

ДК 669.041

**Зінченко Володимир Юрійович**, доцент, кандидат технічних наук**Іванов Віктор Ілліч**, старший науковий співробітник**Чепрасов Олександр Іванович**, професор, кандидат технічних наук**Каюков Юрій Миколайович**, доцент, кандидат технічних наук

## ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СТАДІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА У ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ ЗА РОЗДІЛЬНОЇ ПОДАЧІ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ

*Запорізька державна інженерна академія*

Розглянуто особливості стадійного сталювання природно-доменної паливної суміші у нагрівальних печах камерного типу. Обчислено параметри спалювання зазначеної суміші на різних його стадіях. Запропоновано технологічну схему управління стадійним спалюванням палива за роздільної подачі його компонентів.

Ключові слова: нагрівальна піч камерного типу, стадійне спалювання палива, параметри спалювання, роздільна подача компонентів палива, схема управління опалюванням печі

*Вступ.* До основи всіх технологій опалювання нагрівальних печей камерного типу покладено відомі положення:

- поле температури у робочій камері формується під дією спалювання палива та руху пічних газів [1];

- його однорідність забезпечують як перемішуванням пічних газів за турбулізації потоку, так і організацією розосередженого уведення повітря щодо довжини потоку.

Раціональне спалювання палива у печах даного типу є можливим під час його початкового згорання за коефіцієнта витрати первинного повітря  $\alpha_1 < 1,0$  та наступного допалювання суміші продуктів неповного горіння безпосередньо у газовому потоці [2,3].

Процес горіння у газовому потоці за постійним тиском, згідно до класичної теорії [4-6], виконується під час підведення вторинного повітря. Переміщення зазначеного процесу здійснюється передаванням теплоти теплопровідністю (дифузійною) від шару до шару та займанням у шарі, що нагрівають. Фронт полум'я переміщується у напрямі передавання теплоти зі швидкістю, яка відповідає вільному факелу із зовнішнім перемішуванням спочатку в зоні факела, а потім і в зоні дифузійного горіння.

Продукти неповного горіння палива, що одержують на першій стадії, розглядають як горючий газ, а процес допалювання – як процес змішування газу із вторинним повітрям безпосередньо у робочому об'ємі печі та наступного спалювання такої суміші. Тоді стадійний режим, згідно класифікації Й.Д. Семікіна [7], можна розглядати як факельний процес з повним зовнішнім перемішуванням. У такому разі забезпе-

чується найбільша довжина факела, що перекидає подовжній розмір робочої камери печі.

Спрямоване переміщення фронту поширення полум'я уздовж потоку продуктів горіння здійснюється за наявності градієнта температури, якщо рівень температури на початку потоку є достатнім для запалення паливо-повітряної суміші.

Температура зазначеної суміші після першої стадії спалювання має бути нижчою за температуру займання, оскільки інакше відбувається загорання суміші в усьому об'ємі та поняття швидкості поширення горіння втрачає свого сенсу.

Режим течії газового потоку за інших рівних умов визначається витратою паливно-повітряної суміші, яка безпосередньо залежить від теплового завантаження печі, що є змінним протягом усього циклу нагрівання металу, та призводить як до змінювання розподілу компонентів горіння у робочому об'ємі печі, так і поля температури.

Суть технології стадійного спалювання палива [8] полягає в організації розподіленого горіння в об'ємі робочої камери печі розосередженим уведенням повітря щодо довжини газового потоку, а також настроюванням пальників на роботу з певним коефіцієнтом витрати повітря. У такому разі створюються конструктивно або газодинамічно поділені зони, де горіння палива відбувається за нестачею або надлишком повітря. Повітря для допалювання продуктів неповного горіння палива подають за допомогою спеціальних сопел. Головна перевага такої технології полягає у можливості вирівнювання поля температури уздовж газового потоку, а під час переходу до об'ємного спалювання – і в усьому

об'ємі, а також можливості реалізації режиму малоокисненого нагрівання металу.

