

УДК 669.041

М.П. Ревун, професор, д.т.н.

В.Ю. Зінченко, доцент, к.т.н.

В.І. Іванов, ст. наук. співробітник

О.І. Чепрасов, професор, к.т.н.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТАДІЙНОГО РЕЖИМУ ОПАЛЮВАННЯ ПОЛУМЕНЕВИХ ТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ КАМЕРНОГО ТИПУ

*Запорізька державна інженерна академія*

Изучены особенности неполного горения газообразного топлива на первой стадии его сжигания в пламенных термических печах камерного типа. Зафиксировано возрастание температуры продуктов горения на второй стадии сжигания при обеспечении однородного поля температуры в рабочем объеме данных печей.

Ключевые слова: термическая печь камерного типа, сжигание топлива, стадийный режим, его особенности

Вивчено особливості неповного горіння газоподібного палива на першій стадії його спалювання у полуменевих термічних печах камерного типу. Зафіксовано зростання температури продуктів горіння на другій стадії спалювання за забезпеченням однорідного полю температури у робочому обсязі даних печей.

Ключові слова: термічна піч камерного типу, спалювання палива, стадійний режим, його особливості

The features of the incomplete burning of gaseous fuel on the first stage of its combustion in the flaming thermal furnaces of chamber type have been studied. Increase of temperature of burning products on the second stage at combustion securing of homogenisative field of temperature in work volume of these furnaces has been fixed.

Keywords: thermal furnace of chamber type, combustion of fuel, stage regime, its features

*Актуальність проблеми.* За умов безперервно-го зростання вартості енергоносіїв актуальним стає завдання економії природного газу в металургійній промисловості, де головними споживачами слугують полуменеві термічні печі камерного типу. Такий стан спричинює необхідність появи нових вирішень щодо опалювання зазначених печей, які б дозволили оптимізувати зовнішній теплообмін у їх робочому обсязі [1], як з позиції підвищення рівномірності нагрівання металу, так і економії енергетичних ресурсів.

*Аналіз публікацій.* З середини ХХ століття у топках котельних установок успішно застосовують стадійне спалювання газоподібного палива [2], для якого характерними є штучний розподіл процесу горіння із послідовним спалюванням частин палива у конструктивно або газодинамічно розділених зонах.

Надалі стадійне спалювання палива почали використовувати у нагрівальних печах металургійної промисловості для створення у робочому обсязі мало- або безокиснювальної атмосфери. Проте зниження окиснення металу менше за очікувану величину, а також додаткове забруднення робочої

атмосфери печей монооксидом вуглецю обмежують застосування даного методу.

Проблеми допалювання горючих компонентів у металургійних печах під час їх стадійного опалювання розглянуто в роботах [3,4]. Встановлена раціональність використання кисню як окислювача, що дозволить усунути втрати теплоти на нагрівання холодного азоту повітря

*Постановка завдання.* Оцінити необхідну міру неповного горіння газоподібного палива на першій стадії його спалювання у термічних печах камерного типу для забезпечення на другій стадії спалювання палива як однорідності поля температури у робочому обсязі, так і зростання температури продуктів горіння.

*Основна частина досліджень.* Стадійне спалювання палива у печах камерного типу реалізують за коефіцієнта витрати первинного повітря  $\alpha_1 < 1,0$  та наступного допалювання одержаної горючої суміші в обсязі газового потоку. Згідно до класичної теорії [5,6], Процес горіння в обсязі газового потоку за постійного тиску виконують підведенням вторинного повітря до горючої суміші та їх перемішуванням. Поширення полум'я пов'язано із хімічним реагуванням, яке супроводжується витратою початкових горючих компонентів і виділенням теплоти у середовищі, де також відбувається перенесення те-

плоти теплопровідністю та перенесення повітря – дифузією.

Продукти горіння, що одержують на першій стадії спалювання газоподібного палива розглядають, як горючі компоненти, а процес допалювання як процеси змішування зазначених компонентів із вторинним повітрям безпосередньо у робочому об'ємі печі та наступного спалювання горючої суміші. Тоді, за класифікацією Й.Д. Семікіна [7], стадійний режим можна розглядати як процес факельного спалювання з повним зовнішнім перемішуванням. У цьому разі досягають найбільшої довжини факела, що забезпечує заповнення продуктами горіння подовжного простору робочої камери полуменевої печі.

