

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 685.5.011

Зінченко В.Ю.

Запорізька державна інженерна академія

Іванов В.І.

Запорізька державна інженерна академія

Нестеренко Т.М.

Запорізька державна інженерна академія

Чепрасов О.І.

Запорізька державна інженерна академія

Каюков Ю.М.

Запорізька державна інженерна академія

ПРО УПРАВЛІННЯ СТАДІЙНИМ СПАЛЮВАННЯМ ПАЛИВА В МЕТОДИЧНИХ ПЕЧАХ

У статті з'ясовано причини обмеженого використання методу стадійного спалювання палива в методичних печах. Визначено вплив розподілу тиску в печі на можливість застосування зазначеного методу опалення. Розроблено метод стабілізації значення тиску в методичній печі на заданому рівні під час нагрівання металу комбінуванням складу змішаної паливної суміші. Запропоновано систему автоматичного управління тепловим навантаженням і тиском у робочому об'ємі методичної печі. Застосування такої системи дасть змогу забезпечити задані значення температури й тиску в кожній зоні печі за змінним тепловим навантаженням, а також мінімізувати теплообмін з довкіллям.

Ключові слова: методична піч, стадійне спалювання, змішана паливна суміш, комбінування її складу, управління.

Постановка проблеми. Найбільш перспективним застосуванням стадійного спалювання газоподібного палива в металургійній галузі є його використання в прокатних цехах під час опалювання нагрівальних печей [1, с. 64]. Упровадження пошарово-методичного режиму стадійного спалювання палива в печах зазначеного типу допомагає зменшити окиснення металу, знизити викиди оксидів азоту до атмосфери, а також підвищити якість поверхні прокату.

Стадійний режим спалювання газоподібного палива неодноразово випробовували в методичних печах традиційної конструкції. Проте така технологія опалювання не набула значного поширення через недосконалість роботи системи автоматичного управління, насамперед режимом тиску, що призводить до загазованості довкілля через потрапляння монооксиду вуглецю до атмосфери під час виштовхування пічних газів з робо-

чого об'єму печі. Найчастіше зазначений недолік проявляється в разі зниження темпу прокатки, за наявності вимушених простоїв обладнання, а також витримки в печі вже прогрітих слябів. Під час зниження теплового навантаження в печі система автоматичного управління неспроможна повністю стабілізувати тиск у її робочому об'ємі, а також виключити газообмін з довкіллям.

Вирішення такої проблеми під час простоїв печі здійснюють за рахунок застосування водяної пари, яку подають у канали пальників разом з газоповітряною сумішшю, а також змінювання конструкції методичних печей, зокрема герметизації робочих камер за допомогою додаткових кожухів тощо.

Постановка завдання. Відомо, що газообмін робочої камери методичної печі з довкіллям визначається насамперед значенням надлишкового статичного тиску в її робочому об'ємі. Так, викиди

пічних газів і потрапляння оксиду вуглецю на робочі місця обслуговуючого персоналу є за наявності позитивного тиску в робочому об'ємі печі. Розподіл тиску за довжиною печі визначається за інших рівних умов значенням об'ємної витрати нагрівальних газів, а його значення змінюється в процесі змінювання теплового навантаження печі. Водночас характер руху нагрівальних газів і розподіл тиску в робочому об'ємі печі визначається динамічною дією струменів, що витікають із пальників. У ділянках, що є прилеглими до вихідних отворів пальників, створюються зони розрідження, а в місцях, де відбуваються удари струменів об поверхню кладки печі та садки металу, тиск пічних газів підвищується. Неоднорідність розподілу тиску в робочому об'ємі печі, яка зумовлена динамічною дією струменів пічних газів, накладається на розподіл тиску, що пов'язаний з неоднорідним полем температури в печі.

Завданням системи автоматичного регулювання є підтримка нульового надлишкового тиску на заданому рівні. Відомо, що камери методичних печей є взаємопов'язаними, тому змінювання значення тиску в робочому об'ємі однієї з них впливає на його розподіл щодо всієї печі. З огляду на це, потрібно вирішити проблему забезпечення автономності управління гідродинамічним режимом у різних зонах печі.

