

УДК: 681.5:536.5:666.9

**С. Є. Стець**, к.т.н., доцент  
**Є.З. Маланчук**, к.т.н., доцент  
**М. П. Труш**, студент магістратури

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛООВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

*Розглянуто доцільність застосування автоматизованої системи теплового неруйнівного контролю потужних обертових печей для цементної промисловості з метою непрямой оцінки температурного режиму, своєчасного виявлення внутрішніх дефектів, контролю зварних з'єднань та міграції бандажів.*

**Ключові слова:** автоматизація, обертова піч, тепловий неруйнівний контроль, лінійний сканер.

В даний час у ряді технологічних процесів кольорової металургії, хімічної і нафтохімічної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, зокрема у виробництві портландцементу, широко застосовуються сушильні й випалювальні обертові трубчасті печі. Ці печі є складними і дорогими агрегатами безперервної дії з високотемпературними тепловими та фізико-хімічними процесами в середині них. Конструктивно печі являють собою сталевий порожнистий циліндр, обкладений зсередини магнезитовою або хромітовою вогнетривкою цеглою. Даний тип печей дозволяє нарощувати виробництво (30-70 т/год. випаленої сировини), але має ряд недоліків, таких як велику витрату тепла (3500 ккал/кг сировини), низький ККД (30,5%) і високу вартість ремонту футеровки. Тому завдання підвищення якості керування процесом випалу та енергозбереження залишається актуальним.

Завдання контролю стану футерування обертових печей, непрямой оцінки температур всередині печі а також ходу технологічного процесу, виникло практично відразу, як тільки були створені перші обертові печі. Одним з перших рішень було розміщення термопар в шарі футеровки і знімання сигналу через спеціальні струмознімальні кільця, змонтовані на поверхні печі. Сьогодні такі системи іноді застосовуються на печах, але вони дають інформацію про температуру тільки в одній або декількох точках контролю, причому надійність контролю дуже низька через відмову термопар з причини їх механічного пошкодження, впливу агресивного середовища, заростання розплавленим шаром матеріалу. Слід зазначити, що до сьогоднішнього часу розроблено ряд математичних моделей розрахунку та аналізу теплових процесів в обертових печах. Ці моделі спрямовані в основному на вирішення завдань аналізу режимів роботи печей, тепломасообміну всередині печей, теплових втрат. Моделі, орієнтовані на дефектометрію внутрішнього шару (обмазки) печі, присвячені дослідження В.Г. Торгунакова [1]. М. В. Шубінін розроблені методи усунення внутрішніх дефектів футеровки без зупинки печі [2].

**Постановка завдання.** Найбільший практичний інтерес при експлуатації обертових печей представляє вирішення двох задач: 1) підтримання встановлених технологічними вимогами температур за зонами по довжині печі, і перш за все в зоні спікання для забезпечення якості продукції, оптимізації енерговитрат і продуктивності; 2) завчасне виявлення дефектних ділянок на корпусі печі, пов'язаних з ушкодженнями футеровки, обмазки і зварних швів, які можуть викликати неприпустимо великі температурні градієнти на сталевому корпусі і спричинити його пошкодження. Рішення цих задач можливе за допомогою контролю температурного поля зовнішньої стінки корпусу обертової печі.

**Вирішення завдання.** Для визначення стану футерування застосовувалися різні види випромінювання — від гама-променів до ультразвуку. Перешкодою до вимірювання товщини футеровки за відбитими радіохвилями високої частоти є необхідність влаштування отвору в корпусі печі, так як метал протидіє розповсюдженню коливань у потрібному напрямку. Джерелами гама-променів служили радіоактивні ізотопи, закладені або у футеровку, або на поверхні печі. В першому випадку ізотопи або закладалися в цеглу в спеціальних ампулах, або створювалися в ньому шляхом попереднього інтенсивного опромінення цегли в реакторі.

З появою пірометрів були зроблені спроби створювати систему вимірювання температури обичайок печі за допомогою пірометрів, що переміщаються уздовж печі по напрямних і знімають температурний розподіл поверхні за рахунок обертання печі та поступального руху

пірометра. На багатьох заводах проводять вимірювання температури поверхні печі з допомогою звичайних ручних пірометрів по графіку 3 рази на добу.

