

збільшується з 0,001 до 0,004 г/(м²·год.) зі збільшенням вмісту кисню в конденсаторі з ≈ 30 до 100-200 мкг/кг при незмінній температурі 30-35°C;

2) зростання внутрішніх відкладень НРЧ при НКВР нижче, ніж при ГАВР і не перевищує 4-9 г/м² за 1000 годин експлуатації. Питоме забруднення труб за 14962 годин експлуатації на НКВР не перевищило 140 г/м². Зростання температури металу труб НРЧ у тривалій експлуатації на НКВР сповільнюється і її значення не перевищує 530-540°C. Зовнішня високотемпературна корозія труб НРЧ на блоках 800 МВт при цьому не припинилася, а на блоках 300 МВт ст. №1 й №4 такої не виявлено, що свідчить про значну залежність її від топкового режиму й виду палива;

3) при переведенні на НКВР блоків СКД першого покоління рекомендуються як обов'язкові заходи заміна латунних трубок у ПНД на сталеві й ретельне відмивання міді, що нагромадилася в тракці енергоблоків у попередній експлуатації на гідразинно-аміачному водному режимі;

4) на блоках 300 і 800 МВт, на яких з часу пуску і монтажу всі ПНТ були змонтовані з трубками з нержавіючої сталі, занос проточної частини ЦВТ не перевищує 3-5%, тобто знаходиться в межах допустимих величин, обмеження потужності турбін не спостерігається. Відкладення в ЦВТ складаються, в основному, з міді. Ерозійного занесення проточної частини турбін з вини НКВР не виявлено.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шицман М.Е. Нейтрально-кислородный водный режим на энергоблоках СКД / М.Е.Шицман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136с.
2. Липов Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М.Липов, Ю.М.Третьяков. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592с.

Надійшла до редколегії 21.05.2012.

УДК 621.783.24:621.1

РЕВУН М.П., д.т.н., професор
ГРЕСС О.В.*, д.т.н., професор
КАЮКОВ Ю.М., асистент
ІВАНОВ В.І., ст. викладач
ЧЕПРАСОВ О.І., к.т.н., професор

Запорізька державна інженерна академія
*Дніпродзержинський державний технічний університет

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РАДІАЦІЙНОГО ТЕПЛООБМІНУ В НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

Вступ. Актуальним завданням під час проектування та реконструкції нагрівальних печей є досягнення припустимого значення перепаду температури між поверхнями та за перерізом заготовок, що нагрівають, перед видаванням із печі. Найбільші складнощі під час вирішення даної задачі виникають у камерних полум'яних печах [1], де спалювання палива сприяє формуванню нерівномірного розподілу температури у газовому об'ємі камери, а, отже, й на поверхні металу, який нагрівають.

На ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» для нагрівання заготовок прямокутного перерізу використовують печі камерного типу, що опалюють за допомогою восьми пальників, які встановлено на одній бічній стінці камери у два ряди за її висотою. Наявність такої схеми опалювання даних агрегатів суттєво ускладнює рівномірність нагрівання заготовок, які розміщують у печі за напрямом руху гріючого середовища, що потребує проведення робіт щодо її удосконалення.

Проте відсутність методики розрахункової оцінки впливу систем опалювання нагрівальних печей камерного типу, які використовують на ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь», на рівномірність нагрівання садок металу та засвоєння ним теплоти суттєво ускладнює вирішення зазначеної проблеми.

В роботах [2, 3] викладено основні положення та способи чисельної реалізації зонального методу розрахунку радіаційного та складного теплообміну для полум'яних металургійних печей у загальному вигляді.

Постановка задачі. Метою роботи є розробка інженерної методики розрахунку радіаційного теплообміну в робочому об'ємі нагрівальної печі камерного типу ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» для оцінки ступеню нагрівання заготовок за різними схемами опалювання.