За організації роздільного підведення високо- та низькокалорійних складових палива до нагрівальної печі управління її тепловою потужністю здійснюють одночасною дією на регулятори витрати компонентів палива для забезпечення заданої температури у робочому об'ємі та постійного об'єму продуктів горіння у періоди витримки й охолодження металу.

Для створення оптимального об'єму продуктів горіння у періоди нагрівання та витримки металу піч опалюють природно-доменною сумішшю із дотриманням умови мінімізації витрати природного газу.

За наявності надлишку (або нестачі) теплоти у робочому об'ємі нагрівальної печі витрату компонентів палива можна визначити із розв'язання нижче наведених систем рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{др}} \cdot [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}} + B_{\text{др}} \cdot [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}} &= Q_{\text{н}}(T_{\text{н}}) \\ B_{\text{др}} \cdot V_{\text{др}} + B_{\text{др}} \cdot V_{\text{др}} &= V_{\text{пгп}} \end{aligned} \right\} \\ \text{за } B_{\text{др}}^{\text{max}} \cdot [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}} < Q_{\text{н}}(T_{\text{н}}); \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{др}} \cdot [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}} + L_{\text{пов}}^{\text{надл}} \cdot i_{\text{пов}}^{\text{надл}} &= Q_{\text{н}}(T_{\text{н}}) \\ B_{\text{др}} \cdot V_{\text{др}} + L_{\text{пов}}^{\text{надл}} &= V_{\text{пгп}} \end{aligned} \right\} \\ \text{за } B_{\text{др}}^{\text{max}} \cdot [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}} > Q_{\text{н}}(T_{\text{н}}), \quad (2)$$

де  $B_{\text{др}}, B_{\text{пг}}, [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{др}}, [Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\text{пг}}$  – витрата та калорійність доменного й природного газів відповідно;  $Q_{\text{н}}(T_{\text{н}})$  – теплова потужність печі;  $V_{\text{пг}}, V_{\text{др}}$  – об'єм продуктів горіння доменного та природного газів відповідно;  $V_{\text{пгп}}$  – загальний об'єм продуктів горіння;  $i_{\text{пов}}^{\text{надл}}, L_{\text{пов}}^{\text{надл}}$  – ентальпія та питома витрата надлишкового повітря відповідно.

За недостатньої кількості теплоти, що отримують під час спалювання доменного газу, теплову потужність печі  $Q_{\text{н}}$  підвищують, відповідно до системи рівнянь (1), заміщенням частини зазначеного газу  $B_{\text{др}}$  на еквівалентний за об'ємом продуктів горіння природний газ  $B_{\text{пг}}$ .

Якщо в робочому об'ємі печі є надлишок теплоти, то її теплову потужність знижують, використовуючи систему рівнянь (2), розбавленням доменного газу відповідною кількістю надлишкового повітря  $L_{\text{пов}}^{\text{надл}}$  за умови підтримки на заданому для режиму нагрівання металу рівні сумарної кількості продуктів горіння, а подачу природного газу припиняють.

Результати обчислень параметрів горіння компонентів палива на першій і другій стадіях його спалювання наведено у табл. 1.