Дослідження обертової печі були проведені на Здолбунівському ПАТ «Волинь-Цемент», основні технічні характеристики якої представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Технічні характеристики обертової печі №6 ПАТ «Волинь-Цемент»

Тип пічного агрегату	ВП-4,5 (4,5×170)
Відношення довжини до діаметру	38,0
Продуктивність, при вологості шламу 38%, т/год.	50
Робочий об'єм по футеровці, м <sup>3</sup>	2243
Питома продуктивність, кг/(м <sup>2</sup> ·год)	22,1
Витрата тепла на отримання клінкеру, кДж/(кг·К)	5000
Частота обертання, об/хв.	1,0
Кількість опор, шт.	7
Нахил печі, %	4
Потужність головного електроприводу, кВт	250
Коефіцієнт використання річного календарного часу	0,7 – 0,8
Втрата сировини, %	0,37

Аналіз служби футеровки показав, що в печах мокрого способу виробництва діаметром 5 м тривалість стійкості футеровки в зоні спікання складає 145 діб, в той час як середня стійкість футеровки у всіх печах мокрого способу рівна 227 діб. Через ремонт вогнетриву пічних агрегатів вони простоюють близько 15-20% календарного часу, що знижує коефіцієнт використання та істотно підвищує витрати на ремонт обладнання.

Практика роботи обертових печей свідчить, що при дотриманні правил технічної експлуатації, підтриманні в процесі експлуатації стійкість обмазки, організації контролю стану футеровки, своєчасній перефутеровці печі під час планових ремонтів за виключенням ремонту на невеликих ділянках, можна значно збільшити термін служби футеровки до 200 діб. Аналіз показує, що приблизно 30% передчасних виходів із ладу футеровки зони спікання відбувається через порушення експлуатаційного режиму [3].

Загальні причини скорочення термінів служби футеровки в печах великого діаметру обумовлені зниженням міцності вогнетривкої кладки і погіршенням умов підтримання стабільної обмазки, збільшення механічних навантажень в результаті деформацій корпусу, теплового розширення і осьового зсуву, частими зупинками через несправність обладнання. Стійкість футеровки також залежить від виду і якості вогнетривів, способів транспортування і зберігання, способів вкладання цегли та складу клейових сумішей.

Небезпечними слід вважати дефекти (обвалення) футеровки, для ліквідації яких необхідна зупинка печі. Дефекти обмазки становлять небезпеку, якщо їх глибина перевищує половину товщини обмазки в цільних областях, а поперечні розміри більше 5% від лінійних розмірів внутрішнього кола печі. Поява прогарів на високотемпературній ділянці печі вимагає активного і своєчасного втручання оператора печі.

На основі аналізу схеми теплового взаємодії елементів печі складемо перелік процесів, які необхідно врахувати при розробці тривимірної математичної моделі: теплові процеси, що відбуваються під час спалювання палива; теплообмін між топковими газами, випалювальним матеріалом і внутрішньою поверхнею корпусу печі; теплообмін всередині клінкеру, обумовлений механічним переміщенням матеріалу і теплопровідністю; теплообмін між клінкером і внутрішньою поверхнею корпусу печі; теплообмін усередині багат шарового корпусу — в обмазці, футеровці і кожусі; теплообмін між кожухом і навколишнім середовищем (рис. 1). Основний наголос зроблений на аналізі процесів теплопереносу, що роблять вплив на температурне поле поверхні обертової печі.

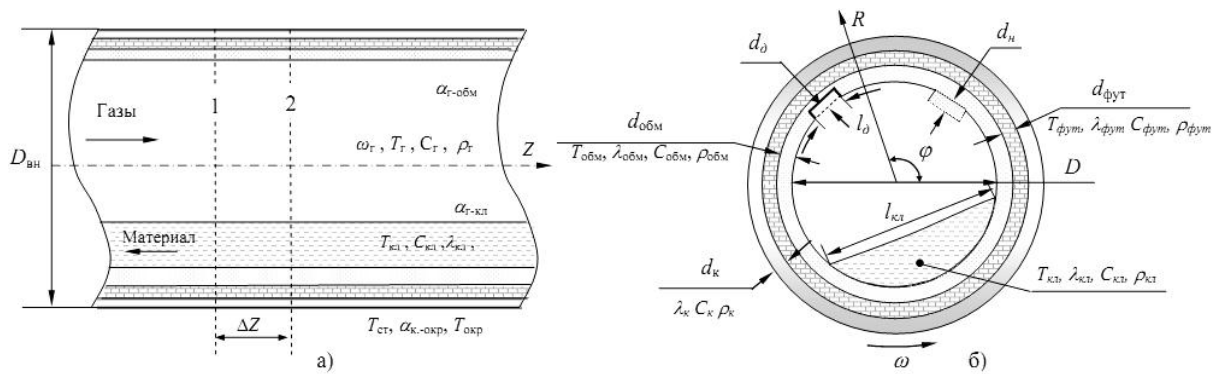


Рис. 1. Схема теплообміну в обертовій печі: а – осьовий переріз; б – радіальний переріз.