Результати роботи. Методику засновано на спільному розв'язанні задач зовнішнього та внутрішнього теплообміну в робочій камері нагрівальної печі, що дозволяє забезпечити обчислення розподілу температури на поверхні та у перерізі заготовок за дискретним часом залежно від місця їх розташування в робочій камері.

При розв'язанні задачі зовнішнього теплообміну з використанням зонального методу у постановці роботи [3] приймали такі припущення:

- садка заготовок є пластиною з товщиною, що дорівнює товщині всіх заготовок, укладених в один ряд без зазорів, яку піддають двохсторонньому нагріванню;
- через наявність двох рядів пальників забезпечується симетричне нагрівання заготовок;
- тіла, що беруть участь у променистому теплообміні (метал, футерівка, продукти згоряння) є сірими, випромінювання й відбивання променистої енергії поверхнями металу та футерівки – дифузним.

У такому разі модель теплообміну в робочому об'ємі нагрівальної печі камерного типу подають замкнутою системою, створеною твердими непрозорими тілами, яка розділена поглинально-випромінювальним середовищем та має розміри робочого об'єму пічної камери. Для урахування змінювання складу продуктів згоряння й оптичних властивостей поглинально-випромінювального середовища за напрямом руху гріючого середовища зазначену систему поділяють на об'ємні зони факела та продуктів згоряння, а також плоскі поверхневі зони металу й футерівки.

Концентрацію палива, ступінь його вигорання, а також концентрації випромінюючих компонентів продуктів згоряння щодо довжини факела, розраховують за співвідношеннями роботи [4].

Разом з реальними поверхневими зонами металу та футерівки вводять умовні абсолютно чорні поверхні [2], що відокремлюють об'ємні зони від суміжних з ними та пропускають падаюче на них випромінювання, яке розглядають як власне дифузне.

Розрахунок радіаційного теплообміну в межах окремої зони здійснюють резольвентним зональним методом [5] з використанням розв'язувальних узагальнених кутових коефіцієнтів, які пов'язують результуючі та власні теплові потоки у даній зоні.

Визначення розв'язувальних узагальнених кутових коефіцієнтів виконують у три етапи:

- для прийнятих типів підсистем методом Монте-Карло [6] розраховують геометричні кутові коефіцієнти випромінювання $\varphi_{k,i}$, де $k,i = 1 \dots n$;
- узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання обчислюють з використанням співвідношення:

$$\Phi_{k,i} = \varphi_{k,i} \cdot \exp[-k_i \cdot S_i^{\text{до}}], \quad k,i = 1 \dots n, \quad (1)$$

- розв'язувальні узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання визначають під час вирішення системи рівнянь

$$\Psi_{k,i} = \Phi_{k,i} + \sum_{j=1}^{n-1} \Phi_{k,j} \cdot R_j \cdot \Psi_{j,i}, \quad k,i = 1 \dots n, \quad (2)$$

де k_I – коефіцієнт поглинання у межах I -ої об'ємної газової зони; S_I^{ef} – ефективна довжина шляху променя для I -ої об'ємної зони.

Далі розраховують коефіцієнти радіаційного теплообміну

$$a_{k,i} = \varepsilon_k \cdot \sigma_0 \cdot F_k \cdot (\Psi_{k,i} \cdot \varepsilon_i - \Delta_{k,i}), \quad k,i = 1 \dots n, \quad (3)$$

де σ_0 – постійна Стефана-Больцмана; F_k – уявна поверхня; $\varepsilon_k, \varepsilon_I$ – ступінь чорноти k -ої поверхневої та I -ої об'ємної зони відповідно; $\Delta_{k,I}$ – символ Кронекера ($\Delta_{k,i} = 1$ при $k = i$, $\Delta_{k,i} = 0$ при $k \neq i$).

