобразователя.

Используя вольт-градусную калибровку термоэлектрического преобразователя, перепад температуры в тепломере определяется как:

$$\Delta T = A_3 \cdot E_{heater}, \quad (24)$$

где E_{heater} – показания вольтметра [В], $A_3 = 5.59446$ [К/В].

Исходя из (1) – (4), получим температуру объекта:

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{A_1 \cdot E_{heater} + A_2 \cdot E_{heater}^2}{\sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot S} + (273.15 + t_{heater} + A_3 \cdot E_{heater})^4}. \quad (25)$$

Если точное значение коэффициента ε_1 неизвестно, то температуру объекта можно определить более точно, выполнив градуировку. Для этого необходимо определить значение температуры объекта независимым прибором и сопоставить со значением сигнала тепломера. Так можно определить обобщенные константы. В этом случае:

$$T_0 = \sqrt[4]{k \cdot E_{heater} \cdot (E_{heater} + A_1 / A_2) + (273.15 + t_{heater} + A_3 \cdot E_{heater})^4}. \quad (26)$$

При $T_0 = T$ получим значение для k – обобщенного коэффициента теплообмена

$$k = \frac{T^4 - (273.15 + t_{heater} + A_3 \cdot E_{heater})^4}{E_{heater} \cdot (E_{heater} + A_1 / A_2)} = \text{const}, \quad (27)$$

где T – фактическое значение абсолютной температуры объекта, определенное независимо.

Кроме того, в работе проведены оценки влияния погрешности определения коэффициента излучения измеряемой поверхности на точность измерения ее температуры. Установлено, что относительная погрешность определения температуры незначительно зависит от точности определения коэффициента излучения поверхности (рис. 8). Поэтому для измерения температуры с погрешностью до 10 % достаточно знать значение коэффициента излучения поверхности с точностью до 44 %.

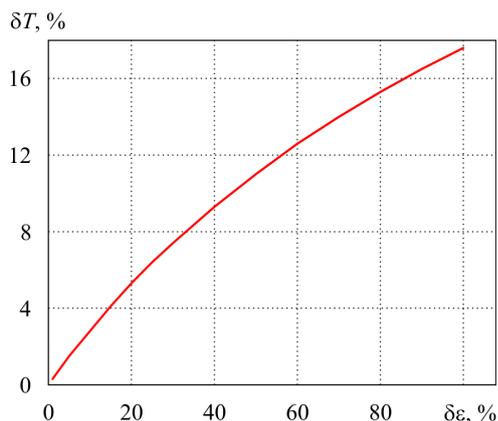


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения температуры δT объекта от погрешности определения коэффициента излучения $\delta \epsilon$.

Выводы

1. Разработаны физическая и математическая модели термоэлектрического дистанционного измерителя теплового потока и температуры для цементных печей.
2. Рассчитано влияние конвективной и лучистой составляющих теплового потока для вращающейся цементной печи. Установлено, что вклад конвективной составляющей потока не превышает 30 % его общей величины.
3. Разработана конструкция и изготовлено термоэлектрическое устройство для дистанционного измерения теплового потока и температуры поверхности цементной печи.
4. Экспериментально получены вольт-ваттная и вольт-градусная градуировки такого термоэлектрического измерительного устройства.
5. Проведены расчеты зависимости погрешности измерения температуры объекта от погрешности определения его коэффициента излучения. Установлено, что для погрешности измерения температуры до 10 % достаточно знать коэффициент излучения поверхности с точностью до 44 %.

Литература

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. 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. Анатычук Л.И. Термоэлектрические рекуператоры тепла для цементных печей / Л.И. Анатычук, Жен-Донг Хванг, В.В. Лысько, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2013. – № 5. – С. 41 – 48.
5. Гусев Г.В. Система бесконтактных измерений температур вращающихся печей и оценки миграции бандажей. – <http://www.tekko.ru>.
6. Анатычук Л.И. О влиянии теплообменных систем на эффективность термоэлектрических приборов / Л.И. Анатычук, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2012. – № 3. – С. 42 – 47.
7. Анатычук Л.И. О влиянии системы теплообмена на КПД термоэлектрического генератора / Л.И. Анатычук, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2012. – № 4. – С. 87 – 92.
8. http://ayan-tula.ru/page/public_art1.html.

Поступила в редакцию 10.01.2014.