

*А. Я. КАРВАЦЬКИЙ*, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Київ;

*І. Л. ШИЛОВИЧ*, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;

*Л. В. КРУТОУС*, студентка, НТУУ «КПІ», Київ;

*С. В. КУТУЗОВ*, ген. директор ПАО «Укрграфіт», Запоріжжя

## **ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ СО В ПРОЦЕСІ ВИПАЛУ ГРАФІТОВИХ ЗАГОТОВОК**

Проведені розрахунки температурних полів камер печі з заготовками для визначення впливу фізичного бар'єру на кількість моно оксиду вуглецю, що утворюється в процесі випалу графітових заготовок.

**Ключові слова:** температурні поля, моно оксид вуглецю, випал графітових заготовок, шамотна цегла.

### **Вступ**

Серед технологічних операцій виготовлення електродної продукції найбільш важливою є випал, оскільки на цій стадії відбувається формування структури та основних властивостей матеріалу електродів.

Операція випалу полягає в перетворенні зв'язувальної речовини (кам'яновугільний пек) в кокс. Це перетворення відбувається в результаті термічної обробки компонентів до температури 1000-1200°C. Спресовані електроди є блоком, що складається з дрібних частинок різних вуглецевих матеріалів, з'єднаних вугільним пеком. При нагріванні пек набуває нової властивості - перетворюється на кокс. Таким чином створюються коксові ґрати, які додають виробу міцність і одночасно додають йому ряд важливих фізичних властивостей. Формування властивостей і структури вуглекоксопеківих систем визначається багатьма факторами: умовами випалу, властивостями наповнювача, властивостями зв'язувальної речовини і ще рядом технологічних та фізико-хімічних особливостей. Треба зазначити, що при випалі властивості наповнювача в основному зберігаються, а речовина, що зв'язує (вугільний пек) зазнає глибоких якісних і структурних змін [1].

Випал відбувається у багатокамерних кільцевих печах з певним часовим циклом теплової обробки заготовок. Згідно технології випалу заготовки розташовуються у камерах печі, засипаються вуглецевим матеріалом для запобігання контакту з нагрівальним агентом, що являє собою повітряно-газову суміш і проходять нагрівання за заздалегідь визначеним часовим регламентом. У процесі випалу підтримуються режимні параметри спалювання природного газу (джерелом виділення теплоти у камерах печі), температурний та аеродинамічний регламент роботи камер печі. Наразі однією з головних технологічних та екологічних проблем при роботі печі є утворення у значних кількостях монооксиду вуглецю, що визначає необхідність розробки певних технічних рішень щодо скорочення викидів СО з камер печі.

### **Мета роботи**

З аналізу роботи камер печі випалу витікає, що створення фізичного бар'єру між вуглецевими матеріалами та потоком повітряно-газового нагрівального агента суттєво зменшить можливості окислення вуглецевих матеріалів у печі і, таким чином, буде сприяти зменшенню утворення шкідливих викидів моно оксиду вуглецю. З цією метою запропоновано перекивати поверхню камер шаром (або шарами) шамотної цегли. Із сказаного витікає постановка задачі дослідження: на основі математичної моделі [2] розробити алгоритм розв'язку, для отримання температурних полів камер з заготовками, з метою аналізу розподілу температур в камері з використанням цеглового укриття та без нього.

Метою цієї роботи є розробка методу, який дозволяє зменшити кількість CO, що утворюється в процесі випалу графітових заготовок. Цей метод не повинен впливати на тепловий регламент багатоканальної печі випалу.

Відомо з літератури [4], що використання укріплень з шамотної цегли, в якості захисного матеріалу від окиснення, дозволяє знизити кількість викидів CO в атмосферу. Авторами [4] в експериментальних дослідженнях встановлено, що створення захисного шару з шамотної цегли дозволило зменшити концентрацію CO у димових газах за печами графітації з 2000 мг/м<sup>3</sup> до (500...700) мг/м<sup>3</sup>.