Записують систему зональних рівнянь для поверхневих та об'ємної зон у вигляді:

$$Q_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4, \quad i = 1 \dots n-1; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_I \cdot T_k + g_I^0 + Q_I^v = 0, \quad (5)$$

де Q_i – результуючий тепловий потік; $b_{k,i}$ – коефіцієнти радіаційного теплообміну; T_k – зональна температура; g_I – коефіцієнт конвективного теплообміну для об'ємної зони I ; g_I^0 – сума доданків, які не залежать від температури об'ємної зони; Q_I^v – виділення теплоти в об'ємній зоні під час горіння палива.

Розрахунок виділення теплоти Q_I^v , а також коефіцієнтів g_I і g_I^0 для об'ємної зони I -ої підсистеми здійснюють за формулами роботи [7].

За відомих значень температури поверхневих зон та виділення теплоти в об'ємних зонах, вирішуючи зазначену систему рівнянь, за кожним часовим кроком обчислюють результуючі теплові потоки для поверхневих зон і температуру об'ємних зон.

Поверхневі зони є межами, які відділяють об'ємні газові зони від об'ємних зон металу та футерівки печі.

Припущення про постійність величин, що характеризують теплообмін у межах кожної поверхневої зони, дозволяє описати розподіл температури $T(x,y)$ за товщиною шарів об'ємних зон металу та футерівки одномірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k \quad (6)$$

за початкової умови

$$T(y, 0) = T_n(y), \quad (7)$$

а також граничних умов, що дозволяють визначати:

– нагрівання металу та футерівки розділової стінки печі, виконаної з шамотного вогнетриву, як симетричне нагрівання одношарової пластини

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (8)$$

– нагрівання поверхні, що граничить з об'ємною газовою зоною

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0,5\delta} = q_I; \quad (9)$$

– нагрівання футерівки підвісного склепіння пічної камери, що виконано з шамотного вогнетриву, на поверхні, яка граничить з навколишнім середовищем, як несиметричне нагрівання одношарової пластини

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{i,\bar{n}} \cdot (T_{\bar{c}i\bar{a}} - T_{i,\bar{n}}); \quad (10)$$

– нагрівання заслінки, торцевої стіни пічної камери та бічної стіни з боку установки пальників як несиметричне нагрівання двошарової пластини з товщиною теплоізоляційного та вогнетривкового шарів δ_{i3} і $\delta_{\text{вог}}$ відповідно у площині стикування шарів футерівки печі ($y = \delta_{i3}$)

$$\lambda_{i3} \frac{\partial T_{i3}}{\partial y} = \lambda_{\bar{a}\bar{a}} \frac{\partial T_{\bar{a}\bar{a}}}{\partial y}, \quad (11)$$

де $T_n(y)$ – початковий розподіл температури за товщиною шару відповідної об'ємної зони металу або футерівки; y, τ – поточні координата на осі, що є перпендикулярною до відповідної поверхневої зони та спрямованою у бік збільшення температури, та час; T, τ, c, λ – температура, тривалість нагрівання; об'ємна питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару об'ємної зони металу або футерівки; δ – геометрична товщина; q_I – щільність результуючого теплового потоку для відповідної поверхневої зони; $\alpha_{n,c}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні футерівки до навколишнього середовища; $T_{\text{зов}}, T_{n,c}$ – температура зовнішньої поверхні футерівки та навколишнього середовища, відповідно; $T_{i3}, T_{\text{вог}}, \lambda_{i3}, \lambda_{\text{вог}}$ – відповідно температура та коефіцієнти теплопровідності матеріалу теплоізоляційного та вогнетривкового шарів футерівки печі.

Вирішення нелінійної задачі (6)-(11) для об'ємних зон металу та футерівки виконують методом кінцевих різниць з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми. При розв'язанні розглянутих вище крайових задач на кожному часовому кроці визначають дискретні температурні поля об'ємних зон металу та футерівки, а також температури відповідних до них поверхневих зон.

Розроблену методику використовували під час оцінки якісних характеристик нагрівання заготовок за імпульсною та традиційною схемами опалювання нагрівальної печі по завершенні періоду витримки однакової тривалості. Розрахункові значення температури газу T_g , поверхні T_n та теплового центру металу $T_{\text{ц}}$ у об'ємних зонах печі подано у табл.1.