Спрямоване переміщення фронту поширення полум'я уздовж потоків продуктів горіння виконується за наявності градієнта температури та температури на початку потоку, що є достатньою для запалювання суміші горючих компонентів і повітря у зоні їх змішування під час контакту з полум'ям факела. Швидкість процесу горіння визначається перебігом процесу перемішування продуктів горіння зі свіжою порцією горючої суміші під час проникнення деякої частини продуктів горіння з фронту полум'я назустріч течії суміші.

Через те, що допалювання продуктів горіння здійснюється за нормальним поширенням полум'я для стійкого процесу горіння необхідно забезпечити концентрацію горючих компонентів у діапазоні їх займання. Для суміші природного та доменного газів основними горючими компонентами слугують метан ( $CH_4$ ) і монооксид вуглецю ( $CO$ ). Їх вміст у продуктах горіння визначають як за коефіцієнта витрати первинного повітря  $\alpha_1$ , що подають у пальники, так і коефіцієнта витрати вторинного повітря  $\alpha_2$ , якого підводять для допалювання первинних продуктів горіння. Для метану діапазон займання складає 5,6...14,5 %, для монооксиду вуглецю – 16,3...71,2 %.

Температура суміші горючих компонентів газоподібного палива та повітря після першої стадії спалювання має бути нижчою за температуру займання, що дозволяє уникнути загорання суміші в усьому об'ємі камери та, тим самим, забезпечити проходження другої стадії режиму горіння. У разі попереднього підігрівання суміші палива та повітря швидкість поширення полум'я збільшується, а її концентраційні межі поширюються. Так, за даними роботи [5], підвищення температури суміші газів до 700 °С супроводжується поширенням межі її займання до 18,75 %.

Швидкість нормального поширення полум'я для метану й монооксиду вуглецю має приблизно однакове значення та залежить від складу суміші перед допалюванням і коефіцієнта витрати вто-

ринного повітря  $\alpha_2$ . Її максимального значення для монооксиду вуглецю досягають за  $\alpha_2 < 0,60$ , а для метану – за  $\alpha_2 = 0,97$ . Таким чином, є можливим як управління швидкістю поширення полум'я факела, так і розподіленням температури уздовж потоку продуктів горіння палива, а також змінюванням коефіцієнтів витрати первинного  $\alpha_1$  та вторинного  $\alpha_2$  повітря.

Відомо, що інтенсивність дифузійного спалювання визначається якістю створення суміші палива та повітря. Так, за допалюванням стехіометричного складу суміші у ламінарному режимі її течії швидкість горіння залежить як від характеру перемішування, так і швидкості руху газового потоку. За турбулентного режиму течії суміші її перемішування відбувається інтенсивніше. Поширення горіння здійснюється як за рахунок теплопровідності, так і турбулентних пульсацій та, як наслідок, визначається гідродинамікою газового потоку. Причому, чим нижчими є теплота горіння та концентрація горючих компонентів, тим повільніше відбувається поширення полум'я.

Режим течії газового потоку за інших рівних умов залежить від витрати суміші газоподібного палива та повітря, яке визначається тепловим навантаженням печі, що є змінним протягом усього циклу термічної обробки, та супроводжується змінюванням розподілу компонентів горіння а, отже, і поля температури у робочій камері. Переміщення зони допалювання уздовж газового потоку досягають зміщенням місця уведення вторинного повітря до зони повного спалювання. Проте у міру зміщення місця його уведення у печі температура горючої суміші може виявитися значно нижчою за температуру займання. У цьому разі застосовують примусове запалювання з використанням спеціальних пристроїв. В той же час локальне уведення холодного вторинного повітря до зони допалювання призводить до ефекту охолодження, що знижує потенціал температури суміші, яку допалюють, за  $\alpha_2 \gg 1,0$ . Тому під час управління процесом необхідно здійснювати контроль та оптимізацію коефіцієнта витрати вторинного повітря  $\alpha_2$ .

