

УДК 621.783.24:621.1.016.4:669.045

**Каюков Юрій Миколайович**, доцент, кандидат технічних наук  
**Чепрасов Олександр Іванович**, професор, кандидат технічних наук  
**Іванов Віктор Ілліч**, старший науковий співробітник  
**Назаренко Ірина Анатоліївна**, доцент, кандидат технічних наук

## ПРО ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФАКЕЛУ НА ЯКІСТЬ НАГРІВАННЯ ЗАГОТОВОК У КАМЕРНІЙ ПЕЧІ З ОДНОСТОРОННІМ БІЧНИМ ОПАЛЮВАННЯМ

*Запорізька державна інженерна академія*

Виконано чисельні дослідження впливу параметрів факелу на якісні показники нагрівання заготовок у камерній печі з одностороннім бічним опалюванням. Встановлено, що достатньої рівномірності нагрівання заготовок досягають під час спалювання палива у факелі з відносною довжиною підсосу  $L_n \sim 0,5$ , а також реалізації у період витримки металу імпульсного режиму опалювання.

Ключові слова: камерна нагрівальна піч, сталеві заготовки, параметри факелу, рівномірність нагрівання, імпульсний режим опалювання

*Вступ.* Для нагрівання сталевих заготовок перед куванням на ЧАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» застосовують полуменеві печі камерного типу з площею поду  $29 \text{ м}^2$ . Печі опалюють природним газом, що спалюють у восьми пальниках, розташованих на одній бічній стінці камери у два ряди за її висотою: верхній ряд утворюють пальники типу ГНП-5, нижній ряд – пальники типу ГНП-3. Пальники об'єднано в одну зону регулювання температури за показанням термоелектричного термометра, що встановлено в підвісному склепінні печі. Повітря, що подають на спалювання палива, підігрівують у петльовому рекуператорі, встановленому в димовому лежені. Продукти спалювання палива видаляють через вікна, що рівномірно розташовано вздовж бічних стін печі. Заготовки завантажують на подові підставки та розташовують у напрямі руху нагрівального середовища. У роботах [1,2] описано математичну модель процесу нагрівання металу для печей зазначеного типу.

*Постановка завдання.* Метою роботи є дослідження впливу параметрів факела на рівномірність нагрівання сталевих заготовок у робочому об'ємі зазначених печей, а також режимів опалювання на якість нагрівання заготовок, а також засвоєння ними теплоти.

*Головна частина досліджень.* Розрахунки виконували за вихідними даними: паливо – природний газ з теплою згоряння  $Q_n^p = 35,6 \text{ МДж/м}^3$ ; температура підігрівання повітря –  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура витримки металу у печі –  $1160 \text{ }^\circ\text{C}$ ; метал, що нагрівають – заготовки перерізом  $400 \times 360 \text{ мм}$  із сталі Р6М5; футерівка печі – одно- та двошарові стінки, які виконано з

шамотного та пінодіатомітового матеріалів. Теплофізичні властивості металу та елементів футерівки печі задавали за даними робіт [3,4].

Відносну довжину шляху підсосу факела  $L_n$  обчислювали з використанням співвідношення

$$L_n = \frac{\ell_n}{b}, \quad (1)$$

де  $\ell_n$  – довжина шляху підсосу факела, де міра вигорання палива, згідно з роботами [5,6], складає  $0,85$ ;  $\ell_n \approx 0,7\ell_\phi$ ;  $\ell_\phi$  – довжина факела від виходу з пальника до поперечного перерізу на його осі, де значення середнього хімічного недопалу палива становить  $2 \%$ ;  $b$  – геометричний розмір робочої камери печі у напрямі розвитку факела.

Для кількісної оцінки впливу відносної довжини шляху підсосу факела на інтенсивність процесу нагрівання в робочому об'ємі печі застосовували відносне засвоєння теплоти садкою сталевих заготовок  $Q$  у період підйому температури:

$$Q = \frac{Q_\Sigma}{Q_{\Sigma\text{max}}}, \quad (2)$$

де  $Q_\Sigma$  – сумарне засвоєння теплоти заготовками, що нагрівають, для факела певної довжини;  $Q_{\Sigma\text{max}}$  – максимальне (у інтервалі змінювання відносної довжини підсосу факела  $L_n$ ) сумарне засвоєння теплоти заготовками.