Таблиця 1 – Розподіл температури по завершенні періоду витримки у зонах печі за традиційною (I) та імпульсною (II) схемами опалювання*

Параметри	Схема I					Схема II				
	номер об'ємної зони					номер об'ємної зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T_g, K	1425	1503	1456	1428	1420	1393	1480	1460	1442	1435
T_n, K	1418	1436	1428	1420	1410	1419	1435	1435	1430	1425
$T_{\text{ц}}, \text{K}$	1408	1430	1422	1414	1404	1410	1429	1431	1424	1420

Примітка: * середні значення за цикл змінювання температури печі

Встановлено, що наявність пульсуючого факела призводить до зменшення нерівномірності розподілу температури газового середовища у зонах печі та збільшення

рівномірності її розподілу на поверхні та у центрі металу, що нагріваються. Застосування імпульсної схеми опалювання підвищує рівень температури в останніх за напрямом руху факела об'ємних газових зонах, тобто сприяє збільшенню теплової місткості металу.

Якісні показники нагрівання металу оцінювали за значенням перепадів температури для поверхні (різниця температури між показами пічного термодатчика та температурою поверхні заготовки ΔT_n за зонами печі) та за перерізом металу ΔT_u , що нагрівають, в об'ємних газових зонах на момент видавання з печі (табл. 2).

Таблиця 2 – Перепади температури на поверхні та у перерізі заготовок за традиційною (I) та імпульсною (II) схемами опалювання

Параметри	Схема I					Схема II				
	номер об'ємної зони					номер об'ємної зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ΔT_n , град.	14,87	3,74	3,55	13,93	21,35	10,62	2,45	2,88	5,22	10,39
ΔT_u , град.	11,32	6,44	5,46	7,51	11,97	8,69	5,45	4,28	6,12	8,04

Одержані результати вказують на поліпшення якості нагрівання металу за імпульсною схемою: різниця температури різних ділянок поверхні металу на момент його видавання із печі не перевищує 11 град, тоді як за традиційною схемою становить 21 град, а величина максимального перепаду температури у перерізі заготовок по завершенні періоду витримки за традиційною та імпульсною схемами складає відповідно 12 і 8 градусів.

Висновки. Розроблено методику розрахунку радіаційного теплообміну в нагрівальних печах камерного типу, що дозволяє визначати розподіл температури на поверхні та у поперечному перерізі заготовок, що нагріваються. Використання цієї методики під час оцінювання ступеню рівномірності нагрівання металу в печах даного типу за традиційною та імпульсною схемами опалювання свідчить про переваги імпульсної схеми опалювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Губинский В.И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей / В.И.Губинский // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ.* – В 2-х томах. – Днепропетровск: Пороги. – 2005. – Т. 1. – С.149-155.
2. Бухмиров В. В. Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде / В.В.Бухмиров, С.А.Крупенников // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1999. – № 1. – С.68-70.
3. Крупенников С.А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации / С.А.Крупенников // *Известия Вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 3. – С.59-62.
4. Лисиенко В.Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах [Текст] / В.Г.Лисиенко. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с. – Библиогр.: С.220-222.
5. Арутюнов В. И. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей [Текст] / В.И.Арутюнов, В.В.Бухмиров, С.А.Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с. – Библиогр.: С.238. – ISBN 5-229-00476-2.
6. Лисиенко В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах [Текст] / В.Г.Лисиенко, В.В.Волков, А.Л.Гончаров. – Киев: Наукова думка, 1984. – 230 с. – Библиогр.: С.227-229.
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей [Текст]: учеб. пособие / Б.Ф.Зобнин, М.Д.Казяев, Б.И.Китаев и др. ; под ред. А.С.Телегина. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с. – Библиогр.: С.356-357.

Надійшла до редколегії 20.06.2012.