Аналіз температурних умов первинного спалювання газоподібного палива, а також вторинного допалювання його горючих компонентів, виконували складанням миттєвих теплових балансів для кожної стадії режиму опалювання. При цьому приймали наступні припущення:

- горючі компоненти, які беруть участь у горінні, мають постійну теплосмність;
- спалювання палива відбувається за адиабатних умов;
- холодне повітря, що підсисають з атмосфери, не впливає на температуру первинного спалювання

палива у факелі, а лише бере участь у процесі допалювання продуктів його горіння.

Рівняння теплового балансу для першої стадії спалювання газоподібного палива має вигляд:

$$(Q)_{\alpha_1} = T_{n_2}^1 \cdot V_{\alpha_1}^1 \cdot C_{n_2}, \quad (1)$$

де  $(Q)_{\alpha_1}$  – теплота згоряння палива за коефіцієнта витрати повітря  $\alpha_1$ ;  $T_{n_2}^1$ ,  $V_{\alpha_1}^1$ ,  $C_{n_2}$  – відповідно температура продуктів горіння, об'ємна витрата та теплоємність; індекс «I» – перша стадія горіння палива за стадійного режиму його спалювання.

Зменшення температури продуктів горіння  $\Delta T_{n_2}^1$  під час неповного згоряння палива на першій стадії його спалювання визначають як

$$\Delta T_{n_2}^1 = T_{n_2}^0 - T_{n_2}^1 = \frac{(Q)_{\alpha_1=1}}{V_0 \cdot C_{n_2}} - \frac{(Q)_{\alpha_1}}{V_{\alpha_1 n_2} \cdot C}, \quad (2)$$

де індекс «0» – умова повного спалювання палива.

У термічних печах камерного типу другу стадію спалювання газоподібного палива реалізують як організованим подаванням холодного вторинного повітря через спеціальні пристрої безпосередньо до зони допалювання, так і підсисанням холодного повітря з атмосфери через спеціальні канали, що виконано у футеровці робочої камери печі.

На другій стадії спалювання палива, під час організації подавання вторинного повітря через спеціальні пристрої, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$(Q)_{\alpha_2}^{\text{II}} + T_{n_2}^1 \cdot V_{\alpha_1}^1 \cdot C_{n_2} = V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{n_2} \cdot (T_{n_2}^1 + \Delta T_{n_2}^{\text{II}}), \quad (3)$$

де  $(Q)_{\alpha_2}^{\text{II}}$  – теплота згоряння палива на другій стадії його спалювання за коефіцієнта витрати первинного повітря  $\alpha_1 < 1,0$ ,  $\Delta T_{n_2}^{\text{II}}$ ,  $V_{\alpha_2}^{\text{II}}$  – відповідно об'ємна витрата та підвищення температури продуктів горіння під час допалювання горючих компонентів; індекс «II» – друга стадія горіння палива.

За вирішенням рівняння (3) відносно  $\Delta T_{n_2}^{\text{II}}$  одержують

$$\Delta T_{n_2}^{\text{II}} = \frac{(Q)_{\alpha_1}^{\text{I}} + T_{n_2}^1 \cdot (V_{\alpha_1} \cdot C_{n_2} - V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{n_2})}{V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{n_2}}. \quad (4)$$

У разі підсисання холодного повітря до зони первинного спалювання газоподібного палива його температура, протягом проходження через робочу камеру, підвищується до рівня близького до температури продуктів горіння. Тоді рівняння теплового балансу можна записати як

$$\begin{aligned} C_{n_2} \cdot V_{\alpha_1} \cdot T_{n_2}^1 + C_n \cdot L_0^{\text{II}} \cdot \alpha_2 \cdot T_{n_2}^1 + [Q_n^p]_{n_2}^{\alpha_1} = \\ = C_{n_2} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot (T_{n_2}^1 + \Delta T_{n_2}^{\text{II}}), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $L_0^{\text{II}}$  – теоретично необхідний об'єм повітря для повного допалювання продуктів горіння;  $C_n$  – об'ємна теплоємність повітря.