Таким чином, математична модель обертової печі виражена сукупністю рівнянь, що представляють собою крайову задачу тривимірної теплопровідності в циліндричній системі координат; методом розв'язання даної задачі є сукупність рівнянь теплового балансу для комірок Діріхле [1].

Граничні умови для зовнішньої поверхні записуються у відомому вигляді:

$$\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial r} = -\alpha_{\text{корп-окр}} \cdot (T_k - T_{\text{окр}}) \quad (1)$$

де  $\lambda_k$  – коефіцієнт теплопровідності сталевий оболонки корпусу;  $T_k$  – температура зовнішньої поверхні корпусу;  $T_{\text{окр}}$  – температура оточуючого середовища;  $\alpha_{\text{корп-окр}}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі між корпусом печі і оточуючим середовищем, враховує променеве випромінювання і конвекцію.

Граничні умови на внутрішній поверхні печі можна записати так:

$$\alpha_{2-обм} \cdot (T_2 - \overline{T_{обм}}) \cdot \frac{l_{обм}}{\pi \cdot D} - \alpha_{обм-кл} \cdot (\overline{T_{обм}^3} - \overline{T_{кл}^3}) \cdot \frac{\pi \cdot D - l_{обм}}{\pi \cdot D} = -\lambda_{обм} \cdot \frac{\partial T_{обм}}{\partial n} \quad (2)$$

де  $\alpha_{2-обм}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі між газом і обмазкою, враховує променеве випромінювання і конвекцію;  $T_2$  – температура газу в точці  $z$ ;  $\overline{T_{обм}}$  – температура обмазки, усереднена по довжині кола, яка не закрита клинкером;  $l_{обм}$  – довжина кола печі, не закрита клинкером;  $\alpha_{обм-кл}$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі між обмазкою і клинкером;  $\overline{T_{обм}^3}$  – температура обмазки, усереднена по довжині кола і закрита клинкером;  $\overline{T_{кл}^3}$  – середня температура клинкеру в зоні контакту з обмазкою;  $\lambda_{обм}$  – коефіцієнт теплопровідності обмазки;  $D$  – внутрішній діаметр печі;  $n$  – нормаль до внутрішньої поверхні.

В рамках моделі прийнято, що простір корпусу печі складається з множини комірок, в кожній з яких виконуються базові рівняння теплообміну. Для отримання елементарних комірок Діріхле застосована просторова сітка з вузлами  $(R_i, \varphi_j, Z_k)$ ,  $i = 0, \dots, N_R$ ,  $j = 0, \dots, N_\varphi$ ,  $k = 0, \dots, N_Z$ . Навколо кожного вузла проведені поверхні рівного впливу вузлів. Зовнішній циліндричний шар розміщений на зовнішній границі печі. Кожний перехід від одного шару до іншого співпадає з одним із координатних шарів.

Запропонована модель заснована на рішенні рівнянь теплового балансу, записаних для комірок Діріхле вздовж кожної координати. Для комірок Діріхле, розміщених в корпусі вздовж радіусу, які не межують з газовим середовищем, рівняння теплового балансу записується у вигляді:

$$\left( C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k} V_{i-\frac{1}{2},j,k} + C\rho_{i+\frac{1}{2},j,k} V_{i+\frac{1}{2},j,k} \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta t} = \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{l_i} S_{i-\frac{1}{2}} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i+1,j,k}^{n+1}}{l_{i+1}} S_{i+\frac{1}{2}} \quad (3)$$