Очевидно, що газообмін у печі можна мінімізувати тільки шляхом вибирання та забезпечення протягом усієї її роботи оптимального розподілу статичного тиску в робочому об'ємі, що забезпечує як найменше виштовхування пічних газів, так і мінімальне підсмоктування холодного атмосферного повітря. Першу частину проблеми переважно вирішують застосуванням фізичного моделювання процесу та подальшою перевіркою під час дослідно-промислової експлуатації, другу частину – шляхом оперативного управління режимом опалювання.

Завданням запропонованої роботи є вибір та обґрунтування методу управління стадійним спалюванням палива, що забезпечує стабілізацію тиску в різних зонах печі під час змінювання її теплового навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вирішення поставленої проблеми можливе лише за схемами опалювання з управлінням об'ємом продуктів горіння. Відомим є метод опалювання печі [2], за яким змінювання теплової потужності виконують шляхом комбінування декількох видів паливних газів, коли за різних теплових навантажень печі об'єм продуктів горіння залишається постійним.

Щодо методичних печей стадійне спалювання можна реалізувати в процесі спалювання газоподібного палива в зонах томління й зварювання з коефіцієнтом витрати первинного повітря $\alpha_1 < 1$ та отриманням горючої суміші, що складається з продуктів неповного горіння, а також подальшого допалювання зазначеної суміші в методичній зоні з використанням додаткового вторинного повітря (або кисню), коефіцієнт витрати якого становить $\alpha_{II} > 1$.

Управління процесом стадійного спалювання передбачає змінювання теплового навантаження печі впродовж часу, що забезпечує задану температуру $T_{3,i}$ в її зонах, а також об'ємної витрати продуктів горіння, за якою розподіл статичного тиску в об'ємі окремих зон відповідає реалізації заданого коефіцієнта витрати повітря α_{II} , коли спалювання палива завершується в межах робочого об'єму печі.

Якщо припустити, що кількість теплоти, яку виділяють паливні гази з теплою згорання $[Q_H^p]_k$ під час їх спалювання, через нестачу первинного повітря зменшується в α_1 разів, то кількість теплоти, яку вводять до камери змішаною паливною сумішшю, можна подати у вигляді:

$$\sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot B_{\text{пал},k} \cdot [Q_H^p]_k + Q_{\text{пал}} + Q_{\text{пов}} = Q_i(T_{3,i}), \quad (1)$$

де $B_{\text{пал},k}$ – витрата k -го палива, що спалюють в i -ій зоні; $Q_{\text{пал}}$, $Q_{\text{пов}}$ – фізична теплота газоподібного палива та повітря відповідно.

За умови відсутності виштовхування пічних газів і підсмоктування холодного атмосферного повітря до робочого об'єму печі рівноважну температуру в її зонах $T_{3,i}$ можна обчислити за рівнянням теплового балансу для кожної зони:

$$Q_{i-1,i} + \sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot B_{\text{пал},k} \cdot [Q_H^p]_k + Q_{\text{пал}} + Q_{\text{пов}} = \\ = \alpha_{i,\Sigma} \cdot F_{\text{п},i} \cdot (T_{3,i} - T_{\text{п}}) + Q_{i,i+1} + Q_{\text{втр}}, \quad (2)$$

де $Q_{i-1,i}$, $Q_{i,i+1}$ – відповідно теплота, що передають пічні гази до i -ої зони з попередньої ($i-1$)-ої зони, і теплота, яку передають пічні гази з i -ої зони до наступної ($i+1$)-ої зони відповідно; $k = 1, 2 \dots m$, $i = 1, 2 \dots n$; $\alpha_{i,\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі в i -ій зоні; $F_{\text{п},i}$, $T_{\text{п}}$ – поверхня металу, що сприймає теплоту, і температура його поверхні в i -ій зоні відповідно; $Q_{\text{втр}}$ – втрати теплоти в i -ій зоні.

