

УДК 504.064.4

Рябошапка Н.Є.

старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

**ПОСТАНОВКА ТА АЛГОРИТМ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ
ВНУТРІШНЬОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ НАГРІВАННЯ
ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ЗАГОТОВОК В ОБПАЛЮВАЛЬНИХ ПЕЧАХ**

Метою задачі внутрішнього теплообміну є визначення нестационарного температурного поля в камері з заготовками, футеровці бокових стінок печі,

крищі, решітці подини та максимального перепаду температур в заготовках при обпалюванні при заданих (що отримано при вирішенні зовнішньої задачі) умовах теплообміну на їх поверхнях.

При постановці задачі внутрішнього теплообміну використовували наступні припущення:

- при розрахунках температурного поля засипки знехтували тепловим опором стінок контейнера з вуглеграфітовими заготовками;
- при розрахунках перепаду температур в заготовках на границі засипка – заготовка має місце ідеальний тепловий контакт;
- має місце ідеальний контакт між поверхнями контейнера та решіткою подини печі;
- в контейнері існує стікання теплоти в об'ємі заготовок, що виникає внаслідок витрат енергії на ендотермічні реакції, які протікають в них. Це стікання враховували шляхом збільшення питомої теплоємності матеріалу заготовок на величину відповідну тепловому ефекту реакцій з урахуванням впливу температури на швидкість їх протікання;
- в початковий момент часу по об'єму футеровки та об'єму засипки з заготовками розподіл температур рівномірно; значення їх приймали значенню температури навколишнього середовища.

Математична модель внутрішнього теплообміну в процесі нагрівання вуглеграфітових заготовок в обпалювальних печах створено шляхом вирішення нестационарної задачі теплопровідності, яка складається з рівняння теплопровідності, початкових умов, межових умов на верхній поверхні контейнера, межевої умови на боковій поверхні контейнера, межевої умови на нижній поверхні контейнера.

Рівняння теплопровідності в засипці:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Рівняння теплопровідності в виробках:

$$c_{ai} \rho_{ai} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ai} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_{ai}}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (2)$$

в наступних областях: $h_i^* < z < h^{**}_i$, $0 < r < r_0$; при $i = 1, 2$.

Рівняння сполучення:

– на нижніх поверхнях виробів при $z = h_i^*$, $0 < r < r_0$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z_{z=h_i^*-0}} = \lambda_{ai} \frac{\partial T}{\partial z_{z=h_i^*+0}}, \quad i = 1, 2; \quad (3)$$

– на верхніх поверхнях виробів при $z = h^{**}_i$, $0 < r < r_0$

$$\lambda_{\text{вi}} \frac{\partial T}{\partial Z_{z=h_i^*-0}} = \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial Z_{z=h_i^*+0}}, \quad i = 1, 2; \quad (4)$$

– на бокових поверхнях виробів при $h_i^* < z < h_i^{**}$, $r = R_0$

$$\lambda_{\text{вi}} \frac{\partial T}{\partial r_{r=r_{0i}-0}} = \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r_{r=r_{0i}+0}}, \quad i = 1, 2; \quad (5)$$

– на нижній поверхні контейнера у випадку якщо його встановлено на решітку подини (поверхня не адіабатна) при $z = 0$, $0 < r < R_0$

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial Z_{z=0}} = \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial Z_{z=+0}}, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Межові умови:

– на нижній поверхні контейнера у випадку якщо його встановлено на решітку подини (поверхня адіабатна) при $z = 0$, $0 < r < R_0$

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial Z_{z=0}} = 0; \quad (7)$$

– на верхній поверхні контейнера

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial Z_{z=H_0}} = q_A; \quad (8)$$

– на боковій поверхні контейнера при $0 < z < H_0$

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r_{r=R_0}} = q_B; \quad (9)$$

де c – питома теплоємність, Дж/кг·К;

ρ – густина, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

r_0 – радіус виробу, м;

R_0 – радіус контейнера, м;

H_0 – висота контейнера, м;

T – температура, К;

t – час, с;

z та r – координати висоти та радіусу відповідно, м;

h – координата поверхні виробу по висоті, м;

індекси: i – відноситься до виробів та позначає верхній і нижній виріб відповідно; $*$ – відноситься до нижнього виробу; $**$ – відноситься до верхнього виробу;

z, v, p – засипка, виріб, подина відповідно.