### Методика експериментів

Для твердих елементів печі рівняння енергії (теплопровідності) має вид:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_{\text{volat}} \quad (1)$$

При цьому теплопровідність пересипки приймається ефективною величиною  $-\lambda_{\text{eff}}$ , а в  $q_{\text{volat}}$  (Вт/м<sup>3</sup>) – враховуються теплота утворення летючих в заготовках.

Аналіз горіння метану у печі ґрунтується на припущенні повного згорання природного газу до CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>O. Тоді рівняння хімічної реакції горіння буде мати вид:



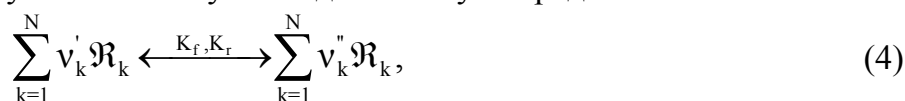
Реакція (2) визначається стехіометричними коефіцієнтами і миттєвими термодинамічними параметрами, від яких залежить її швидкість. Турбулентне змішування реагентів є фактором, що обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія при горінні природного газу описується за допомогою двох моделей: перша – модель обмеженої швидкості реакції на основі закону Ареніуса; друга – модель вихрової дисипації (Магнусена) [3]. В результаті використовується менше з отриманих значень по швидкості реакції.

Джерело k-ої компоненти хімічної реакції (2) у відповідності з моделлю обмеженої швидкості реакції визначається як:

$$\bar{\omega}_k = W_k Q_k, \quad (3)$$

де  $W_k$  - молекулярна вага компоненти, кг/моль;  $Q_k$  - молярна швидкість утворення/розкладання компонентів реакції, моль/(м<sup>3</sup>·с).

Реакція горіння (1.2) в узагальненому вигляді може бути представлена як:



де  $\nu_k', \nu_k''$  - стехіометричні коефіцієнти k-го реагенту і продукту реакції, відповідно;  $\mathcal{R}_k$  - символ, який визначає k-у компоненту;  $K_f, K_r$  - константа швидкості прямої і зворотної реакції, відповідно, 1/с.

Молярна швидкість розкладу компонентів прямої реакції визначається як:

$$Q_k = \nu_k \left( K_f \prod_{j=1}^N [X_j]^{\nu_j'} - K_r \prod_{j=1}^N [X_j]^{\nu_j''} \right), \quad (5)$$

де  $\nu_k = \nu_k'' - \nu_k'$ ;  $[X_j] = \rho Y_j / W_j = \rho_j / W_j$  - молярна концентрація j-го компоненти, моль/м<sup>3</sup>.

Константа швидкості прямої реакції горіння визначається із закону Ареніуса [5]:

$$K_f = A \exp \left[ -\frac{E}{RT} \right], \quad (6)$$

де  $A = B T^\alpha$  - частотний фактор, 1/с;  $B, \alpha$  - постійні реакції;  $E$  - енергія активації, Дж/моль.

Константа швидкості зворотної реакції визначається через  $K_r$ :

$$K_r = K_f \left[ \left( \frac{p_a}{RT} \right)^{\sum_{k=1}^N \nu_k} \exp \left( \frac{\Delta s^0}{R} - \frac{\Delta h^0}{RT} \right) \right]^{-1},$$

де  $p_a = 1$  бар;  $\Delta s^0, \Delta h^0$  - зміна мольної ентропії (Дж/(моль · К)) і ентальпії (Дж/моль) реакції, відповідно.

Молярна швидкість розкладання компонентів прямої реакції у відповідності з моделлю вихрової дисипації визначається як:

$$Q_k = \nu'_k W_k A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{\nu'_k W_R} \right), \quad (7)$$

$$Q_k = \nu'_k W_k A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_{j=1}^N (\nu_j'' W_j)}, \quad (8)$$

де  $A=4$ ,  $B=0,5$  – емпіричні константи Магнусена для реагентів і продуктів реакції, відповідно; індекси  $R, P$  – відносяться до реагентів і продуктів реакції, відповідно.

У рівняннях (7), (8) швидкість реакції визначається масштабом часу змішування великих вихорів і відношенням  $k / \varepsilon$  як в моделі Сполдінга.