**Таблиця 1** – Розрахункові параметри горіння палива на першій і другій стадіях його спалювання

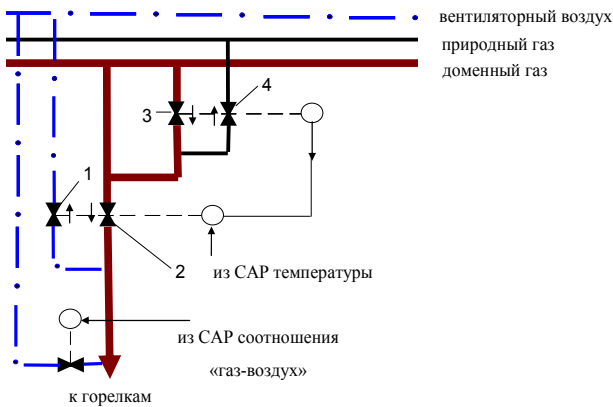
Параметри	Коефіцієнт витрати повітря $\alpha_1$			
	0,65	0,70	0,80	0,90
$[Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\alpha_1}^{\text{др}}, \text{кДж/м}^3$	2565	2762	3156	3552
$L_{\alpha_1}^{\text{др}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,50	0,52	0,60	0,68
$V_{\alpha_1}^{\text{др}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	1,29	1,43	1,48	1,54
$[Q_{\text{н}}^{\text{р}}]_{\alpha_1}^{\text{пг}}, \text{кДж/м}^3$	18315	20350	24992	30492
$L_{\alpha_1}^{\text{пг}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	6,26	6,70	7,72	8,74
$V_{\alpha_1}^{\text{пг}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	6,07	6,71	7,69	8,68
за $\alpha_2 = 1,0$				
$[CO]_2^{\text{др}}, \%$	7,40	5,54	3,75	2,78
$[CO]_2^{\text{пг}}, \%$	10,24	8,42	5,27	2,82
$[H_2]_2^{\text{пг}}, \%$	10,12	8,16	4,95	2,36
$[CH_4]_2^{\text{пг}}, \%$	1,40	1,04	0,62	0,28
за $\alpha_2 = 1,2$				
$[CO]_2^{\text{др}}, \%$	5,82	4,74	3,76	1,74
$[CO]_2^{\text{пг}}, \%$	4,24	4,07	3,68	2,07
$[H_2]_2^{\text{пг}}, \%$	4,15	3,85	2,90	1,72
$[CH_4]_2^{\text{пг}}, \%$	0,56	0,49	0,36	0,16

Схему реалізації управління стадійним режимом опалювання нагрівальної печі з використанням природного та доменного газів, а також надлишкового повітря, під час їх роздільної подачі, подано на рис. 1 [9].

Регулювання витрати компонентів палива під час опалювання печі здійснюють спарованими заслінками 1, 2 і 3, 4, які працюють у режимі «проти фази».

Під час включення системи автоматичного регулювання (САР) за сигнала від регулятора температури відчиняється заслінка подачі доменного газу 2 (зачиняється заслінка подачі повітря 1) за повністю відчиненого положення заслінки 3.

Якщо за реалізації заданого режиму нагрівання металу встановлено, що теплової потужності печі недостатньо, то, за максимального ступеня відкриття заслінки 2, САР відкриває заслінку подачі природного газу 4, що супроводжується закриттям заслінки 3. Подача природного газу до робочого об'єму печі призводить до усунення теплового дефіциту процесу нагрівання металу та рівень його температури досягає заданого значення.



**Рисунок 1** – Схема реалізації управління опалюванням печі двома видами палива та надлишковим повітрям

По завершенні періоду нагрівання металу теплову потужність печі знижують: за сигнала від САР температури виконують закриття заслінки 4 і відкриття заслінки 1. Подальше зниження теплової потужності печі здійснюють закриттям заслінки 2 та подаванням надлишкового повітря [10].

Аналіз спалювання палива у разі роздільної подачі його компонентів виконують за результатами складання теплового балансу для робочого об'єму нагрівальної печі [11].

Кількість теплоти, яку витрачають на нагрівання металу (за одиницю часу)  $Q_n^c$  за використання наявної системи опалювання природно-доменною сумішшю, обчислюють за формулою:

$$Q_n^c = B_{\text{пал}} \cdot [Q_n^p]_{\text{пал}} - i_{\text{пгп}} \cdot V_{\text{пгп}}^c, \quad (3)$$

де  $B_{\text{пал}}$  – витрата природно-доменної суміші на піч;  $[Q_n^p]_{\text{пал}}$  – калорійність зазначеної суміші;  $i_{\text{пгп}}$ ,  $V_{\text{пгп}}^c$  – ентальпія та витрата продуктів горіння палива відповідно.