Об'ємні витрати продуктів горіння $V(P_i)$, які прямують через робочий об'єм i -ої зони печі та визначають надлишковий статичний тиск у ній, можна визначити за рівнянням матеріального балансу:

$$V_{i-1} + \sum_{k=1}^m \alpha_1 \cdot B_{\text{пал},k} \cdot L_{\text{пов},k}^1 = V(P_i), \quad (3)$$

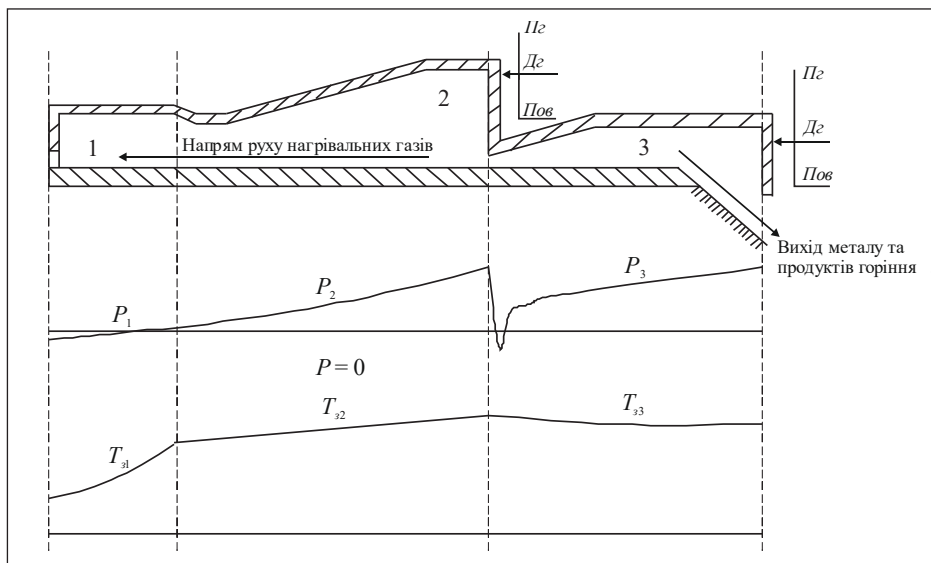


Рис. 1. Схема типової тризонної методичної печі, режими тиску й температури

де V_{i-1} – об’ємна втрата пічних газів у неопалювальній зоні.

Витрату повітря $L_{пов,i}^I$, що потрібно для реалізації першої стадії спалювання палива в i -ій зоні печі, визначають як

$$L_{пов,i}^I = \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot L_{0,k} \cdot B_{пал,i,k}, \quad (4)$$

де $L_{0,k}$ – теоретичний об’єм повітря, що потрібно для спалювання одиниці k -го палива.

За відсутності лінійної залежності між $[Q_n^p]_k$ і $V_{пов,i,k}$ під час розв’язання системи рівнянь (1) і (3) можна визначити комбінацію витрат паливних газів на управління температурою $Q_i(T_{з,i})$ і тиском $V(P_i)$.

Якщо $k = 2$, то розв’язання системи зазначених рівнянь є єдиним, якщо $k > 2$, то існує безліч вирішень. За допомогою методу лінійного програмування можна мінімізувати поточну вартість опалювання [2]. У роботі В.Ю. Зінченко [3, с. 23] показано, що цей метод управління можна застосовувати для паливних газів з різною природою горючих компонентів.

На другій стадії спалювання палива повітря (або кисень) подають до робочого об’єму печі через спеціальні сопла залежно від умісту горючих компонентів у продуктах горіння газів. Стехіометрично необхідні витрати повітря на другій стадії спалювання можна визначити з використанням рівняння:

$$L_{пов,i}^{II} = \sum L_{0,k} \cdot B_{пов,k} \cdot (1 - \alpha_k). \quad (5)$$

Фактично поточні витрати повітря залежать від α_k й умов перемішування повітря з продуктами горіння газів.

Управління витратою повітря на другій стадії можливе згідно з рівнянням (4) за умови коригування вмісту кисню в продуктах горіння на виході з печі.

Приклад функціональної реалізації методу управління. Розглянуто стадійне опалювання тризонної методичної печі сумішшю природного та доменного газів.

Рациональний режим розподілу статичного тиску в робочому об’ємі зазначеної печі задавали за результатами математичного моделювання як значення тиску в кожній із зон P_1, P_2, P_3 , а триступеневий режим температури в зонах – як $T_{з1}, T_{з2}, T_{з3}$.

Підведення природного та доменного газів до печі виконують окремо, а їх комбінування і змішування – безпосередньо перед подаванням до пальників.

На рис. 1 наведено подовжній переріз тризонної методичної печі. Пальники встановлено в торцевих стінках робочих камер. Змінювання швидкості течії пічних газів за довжиною робочих камер у процесі змінного подавання палива зумовлює несталий розподіл тиску в зонах печі, водночас можливим є підсмоктування холодного повітря, а також розрідження в зоні розташування пальників.

У такому разі рівняння (1) і (2) можуть бути подані у вигляді системи рівнянь для кожної опалювальної зони печі:

$$\begin{cases} \alpha_{i_1} \cdot B_{пр,i_1} \cdot [Q_n^p]_{пр} + \alpha_{i_2} \cdot B_{дг,i_2} \cdot [Q_n^p]_{дг} = Q_i(T_{з_i}), \\ \alpha_{i_1} \cdot B_{пр,i_1} \cdot V_{пр} + \alpha_{i_2} \cdot B_{дг,i_2} \cdot V_{дг} = V(P_i). \end{cases} \quad (6)$$

За режимом опалювання з постійним об’ємом $V(P_i)$ можна забезпечити змінювання тепло-

вого навантаження від максимального значення $Q_i(T_{3,i})_{\max}$ до мінімального $Q_i(T_{3,i})_{\min}$ відповідно до співвідношення [4, с. 41]:

$$U = \frac{Q_i(T_{3,i})_{\max}}{Q_i(T_{3,i})_{\min}} = \frac{[Q_H^p]_{нз}}{[Q_H^p]_{дз}} \cdot \frac{V_{дз}}{V_{нз}} \quad (7)$$

За $[Q_H^p]_{нз} = 33495$ кДж/м³ і $[Q_H^p]_{дз} = 3350$ кДж/м³ отримують $U = 1,5$.

Аналогічне співвідношення можна використувати під час управління значенням тиску в зонах за постійним тепловим навантаженням. Розширення діапазону регулювання можливе під час застосування третього паливного газу або водяної пари.

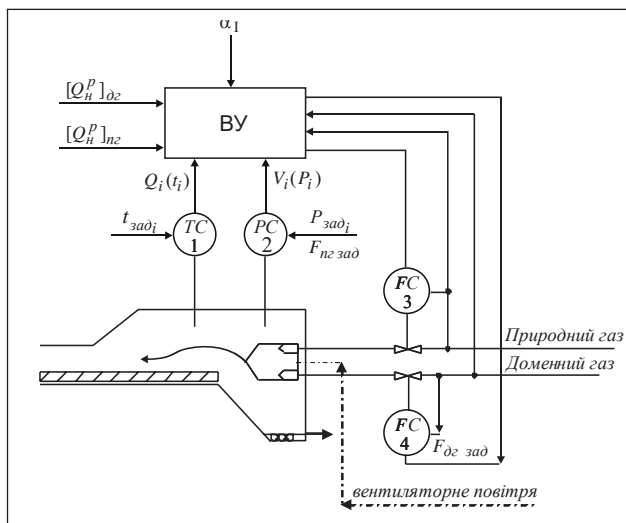


Рис. 2. Спрощена функціональна схема взаємопов'язаного каскадного управління тепловим навантаженням і тиском у методичній печі

На рис. 2 зображено спрощену функціональну схему взаємопов'язаного каскадного управління значенням теплового навантаження й тиску в одній із опалювальних камер методичної печі.

Регулятори температури 1 і тиску 2, залежно від відхилення регульованої величини щодо заданого

значення $T_{\text{зад},i}$ і $P_{\text{зад},i}$, формують дії $Q(t_i)$ і $V(P_i)$, які управляють. Обчислювальний пристрій, використовуючи рівняння (1) і (2), здійснює коригування завдання регуляторам витрати природного $F_{\text{пр зад}}$ (3) та доменного $F_{\text{д зад}}$ (4) газів. Виходячи з того, що об'єктами управління для регуляторів витрати 3 й 4 є ділянки трубопроводів, які розміщено між точками вимірювання та дроселювання, зазначені регулятори реалізують прості інтегральний або пропорційний закони регулювання. Регулювання горіння палива можна виконувати або типовими схемами співвідношення «паливо-повітря», або за допомогою спарованих дроселів, але з урахуванням того, що $\alpha_1 < 1$.