Початкові умови:

$$\begin{cases} T(X) = T_0; \\ \mathbf{V}(X) = 0; \\ Y_k(X) = Y_{0k}, k = \overline{1, N}; \\ k(X) = k_0; \\ \varepsilon(X) = \varepsilon, \end{cases} \quad (9)$$

де  $X(x, y, z) \in \Omega$  - декартові координати,  $m$ ;  $\Omega$  - розрахункова область.

Граничні умови (ГУ):

На вході природного газу (10) і окислювача (гази з попередньої камери 11) **Ошибка!**  
**Источник ссылки не найден.** і на виході із камери печі (12)

$$\begin{cases} G = G_{\text{inlet-g}}; \\ Y_{\text{CH}_4} = Y_{\text{CH}_4\text{-inlet}}; \\ T = T_{\text{inlet-g}}; \\ k = k_{\text{inlet-g}}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{inlet-g}}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G = G_{\text{inlet-oxid}}; \\ Y_{\text{O}_2} = Y_{\text{O}_2\text{-inlet}}; \\ T = T_{\text{inlet-oxid}}; \\ k = k_{\text{inlet-oxid}}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{inlet-oxid}}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{\text{outlet}} = 0; \\ Y_{\text{O}_2} = Y_{\text{O}_2\text{-outlet}}; \\ T = T_{\text{outlet}}; \\ k = k_{\text{outlet}}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{outlet}}, \end{cases} \quad (12)$$

де  $G$  - масові витрати, кг/с;

- на границях контакту твердих елементів конструкції печі (абсолютний контакт) (13), газовий тракт печі – канали печі (14) і огороження печі з оточуючим середовищем (15)

$$\begin{cases} \{T\}=0; \\ \{n\cdot q\}=0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} V=0; \\ \{T\}=0; \\ \{n\cdot q=q_r\}=0, \end{cases} \quad (14)$$

$$n \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha_{\text{eff}}(T)(T - T_{\text{env.sp}}), \quad (15)$$

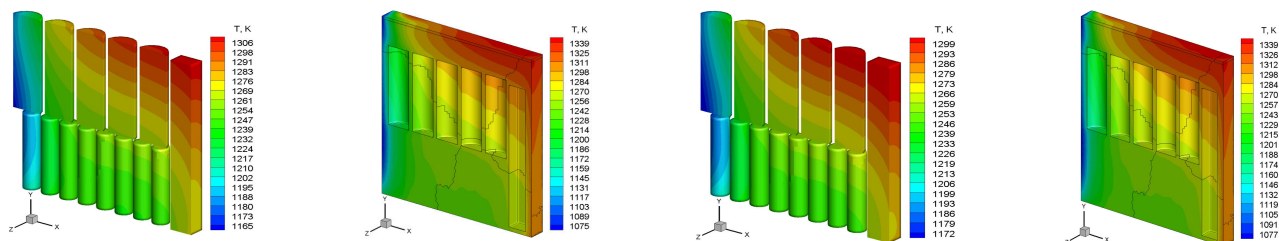
де  $\{T\}=T^+ - T^-$ ;  $\{n \cdot q\} = n^+ \cdot q^+ - n^- \cdot q^-$ ;  $q = -\lambda \nabla T$  - вектор густини теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $n$  - вектор нормалі до поверхні контакту;  $q_r$  - вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{eff}}$  - ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_{\text{env.sp}}$  - температура оточуючого середовища, К.

### Обговорення результатів

Результати розрахунків показані нижче у вигляді температурних полів камер з заготовками (рис.).

З аналізу отриманих результатів можна сказати, що наявність бар'єру з шамотної цегли [4] несуттєво вплинула на температуру випалу заготовок. Максимальне пониження температури, зафіксоване при розрахунках досягає 7 °С.

Отримані результати свідчать про те, що і на аеродинамічний режим укриття не вплинуло.



з цегловим укриттям      з цегловим укриттям      без цеглового укриття      без цеглового укриття

Рис. - Температурні поля камер з заготовками з цегловим укриттям та без нього

### Висновки

1. Виконані розрахунки температурних полів камер печі випалу заготовок графітових електродів без укриття верху камер випалу і з укриттям з шамотної цегли.

2. Чисельне моделювання процесу випалу заготовок графітових електродів у камерній печі показало, що наявність бар'єру з шамотної цегли несуттєво впливає на температуру випалу заготовок і аеродинамічний режим роботи камер печі випалу.

3. Відмінність рівня температур у досліджених варіантах випалу (з укриттям та без укриття) становить не більше 7 °С.

4. Очікуване зниження концентрації викидів монооксиду вуглецю становить сумарно від максимальної (~2,1 г/м<sup>3</sup>) до менше ніж (1...1,5) мг/м<sup>3</sup>.

5. Отримані результати можуть бути впроваджені у виробництво для досягнення технологічного та екологічного ефектів.

**Список літератури:** 1. Санников А. К. Производство электродной продукции / Санников А. К., Сомов А. Б., Ключников В.В. и др. — М. : Металлургия, 1985. — 129 с. 2. Карвацький А. Я. Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатокамерної печі при випалюванні електродних заготовок /

Карвацький А. Я., Пулінець І. В., Шилович І. Л // Восточно-Европейский журнал передових технологий. — 2012. - №1/4(55). — С.33 — 37. 3. Magnussen B. F. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion [Текст] / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute. - Pittsburgh, 1976 - P. 719-727 4. Аленькин Д. Я. Пути повышения экологических характеристик процесса графитации / Аленькин Д. Я., Распопов М. Г., Власова Т. Б. // Технологические процессы и оборудование электродного производства: Сб. науч. тр. / НИИграфит, ГОСНИИЭП. – М., 1989. – 77-81с.

Надійшла до редколегії 20.12.2012

УДК 66.094.3

**Зниження концентрації со в процесі випалу графітових заготовок/ Карвацький А. Я. Шилович І. Л., Крутоус Л. В., Кутузов С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2012. - № 68 (974). – С. 201-205. – Бібліогр.: 4 назв.**

Проведены расчеты температурных полей камер печи с заготовками для определения влияния физического барьера на количество моно оксида углерода, образующегося в процессе обжига графитовых заготовок.

**Ключевые слова:** температурные поля, моно оксид углерода, обжиг графитовых заготовок, шамотный кирпич.

It was done calculations of temperature fields of cameras of the furnace with workpieces for definition of influence of a physical barrier on amount of mono oxide of the carbon which is formed in the process of graphite workpieces annealing are carried out. names.

**Keywords:** temperature fields, mono oxide of carbon, annealing of graphite workpieces, firebrick.

УДК 536.24

**Ю. О. КОБРИНОВИЧ**, аспирант, ИПМаш НАН України, Харків

### **ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНО-РАЗНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ТЕПЛООБМЕНОМ**

Математические модели построены на базе совместного применения регионально-структурного или структурного методов, S-функций и разностных схем высокого порядка точности.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, высокоскоростные тепловые процессы, структурно-разностные модели.

**Введение.** Решение задач теплопроводности с нестационарными граничными условиями для областей сложной формы в случае высокоскоростных тепловых процессов встречает ряд трудностей принципиального характера и у численных методов, и у аналитических методов.

При решении нестационарных задач теплопроводности с помощью численных методов, усилия аппроксимации направлены одновременно на приближенное удовлетворение дифференциальному уравнению, осциллирующим граничным условиям и осциллирующим внутренним источникам (стокам) энергии. Результирующая погрешность для задач с высокими скоростями теплообмена оказывается выше предельно допустимой, что ограничивает область применения численных методов для разностных схем второго порядка точности задачами теплопроводности с медленно протекающими процессами.

Получить точные решения классическими аналитическими методами можно получить только для отдельных задач теплопроводности в случаях когда области исследования имеют каноническую форму.

Актуальной оказывается разработка численно-аналитических подходов к задачам теплопроводности с высокоскоростными нестационарными граничными условиями, которые позволяли бы решать соответствующие задачи с высокой степенью точности, и не были ограничены ни по градиенту температур по времени и координатам, ни по скорости и

© Ю. О. КОБРИНОВИЧ, 2012

характеру изменения нестационарных граничных условий.