У разі роздільної подачі природного та доменного газів, а також надлишкового повітря, кількість теплоти, що витрачають на нагрівання металу  $Q_n^p$ , подають як

$$Q_n^p = [Q_n^p]_{\text{др}} \cdot B_{\text{др}} + [Q_n^p]_{\text{пг}} \cdot B_{\text{пг}} + i_{\text{пов}}^{\text{надл}} \cdot L_{\text{пов}}^{\text{надл}} - i_{\text{пгп}} \cdot V_{\text{пгп}}^c. \quad (4)$$

Виходячи з того, що кількість теплоти, яку витрачають у печі на нагрівання металу, є однаковою у разі застосування обох технологій опалювання, можна записати:

$$[Q_n^p]_{\text{др}} \cdot B_{\text{др}} + [Q_n^p]_{\text{пг}} \cdot B_{\text{пг}} + i_{\text{пов}}^{\text{надл}} \cdot L_{\text{пов}}^{\text{надл}} = [Q_n^p]_{\text{пал}} \cdot B_{\text{пал}} + i_{\text{пгп}} \cdot (V_{\text{пгп}}^p - V_{\text{пгп}}^c). \quad (5)$$

Тоді з урахуванням системи рівнянь (1) співвідношення (5) матиме вигляд:

$$Q_n(T_n) = [Q_{\text{пал}} \cdot B_{\text{пал}} + i_n \cdot C_{\text{пг}}^T \cdot (V_{\text{заг}}^{\text{пгп}} - V_{\text{пгп}}^c)]. \quad (6)$$

Здійснюючи розв'язання системи рівнянь (1) і (2), записують співвідношення для визначення витрати природного та доменного газів, що подають до нагрівальної печі:

$$B_{\text{пг}} = \frac{Q_n(T_n) \cdot V_{\text{др}} - V_{\text{зал}}^{\text{пгп}} \cdot [Q_n^p]_{\text{др}}}{[Q_n^p]_{\text{пг}} \cdot V_{\text{др}} - [Q_n^p]_{\text{др}} \cdot V_{\text{пг}}}; \quad (7)$$

$$B_{\text{др}} = \frac{V_{\text{зал}}^{\text{пгп}} \cdot [Q_n^p]_{\text{пг}} - Q_n(T_n) \cdot V_{\text{пг}}}{[Q_n^p]_{\text{пг}} \cdot V_{\text{др}} - [Q_n^p]_{\text{др}} \cdot V_{\text{пг}}}. \quad (8)$$

Якщо отримують негативні розв'язання системи рівнянь (7) ( $B_{\text{пг}} < 0$  або  $B_{\text{др}} < 0$ ), то виконують перехід до системи рівнянь (8).

У разі подачі холодного надлишкового повітря  $L_{\text{пов}}^{\text{надл}}$  теплотою, що вносить повітря, можна нехтувати. Тоді:

$$B_{\text{др}} = \frac{Q_n(T_n)}{[Q_n^p]_{\text{др}}}; \quad (11)$$

$$L_{\text{пов}}^{\text{надл}} = V_{\text{пгп}} - B_{\text{др}} \cdot V_{\text{др}}. \quad (12)$$

За результатами обчислень перевіряють виконання умов [12]:

$$V_{\text{пг}}^c \leq B_{\text{пал}}^{\text{max}} \cdot V_{\text{пал}}; \quad (13)$$

$$(T_{\text{кал}})_p \geq T_n. \quad (14)$$

де  $(T_{\text{кал}})_p$  – калориметрична температура продуктів горіння, що отримують у разі роздільної подачі компонентів палива  $Q_n^{\text{min}}(T_n)$ .

Виконання умови (14) свідчить про охолодження печі до заданого рівня температури.

**Висновки.** Розглянуто деякі аспекти процесу стадійного спалювання природно-доменної суміші у нагрівальних печах камерного типу. Визначено параметри стадійного спалювання зазначеної суміші на його різних стадіях. Запропоновано схему управління стадійним спалюванням палива в нагрівальних печах за роздільною подачею його компонентів.

### Бібліографічний список

1. Губинский, В. И. Теория пламенных печей [Текст] / В. И. Губинский, У. Лу Чжун. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с. – ISBN 5-217-02647-2.
2. 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.