Початкові умови для засипки та виробів:

$$T(z, r, 0) = T_0 \quad (10)$$

В початковий момент часу температури в об'ємі засипки та виробів розподілені рівномірно та дорівнюють температурі навколишнього середовища.

Внутрішня задача теплообміну в футеровці печі може бути представлена системою рівнянь:

– для футеровки всіх поверхней камери печі (включаючи подину та кришку) рівняння теплопровідності:

$$C_\phi \rho_\phi \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_\phi \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (11)$$

– межові умови на внутрішніх поверхнях:

$$\lambda_\phi \frac{\partial T}{\partial x_w} = q_j; \quad j = 1, 2, 3, \quad (12)$$

де q_j – густина теплового потоку на поверхнях, Вт/м²;

індекси $j = 1$ відноситься до поверхні кришки робочої камери, $j = 2$ – до бокової поверхні; $j = 3$ – до подини печі; w – значення координати x на поверхні.

Межові умови на зовнішніх поверхнях:

$$\lambda_\phi \frac{\partial T}{\partial x_w} = \alpha(T_w - T_0), \quad (13)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній поверхні футеровки, Вт/м²·К;

T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Початкові умови:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (14)$$

В початковий момент часу температура в об'ємі футеровки розподілена рівномірно та дорівнює температурі навколишнього середовища.

Систему рівнянь (1) – (10) вирішували методом розчеплення з використанням неявної різницевої схеми з урахуванням переносу теплоти за кожним з координатних напрямків для контейнера - $[z, r]$.

При вирішенні системи рівнянь (11) – (14) також використовували неявну різницеву схему з урахуванням переносу теплоти тільки в одному координатному напрямку [x] (від внутрішньої поверхні футеровки до зовнішньої).

Алгоритм розрахунку передбачав розрахунок температурного поля контейнера в дискретному часі з кроком за часом 600 с.

При цьому на кожному кроці за часом виконувалось:

- вирішення зовнішньої задачі теплообміну (розрахунок радіаційно-конвективного теплообміну в робочому просторі печі);
- вирішення внутрішньої задачі теплообміну (розрахунок переносу теплоти в контейнері та виробі);
- вирішення внутрішньої задачі теплообміну в футеровці печі;
- вирішення сполученої задачі теплообміну (погодження вирішення зовнішньої та внутрішньої задач).

Вірогідність результатів розрахунку при використанні даної математичної моделі визначали шляхом порівняння даних обчислювального експерименту з даними, які отримані в результаті прямого вимірювання температур в контрольних точках.

Порівняння результатів обчислювального експерименту з отриманими даними досліду визначило:

1. Для області заготовок в засипці:

- розбіг результатів розрахунку з дослідницькими даними протягом періодів нагрівання заготовок не перевищують 20...25 К, відносна помилка не перевищує 5 %;
- протягом періоду теплотехнічної витримки розбіг результатів досягає 40...45 К в центрі засипки (між заготовками), відносна помилка розрахунку не перевищує 6 %;
- протягом періоду теплотехнічної витримки на нижній частині засипки результати практично співпадають;
- в верхній частині засипки максимальний розбіг досягає ≈ 80 К, а відносна помилка розрахунку з урахуванням похибки вимірювання не перевищує 15 %. Це спостерігається на початку періоду прискореного нагрівання, що не являє відносною небезпеки з технологічної точки зору, тому що основні процеси формування структури матеріалу заготовки (вуглеграфіту) вже практично завершені. Наприкінці періоду прискореного нагрівання розрахункові та дослідницькі дані практично співпадають.

Дане порівняння дозволяє заключити, що розроблена модель цілком адекватно описує процес нагрівання заготовок за умови їх розташування по висі контейнера, при товщині засипки над поверхнею заготовки не менш 300 мм.

2. Для області засипки, що розташована у боковій поверхні контейнера максимальний розбіг результатів обчислювального експерименту з дослідницькими даними (до ≈ 80 К) спостерігається протягом всього процесу обпалювання, а відносна помилка розрахунків не перевищує 20 %. Ці відхилення за вище вказаними причинами не є небезпечними з технологічної точки зору.