Як свідчить аналіз змінювання значень  $Q$  (табл. 1), у дослідженому інтервалі параметра  $L_n$  максимальну інтенсивність тепловіддачі має факел за  $L_n = 0,1$ . Під час збільшення значень параметра  $L_n$  до  $0,5$  зафіксовано незначне зниження засвоєння теплоти заготовками  $Q$ , що пов'язано з поширенням зони інтенсивного вигорання палива та зменшенням температурного натиску між факелом і поверхнею заготовки, що

нагрівають. За  $L_n > 0,5$  довжина факела перевищує розміри робочої камери печі, що супроводжується істотним зниженням рівня засвоюван-

ня теплоти та появою хімічного недопалу палива.

**Таблиця 1** – Відносне усвоювання теплоти та тривалість періоду підйому температури печі за змінюванням довжини підсосу факела

Назва параметра	Відносна довжина шляху підсосу факела, $L_n$						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
Відносне засвоювання теплоти металом $Q$	1,0	0,995	0,992	0,985	0,972	0,955	0,875
Тривалість періоду підйому температури $\tau_n$ , год.	8,20	8,15	8,10	8,00	8,10	8,42	10,0

Окрім того, встановлено, що під час змінювання параметра  $L_n$  відбувається зміщення зони високої температури нагрівального середовища відносно пічного термоелектричного термометра. Так, за  $L_n = 0,1-0,4$  спостерігають деяке зменшення, а за  $L_n = 0,4-0,5$  деяке збільшення значень параметра  $\tau_n$ . Наступне збільшення параметра  $L_n$  призводить до зниження тепловіддачі в робочому об'ємі печі, в тому числі до поверхні

пічного термодатчика, що сприймає теплоту, а також значного зростання тривалості періоду підйому температури у печі.

Розподіл температури нагрівального середовища  $T_{нс}$  та відносної щільності осьового променистого результуючого теплового потоку  $\bar{q}_{вiдн}$  в робочому об'ємі печі, що розділено за шириною на п'ять зон (1-5), наведено в табл. 2.

**Таблиця 2** – Температура нагрівального середовища та відносна щільність осьового променистого результуючого теплового потоку в робочому об'ємі печі

Параметр $L_n$ , м	Температура $T_{нс}$ , °С					Параметр $\bar{q}_{вiдн}$ *			
	номер газової зони					межа між зонами			
	1	2	3	4	5	1-2	2-3	3-4	4-5
0,1	1410	1220	1170	1140	1125	2,42	2,62	2,05	1,29
0,2	1350	1255	1175	1142	1125	1,35	2,44	2,02	1,26
0,3	1220	1315	1190	1145	1125	-0,55	1,81	1,89	1,25
0,4	1095	1290	1220	1150	1130	-1,60	0,69	1,56	1,18
0,5	990	1260	1245	1170	1135	-2,28	-1,33	0,98	1,05
0,6	915	1250	1265	1205	1160	-2,65	-1,60	1,09	0,79
0,7	850	1210	1265	1230	1185	-2,98	-2,55	-0,70	0,40
0,8	805	1175	1265	1245	1210	-3,45	-3,55	-1,65	-0,08

Примітка: \* «+», «-» - напрям вектора параметра  $\bar{q}_{вiдн}$  в сторону розвитку факела та пальника відповідно

Розрахунки дозволили встановити (табл. 2), що для факелів максимальної довжини осьові результуючі теплові потоки орієнтовано до пальникових пристроїв, а для факелів мінімальної довжини – у бік розвитку факела. За значенням параметра  $L_n = 0,3-0,7$  осьові результуючі теплові потоки спрямовано у протилежні сторони від перерізу, де температура нагрівального середовища досягає свого максимального значення, одночасно їх найбільш рівномірний розподіл зафіксовано для факела з  $L_n = 0,4-0,5$ .

Для якісної характеристики впливу довжини факела на умови нагрівання заготовок у робочому об'ємі печі застосовували критерій нерівномірності розподілу теплових потоків  $K_q$ :

$$K_q = \frac{q_{\max}}{q_{\text{сеп}}}, \quad (3)$$

де  $q_{\max}$ ,  $q_{\text{сеп}}$  – відповідно максимальна та середня щільність результуючого теплового потоку на поверхні садки металу, що нагрівають, для факела певної довжини.