Звідки

$$\Delta T_{n_2}^{\text{II}} = \frac{(Q)_{\alpha_1}^{\text{I}} + T_{n_2}^1 \cdot (V_{\alpha_1} \cdot C_{n_2} + C_n \cdot L_0^{\text{II}} \cdot \alpha_2 - V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{n_2})}{V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{n_2}}. \quad (6)$$

Розрахунки вмісту горючих компонентів у продуктах горіння, що надходять на другу стадію спалювання палива, виконують з використанням співвідношення:

$$(ГК)_{\alpha_2}^{\text{II}} = \frac{(ГК)_{\alpha_1}^{\text{I}} \cdot V_{\alpha_1}}{0,01 V_{\alpha_1}^1 \cdot \left\langle (ГК)_{\alpha_1}^{\text{I}} + \sum (HK)_{\alpha_1}^{\text{I}} \right\rangle + \alpha_2 \cdot (1 - \alpha_1)}, \quad (7)$$

де  $(ГК)_{\alpha_2}^{\text{II}}$  – вміст горючих компонентів у продуктах горіння, що надходять на другу стадію спалювання за коефіцієнта витрати повітря  $\alpha_2$ ;  $(ГК)_{\alpha_1}^{\text{I}}$ ,  $(HK)_{\alpha_1}^{\text{I}}$  – вміст горючих і негорючих компонентів у продуктах горіння після першої стадії спалювання відповідно.

Розглядали опалювання зазначених печей сумішшю природного та доменного газів із теплою згоряння 10472,5 кДж/м<sup>3</sup> [8] і складом, поданим у табл. 1.

Таблиця 1 – Склад сухих компонентів суміші газів

Вид газу	Компоненти, %							
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Природний	98,8	0,4	0,2	0,1	0,1	-	-	0,4
Доменний	0,1	-	-	-	10,7	28,5	2,5	58,2

За формулою (2) визначали зниження температури продуктів горіння на першій стадії спалювання палива  $\alpha_1$  (табл. 2).

Таблиця 2 – Зниження температури продуктів горіння на першій стадії спалювання палива,  $\Delta T_{n_2}^1$

Зниження температури продуктів горіння, °С:	Коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_1$ :				
	0,65	0,70	0,80	0,90	1,0
	497,3	482,6	340,3	182,8	-

Як впливає з аналізу розрахункових даних, на першій стадії спалювання палива під час зменшення коефіцієнта витрати повітря  $\alpha_1$  до 0,65 зниження температури продуктів горіння становить 23,3 %.

За допомогою формул (4) і (6) виконували розрахунки підвищення температури продуктів горіння  $\Delta T_{n_2}^{\text{II}}$  на другій стадії спалювання палива за різними способами підведення вторинного повітря залежно від значень  $\alpha_1$  і  $\Delta T_{n_2}^1$  (табл. 3).

**Таблиця 3** – Температура продуктів горіння на другій стадії спалювання  $\Delta T_{nc}^{II}$  залежно від температури  $\Delta T_{nc}^I$  та значень коефіцієнтів  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$

Змінювання температури продуктів горіння $\Delta T_{nc}^I$ , °С	Приріст температури продуктів горіння, $\Delta T_{nc}^{II}$ , °С, за коефіцієнта $\alpha_1$ :			
	0,65	0,70	0,80	0,90
400*	$\frac{971,6}{1086,1}$	$\frac{839,1}{759,1}$	$\frac{608,7}{676,6}$	$\frac{308,6}{340,5}$
1000*	$\frac{803,8}{1090,2}$	$\frac{719,0}{786,3}$	$\frac{533,4}{703,8}$	$\frac{284,1}{363,6}$
400**	$\frac{770,0}{918,1}$	$\frac{505,7}{655,4}$	$\frac{460,2}{528,0}$	$\frac{206,2}{236,8}$
1000**	$\frac{542,4}{912,2}$	$\frac{320,6}{570,2}$	$\frac{310,4}{480,2}$	$\frac{100,6}{176,7}$

Примітка: у чисельнику та знаменнику відповідно наведено результати розрахунків спалювання палива під час підведення вторинного повітря спеціальними каналами та підсисання атмосферного повітря.