де  $C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k}$  – добуток густини і теплоємності для тієї половини комірки Діріхле, яка розміщена між радіусами  $R_i$  і  $\frac{R_i + R_{i-1}}{2}$  (радіальна відстань між вузлами може змінюватися);  $C\rho_{i+\frac{1}{2},j,k}$  – добуток густини і теплоємності для тієї половини комірки Діріхле, яка розміщена між радіусами  $R_i$  і  $\frac{R_i + R_{i+1}}{2}$ ;  $V_{i-\frac{1}{2},j,k}$ ,  $V_{i+\frac{1}{2},j,k}$  – об'єми вищеписаних половинок комірок Діріхле;  $\lambda_{i-\frac{1}{2}}$ ,  $\lambda_{i+\frac{1}{2}}$  – коефіцієнти теплопровідності для обох половинок комірки;  $S_{i-\frac{1}{2}}$ ,  $S_{i+\frac{1}{2}}$  – площі теплообміну між коміркою  $i, j, k$  і сусідніми комірками  $i-1, j, k$  і  $i+1, j, k$  відповідно;  $T_{i,j,k}^{n+1}$ ,  $T_{i,j,k}^n$  – температури в комірках Діріхле в наступному і поточному часових шарах;  $l_i = R_i - R_{i-1}$  – відстань між центрами комірок Діріхле по радіусу;  $\Delta t$  – проміжок часу між двома сусідніми часовими шарами.

У випадку, коли в комірці Діріхле проходить границя між зонами з різними теплофізичними властивостями, ліва і права частина рівняння (3) розбивається на відповідне число доданків.

Основні розрахунки виконані для наступних вихідних даних: внутрішній діаметр печі 4,5м; ступінь заповнення печі 4-18%; частота обертання 1,0 об/хв.; нахил печі 4%; температура оточуючого середовища 20,0°C. Параметри шарів печі приведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Параметри конструкційних матеріалів (шарів) печі

№ шару	Назва	Теплопровідність, $Вт/(кг \cdot К)$	Температуро-провідність, $м^2/с$	Товщина, $м$	Число кроків вздовж радіуса
1	Корпус(сталь)	$\lambda_k=38,0$	$\alpha_k=7,39 \cdot 10^{-6}$	$d_k=0,05$	10
2	Футеровка	$\lambda_{фут}=0,4-3,2$	$\alpha_{фут}=8,2 \cdot 10^{-7}$	$d_{фут}=0,23$	20
3	Обмазка	$\lambda_{обм}=0,4-2,3$	$\alpha_{обм}=2,97 \cdot 10^{-7}$	$d_{обм}=0,15$	15

Параметри клінкеру: коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{кл} = 0,4 \div 2,0 \text{ Вт}/(кг \cdot К)$ ; коефіцієнт температуропровідності  $\alpha_{кл} = 2,97 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/с$ ; кут скочування клінкеру 40°; температура на вході в зону спікання 1100°C – 1400°C.

Модель дефекту внутрішнього шару випалювальної печі, розглянута за допомогою програмного пакету PDETool середовища MATLAB, дає уявлення про температурне поле на поверхні корпусу печі (рис. 2).

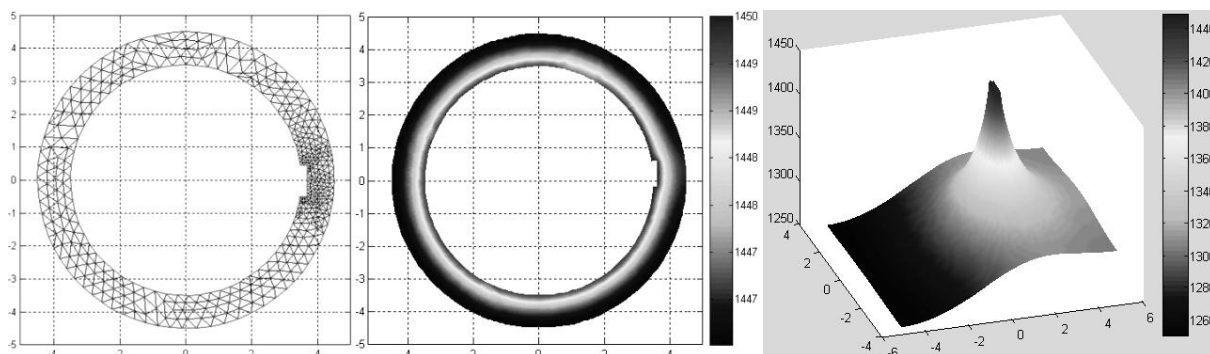


Рис. 2. Моделювання дефекту футерування печі в пакеті PDETool MATLAB.