Якість нагрівання металу оцінювали критеріями  $\sigma_{1\Delta T}$  і  $\sigma_{2\Delta T}$ , де  $\sigma_{1\Delta T}$ ,  $\sigma_{2\Delta T}$  – середньоквадратичні відхилення від середнього значення відповідно різниці температур між показанням пічного термодатчика та температурами поверхні металу  $T_n$  у зонах 1-5 і перепадів температури між поверхнею  $T_n$  і тепловим центром садки металу  $T_u$ , що нагрівають, у вказаних зонах.

Таблиця 3 – Якісні показники роботи нагрівальної печі за змінюванням параметра  $L_n$  факела

Параметр	Параметр $L_n$						
	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$K_q$	1,26	1,21	1,17	1,08	1,07	1,12	1,15
$\sigma_{1\Delta T}, ^\circ\text{C}$	45,00	31,00	22,40	18,40	22,50	29,30	34,40
$\sigma_{2\Delta T}, ^\circ\text{C}$	12,50	9,20	7,00	4,60	5,50	7,70	5,40

Результати досліджень (табл. 3) показали, що:

– змінювання значень критеріїв  $K_q$ ,  $\sigma_{1\Delta T}$  і  $\sigma_{2\Delta T}$  залежно від параметра  $L_n$  має екстремальний характер;

– за  $L_n = 0,5-0,6$  зафіксовано найбільшу рівномірність нагрівання заготовок;

– нерівномірність нагрівання досягає свого максимального значення за  $L_n = 0,1$ ;

– за  $L_n > 0,6$  спостерігають зниження якісних показників нагрівання заготовок.

Одним з напрямів підвищення якості нагрівання металу може бути застосування імпульсного режиму опалювання [7]. Такий режим передбачає забезпечення постійної витрати палива у період підйому температури в печі та його ім-

пульсне подавання у період витримки. Тривалість подавання палива під час одного імпульсу для початкового періоду витримки є максимальною, а для кінцевого періоду має мінімальне значення [8-10].

Порівняльну оцінку якості нагрівання металу за імпульсним і традиційним режимами опалювання здійснювали по завершенні періоду витримки однакової тривалості. Розрахункові середні значення температури нагрівального середовища  $T_{нс}$ , поверхні  $T_n$  і теплового центру металу  $T_{ц}$ , що нагрівають, а також значень перепадів  $\Delta T_n$  і  $\Delta T_{ц}$  між зонами печі за  $L_n = 0,5$  подано у табл. 4.

Таблиця 4 – Розподіл температури по завершенні періоду витримки металу в зонах печі за існуючим (I) та імпульсним подаванні палива (II)

Параметри	I					II				
	номер зони					номер зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$T_{нс}, ^\circ\text{C}$	1120	1235	1185	1155	1145	1110	1220	1195	1170	1155
$T_n, ^\circ\text{C}$	1145	1165	1160	1145	1140	1145	1160	1165	1155	1150
$T_{ц}, ^\circ\text{C}$	1135	1160	1155	1145	1135	1140	1160	1160	1150	1140
$\Delta T_n, ^\circ\text{C}$	18	5	9	12	20	10	3	5	7	10
$\Delta T_{ц}, ^\circ\text{C}$	10	6	6	8	9	8	4	3	6	7

Встановлено, що імпульсне подавання палива забезпечує ступінчасте змінювання довжини факела від максимального до мінімально припустимого значення, а, також дозволяє використовувати переваги довгого факела у період витримки печі.

Наявність пульсуючого факела сприяє зниженню нерівномірного розподілу температури нагрівального середовища у зонах печі та, відповідно, збільшенню рівномірності розподілу теплових потоків на поверхні заготовок, що нагрівають. Одночасно досягають підвищення температури в останніх за ходом факела газових зонах, що сприяє збільшенню теплового вмісту металу.

За імпульсним режимом опалювання характер змінювання перепадів температури за зонами печі у кінці періоду витримки порівняно із значенням таких показників по завершенні періоду підйому температури в печі залишається не-

змінним. В той же час за традиційним режимом опалювання печі зменшення довжини факела супроводжується зміщенням зони максимальної температури нагрівального середовища до кореня факела та зниженням рівномірності поля температури. Зіставлення рівномірності нагрівання металу в такому разі показує поліпшення якості нагрівання за імпульсним режимом опалювання печі: так, значення різниці температури для поверхні металу на момент видачі з печі не перевищує  $11 ^\circ\text{C}$ , тоді як за традиційним режимом опалювання складає  $20 ^\circ\text{C}$ .