3. **Арутюнов, В. А.** Дожигание 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.
4. **Щетинков, Е. С.** Физика горения газов [Текст] / Е. С. Щетинков. – М. : Наука, 1965. – 739 с.
5. **Белоусов, В. Н.** Топливо и горение газа [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Белоусов, С. М. Смородин, О. А. Смирнова. – Ч. 2. Теория горения. – СПб. : 2011. – 136 с.
6. **Мунц, В. А.** Основы теории горения топлива [Текст] : учеб. пособие / В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк. – Екатеринбург : УГТУ «УПИ», 2005. – 102 с.
7. **Семикин, И. Д.** Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов [Текст] : учеб. пособие / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 392 с.
8. **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.
9. **Зінченко, В. Ю.** До управління тепловою роботою полумєневих термічних печей камерного типу [Текст] / В. Ю. Зінченко, В. І. Іванов, О. І. Чепрасов, Ю. М. Радченко // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2015. – Вип. 7. – С. 87-91.
10. **Зинченко, В. Ю.** Отопление нагревательных печей при отдельной подаче топливных составляющих [Текст] / В. Ю. Зинченко, В. И. Иванов, А. И. Чепрасов, Ю. Н. Каюков // Prospects of World Science-2018. Materials of XIV International research and practice conference. – 30.07.-07.08.2018. – Sheffield, 2018. – Vol. 4. – P. 50-52.
11. **Ревун, М. П.** Деякі аспекти стадійного спалювання газоподібного палива у термічних печах [Текст] / М. П. Ревун, В. Ю. Зінченко, В. І. Іванов, О. І. Чепрасов // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. – Вип. 1 (33). – С. 72-76.
12. **Зинченко, В. Ю.** Расчетный анализ сжигания топлива при отдельной подаче его компонентов в печь [Текст] / В. Ю. Зинченко, В. И. Иванов, А. И. Чепрасов, Ю. Н. Каюков // Nauka: Teoria i Praktyka-2018. Materiały of XIV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. – 07.-15.08.2018. – Przemysl, 2018. – Vol. 7. – P. 41-43.

**Зинченко Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: [elelna.zinchenko@mail.ru](mailto:elelna.zinchenko@mail.ru)

**Иванов Виктор Ильич**, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: [colourmet@zgia.zp.ua](mailto:colourmet@zgia.zp.ua)

**Чепрасов Александр Иванович**, кандидат технических наук, профессор кафедры теплотехники и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: [alex.i.cheprasov@gmail.com](mailto:alex.i.cheprasov@gmail.com)

**Каюков Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: [lenajura2010@gmail.com](mailto:lenajura2010@gmail.com)

## К ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СТАДИЙНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА ПРИ РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Рассмотрены особенности стадийного сжигания природно-доменной топливной смеси в нагревательных печах камерного типа. Рассчитаны параметры сжигания указанной смеси на его различных стадиях. Предложено технологическую схему управления стадийным сжиганием топлива при отдельной подаче его компонентов.

Ключевые слова: нагревательная печь камерного типа, стадийное сжигание топлива, параметры сжигания, отдельная подача компонентов топлива, схема управления отоплением печи

**Zinchenko Yuriy**, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department of the Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [elelna.zinchenko@mail.ru](mailto:elelna.zinchenko@mail.ru)

**Ivanov Victor**, Senior Staff Scientist of Department of the Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [colourmet@zgia.zp.ua](mailto:colourmet@zgia.zp.ua)

**Cheprasov Alexander**, Candidate of Technical Science, Professor of Department of Heat Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: [alex.i.chep-rasov@gmail.com](mailto:alex.i.chep-rasov@gmail.com)

**Кавуков Юрій**, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department of Heat Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: lenajura2010@gmail.com

**TO OPTIMIZATION OF FUEL STAGE INCINERATION IN FURNACES OF CHAMBER TYPE AT DIVIDED DELIVERY ITS COMPONENTS**

The features of stage combustion of natural and blast-furnace fuel mixture in the heating furnaces of chamber type are considered. The parameters of this mixture combustion on its different stages are calculated. The manufacturing scheme of control in fuel stage incineration at separate delivery of its components is offered.

Keywords: heating furnace of chamber type, stage fuel combustion, parameters of combustion, separate feed of fuel components, scheme of heating control of furnace

Стаття надійшла до редакції 27.07.2018 р.  
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>