Загальна схема регулювання тиску в робочому об'ємі печі є типовою схемою управління з дією на положення загального шибера в збірному борві. Водночас змінюється положення поверхні нульового тиску, а регулятор 2 виконує його коригування до необхідного значення в кожній зоні.

Реалізацію системи загалом здійснюють на типових мікропроцесорних засобах управління з можливістю включення до АСУ ТП нагрівання металу.

Завдання зонним регуляторам температури й тиску для кожного режиму роботи встановлюють залежно від інформації про перебіг процесу та тепловий стан металу, що нагрівають.

Висновки. Метод стадійного спалювання газоподібного палива в методичних печах з роздільним подаванням паливних газів і комбінуванням їх безпосередньо в процесі спалювання дає змогу підтримувати потрібний рівень температури й тиску в кожній зоні печі за змінним її тепловим навантаженням. Розроблено систему автоматичного управління тепловим навантаженням і тиском у робочому об'ємі методичної печі, що допоможе забезпечити її раціональний гідравлічний режим і мінімізувати газообмін з довкіллям.

Список літератури:

1. Шульц Л.А. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии. Известия вузов. Серия «Черная металлургия». 2005. № 10. С. 62–69.
2. Патент України № 16114. UA МПК F 23 C 99/00. Спосіб опалення камерних газових печей / М.П. Ревун, В.Ю. Зінченко, О.П. Лютий та ін. Запорізька державна інженерна академія. Заява 27.02.2006. Зареєстр. ДРПУ 17.07.2006. Бюл. № 7.
3. Особенности стадийного сжигания топлива в пламенных печах камерного типа / В.Ю. Зинченко, В.И. Иванов, А.И. Чепрасов, Ю.Н. Каюков. Теплотехника, энергетика и экология в металлургии: труды Междунар. конф. 10.12.2017. Днепропетровск: НМетАУ, 2017. Кн. 2: Новая идеология. С. 21–25.
4. Управление стадийным спалюванням палива у методичних печах / В.Ю. Зінченко, В.І. Іванов, О.І. Чепрасов, В.К. Тарасов. Альянс наук: вчений вченому: зб. наук. праць XII Міжнар. науково-практ. конф. Дніпро. 26–27.02.2018. Дніпропетровськ: Вид. Біла К.О., 2018. С. 39–42.

ОБ УПРАВЛЕНИИ СТАДИЙНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

В статье уточнены причины ограниченного использования метода стадийного сжигания топлива в методических печах. Определено влияние распределения давления в рабочем объеме печи на возможность применения указанного метода отопления. Разработан способ стабилизации на заданном уровне давления в рабочем объеме методической печи при нагреве металла комбинированием состава смешанной топливной смеси. Предложена система автоматического управления тепловой нагрузкой и давлением в рабочем объеме методической печи. Применение такой системы позволяет обеспечить заданные значения температуры и давления в каждой зоне печи при переменной тепловой нагрузке, а также минимизировать теплообмен с окружающей средой.

Ключевые слова: методическая печь, стадийное сжигание, смешанная топливная смесь, комбинирование ее состава, управление.

ABOUT THE CONTROL OF STAGED FUEL COMBUSTION IN METHODOICAL FURNACES

There are corrected the reasons of the limited application for stage fuel combustion method in methodical furnaces. There is determined influence of pressure distribution in furnace on possibility of the mentioned method of heating use. There is worked out the method of pressure stabilizing in methodical furnace at set level at metal heating by the combining composition mixed fuel mixture. The system of automatic control by thermal load and pressure in the working volume of continuous furnace is offered. Application of such system allows to provide the set temperature and pressure in every zone of methodical furnace at the variable thermal load and also to minimize a heat exchange with an environment.

Key words: methodical furnace, stage fuel combustion, mixed fuel mixture, combining of its composition, control.