*Висновки.* Результати досліджень у нагрівальній печі камерного типу з одностороннім бічним опалюванням показали достатню якість нагрівання заготовок під час спалювання палива у факелі з відносною довжиною підсосу  $L_n \approx 0,5$ . Зіставлення якості нагрівання заготовок за різних режимів опалювання печі свідчить про перевагу імпульсного режиму, що полягає у прак-

тично двократному пониженні кінцевого значення перепаду температури на поверхні металу на момент його видавання з печі.

### Бібліографічний перелік

1. **Ревун, М. П.** Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа (сообщение 1) / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов // *Металлургія : наукові праці ЗДІА*. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 130-140.
2. **Ревун, М. П.** Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа (сообщение 2) / М. П. Ревун, Ю. Н. Каюков, А. И. Чепрасов, В. И. Иванов // *Металлургія : наукові праці ЗДІА*. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2011. – Вип. 23. – С. 163-171.
3. **Лисиенко, В. Г.** Интенсификация теплообмена в пламенных печах / В. Г. Лисиенко. – М. : *Металлургия*, 1979. – 224 с.
4. **Лисиенко, В. Г.** Теплофизика металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. – М. : *Металлургия*, 1982. – 239 с.
5. **Расчеты нагревательных и термических печей:** справочник / Под ред. *В. М. Тымчака* и *В. Л. Гусовского*. – М. : *Металлургия*, 1983. – 481 с.
6. **Казанцев, Е. И.** Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – 2-е изд. – М. : *Металлургия*, 1975. – 367 с.
7. **Ревун, М. П.** Интенсификация работы нагревательных печей / М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз. – Киев : *Техника*, 1987. – 137 с.
8. **А. с. 1086023 СССР, МКИ<sup>3</sup> C21D 9/70.** Способ отопления камерных нагревательных печей / М. П. Ревун, Я. Ю. Сайфаров, Ф. Ф. Франк и др. Заявлено 12.08.82; опубл. 14.04.84. Бюл. № 14.
9. **Ревун, М. П.** Система импульсного отопления камерных нагревательных печей / М. П. Ревун, Ф. Ф. Франк, Б. Г. Высочин и др. // *Сталь*. – 1983. – № 9. – С. 84-87.
10. **Ревун, М. П.** Импульсное отопление нагревательных колодцев / М. П. Ревун, А. И. Чепрасов, Ю. Н. Каюков и др. // *Черная металлургия*. – 1987. – № 8 (1036). – С. 58-59.

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

**Чепрасов Александр Иванович**, кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: alex.i.chep-rasov@gmail.com

**Иванов Виктор Ильич**, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: vitas1850@gmail.com

**Назаренко Ирина Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики и гидроэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: teplogidro@gmail.com

### О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ФАКЕЛА НА КАЧЕСТВО НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ С ОДНОСТОРОННИМ БОКОВЫМ ОТОПЛЕНИЕМ

Выполнены численные исследования влияния параметров факела на качественные показатели нагрева заготовок в камерной печи с односторонним боковым отоплением. Установлено, что достаточную равномерность нагрева заготовок достигают при сжигании топлива в факеле с относительной длиной подсоса  $L_n = 0,5$ , а также реализации в период выдержки металла импульсного режима отопления.

Ключевые слова: камерная нагревательная печь, стальные заготовки, параметры факела, равномерность нагрева, импульсный режим отопления

**Kayukov Yuri**, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: lenajura2010@gmail.com

**Cheprasov Alexander**, candidate of technical sciences, Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: alex.i.chep-rasov@gmail.com

**Ivanov Victor**, Senior Staff Scientist of the Department of Automated Control by Technological Process, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: vitas1850@gmail.com

**Nasarenko Irene**, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of Heat and Power Engineering and Hydro Power Energetic, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: teplogidro-

energetik@gmail.com

### **ABOUT INFLUENCE OF TORCH PARAMETERS ON QUALITY OF HEATING OF BILLETS IN CHAMBER FURNACE WITH ONE-SIDED LATERAL HEATING**

Numerical researches of influence of torch parameters on the high-quality indexes of heating of billets in a chamber furnace with the one-sided lateral heating are executed. It is set that sufficient evenness of heating of billets arrive at incineration fuels in a torch with relative length of aspiration  $L_n = 0,5$ , and also to realization in the period of self-control of metal of the pulse-mode of heating.

Keywords: chamber heater furnace steel billets, parameters of torch, evenness of heating, pulse-mode of heating

Стаття надійшла до редакції 14.02.2019 р.  
Рецензент, проф. І.Г. Яковлева

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