Для вирішення питання контролю температурних режимів печі і ходу технологічного процесу пропонується лінійно-скануючий радіаційний пірометр, який дозволить в реальному масштабі часу отримати досить повну картину того, що відбувається всередині печі та

контролювати зону спікання, одержати інформацію про температурні градієнти, оцінити їх розміри і точну координатну прив'язку, а також контролювати стан зварних швів і міграцію бандажів. Це дасть можливість персоналу своєчасно застосувати доступні засоби управління технологічним процесом з метою запобігання небажаних технологічних або технічних ситуацій [4].

Загальна схема системи розташування лінійного сканера показана на рис. 3. Прилад встановлюється таким чином, щоб контрольована частина печі перебувала в полі огляду. Додатково необхідний датчик положення для синхронізації сканування із обертанням печі. Основні параметри установки: відстань від осі печі – 20 м; охоплювана довжина – не менше 40 м (контрольована довжина зони спікання – 25,5 м); кут сканування 90°; оптична роздільна здатність 450:1; частота сканування – 150 Гц; передача даних – Ethernet TCP/IP; фізичне середовище передачі – RS485; діапазон вимірів: 600-1200°C; похибка 0,5%. Додатковими джерелами шумів є параметри навколишнього середовища: температура; швидкість вітру; наявність опадів та ін.

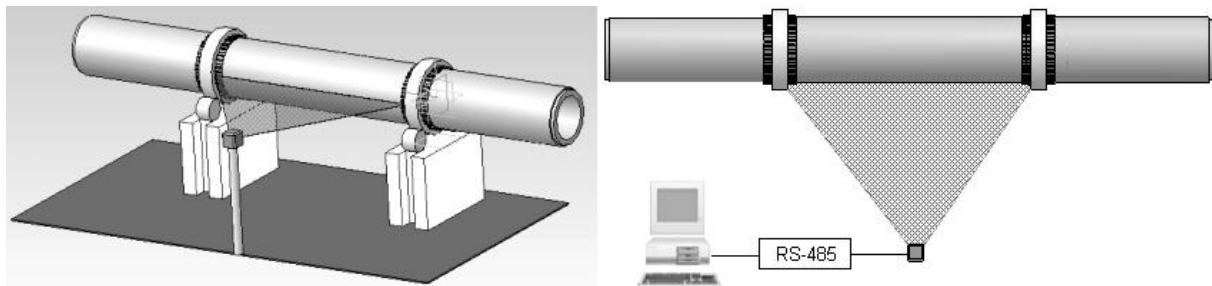


Рис. 3. Схема розташування лінійного сканера.

Одним із найпростіших методів усунення внутрішніх дефектів без зупинки печі є зовнішнє охолодження корпусу зрошенням водою. При цьому розплавлений клінкер застигає (налипає) в зоні пошкодження. Охолодження повинно бути недовготривалим (під час поливу лінійний сканер не дає показів) і рівномірно розподіленим вздовж зони спікання, щоб уникнути механічних напружень на поверхні. Система неруйнівного контролю температурного поля дасть можливість при перевищенні гранично допустимих значень керувати системою зрошення. Для проектування подібної системи необхідно встановити залежність зміни температури внутрішніх шарів печі від витрати води, дослідити ефективність усунення дефектів вказаним способом.

**Висновки.** В результаті дослідження проведено системний аналіз процесів і параметрів, які впливають на теплообмін в обертових печах, на базі математичної моделі теплових процесів показано методики розрахунку температурних полів в корпусі і на кордонах конструктивних шарів печі. Підтверджено необхідність автоматизованої системи теплового неруйнівного контролю для ідентифікації прихованих дефектів в обертових печах з метою своєчасного виявлення небажаних процесів і попередження аварійних ситуацій, скорочення енерговитрат і підвищення продуктивності. В подальшому передбачається дослідження і проектування автоматизованої системи охолодження корпусу печі, розробка програмного забезпечення та його інтеграція зі SCADA-системою.

### Література

1. Торгунаков В. Г. Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей. – Томск, 2006. – 41 с.
2. Шубин М. В. Автоматическая система предупреждения аварий (разрушение огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей. – М.: 2010. – 27 с.
3. Древицкий Е. Г. Повышение эффективности работы вращающихся печей / Е. Г. Древицкий, А. Г. Добровольский, А. А. Коробок. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
4. Гусев В. Г. Система бесконтактных измерений температур вращающихся печей и оценки миграции бандажей. – ИнформЦемент, 2008.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.