\*, \*\* - допалювання продуктів горіння за  $\alpha_2 = 1,0$  і  $\alpha_2 = 1,2$  відповідно

На другій стадії спалювання палива зафіксовано найбільш суттєве підвищення температури продуктів горіння  $\Delta T_{nc}^{II}$  під час їх допалювання із підсисанням атмосферного повітря, оскільки у цьому

разі повітря під час перемішування із грючими горючими компонентами набирає до моменту допалювання близької до них температури.

На значення параметра  $\Delta T_{nc}^{II}$  суттєво впливає міра неповноти горіння палива: так, за  $\alpha_1 = 0,65$  його величина досягає значення 1090 °С, тоді як за  $\alpha_1 = 0,90$  – не перевищує рівня у 360 °С.

Під час подавання холодного повітря до зони допалювання з використанням спеціальних пристроїв, через його охолоджуючу дію, підвищення параметра  $\Delta T_{nc}^{II}$ , величина якого залежить від значень як коефіцієнта  $\alpha_1$ , так і температури  $\Delta T_{nc}^I$  має значно менше значення.

*Висновки.* Результатами досліджень встановлено, що рівень температури суміші горючих компонентів газоподібного палива та повітря після першої стадії спалювання має бути нижчим за температуру займання. Це дозволяє усунути можливість загоряння зазначеної суміші в усьому обсязі робочої камери термічної печі та, тим самим, забезпечити другу стадію її спалювання. Одержано формули, за допомогою яких можливо кількісно оцінити змінування температури продуктів горіння за різних умов спалювання палива у термічних печах камерного типу.

### Бібліографічний список

1. **Ольшанский, В. М.** Проблемы энергосбережения при производстве проката на металлургических предприятиях Украины [Текст] / В. М. Ольшанский // Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов Государственной металлургической академии Украины. – Днепропетровск : ГМетАУ, 1999. – Т. 2. – С. 63-66. – Библиогр.: с. 66.
2. **Шульц, Л. А.** По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии [Текст] / Л. А. Шульц // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62-69. – Библиогр.: с. 69.
3. **Арутюнов, В. А.** О температурных условиях дожигания горючих составляющих атмосферы в металлургических агрегатах [Текст] / В. А. Арутюнов, А. Я. Стамахин, А. В. Егоров // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 9. – С. 3-6. – Библиогр.: с. 6.
4. **Арутюнов, В. А.** Дожи́гание горючих компонентов атмосферы в рабочих камерах промышленных печей [Текст] / В. А. Арутюнов, А. В. Егоров, А. Я. Стамахин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 3. – С. 46-55. – Библиогр.: с. 54-55.
5. **Хзмаян, Д. М.** Теория горения и топочных устройств [Текст] : учеб. пособие / Д. М. Хзмаян, А. Я. Качан ; под ред. Д. М. Хзмаяна. – М. : Энергоатомиздат, 1960. – 350 с. – Библиогр.: с. 346-348. – 6300 экз.
6. **Щетинков, Е. С.** Физика горения газов [Текст] / Е. С. Щетинков. – М. : Наука, 1965. – 739 с. – Библиогр.: с. 727-739. – 4100 экз.
7. **Семикин, И. Д.** Топлива и топливное хозяйство металлургических заводов [Текст] : учеб. пособие / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 392 с. – Библиогр.: с. 381-384. – 3300 экз.
8. **Ревун, М. П.** Деякі аспекти стадійного спалювання газоподібного палива у термічних печах [Текст] / М. П. Ревун, В. Ю. Зінченко, В. І. Іванов та ін. // Информационные взгляды научной молодежи-2015: сб. научн. трудов по матер. междунар. научно-практ. конф. – Технические науки. 28-29.03. 2015. Одеса : НИИМФ Украины, 2015. – Т. 2. – Вып 1 (38). – С. 72-76. – Библиогр.: с. 76.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2015 р.  
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева