

УДК 621.3:658.567.1

DOI:10.26661/2071-3789-2019-2-42-11

**Зінченко Володимир Юрійович** <sup>(1)</sup>, доцент, кандидат технічних наук  
**Іванов Віктор Ілліч** <sup>(1)</sup>, старший науковий співробітник  
**Каюков Юрій Миколайович** <sup>(1)</sup>, доцент, кандидат технічних наук  
**Радченко Юрій Миколайович** <sup>(2)</sup>, доцент, кандидат технічних наук

## РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПАЛЕННЯ ДВОКАМЕРНИХ ТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ

<sup>(1)</sup> Інженерний інститут Запорізького національного університету,  
<sup>(2)</sup> Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Виконано аналіз якості нагрівання під термічну обробку сталевих заготовок за існуючої технології опалювання двокамерних печей сумішшю природного та доменного газів. Запропоновано раціональну технологію опалювання з комбінуванням зазначених паливних складових перед пальниками, реалізація якої дозволить збільшити об'ємну витрату продуктів горіння протягом усього циклу термічної обробки й, отже, понизити нерівномірність нагрівання сталевих заготовок.

Ключові слова: двокамерна термічна піч, сталеві заготовки, нагрівання під термічну обробку, комбінування паливних складових перед пальниками, раціональна технологія опалення

*Вступ.* Широкий діапазон змінювання теплової потужності печей під час реалізації багатоступінчастих температурно-часових режимів термічної обробки металу зумовлює вимоги до спалювання газоподібного палива для його різних періодів [1-6]. Одночасно, технологія опалювання термічних печей має бути гнучкою з можливістю настроювання під час теплової роботи.

На деяких металургійних підприємствах України для нагрівання під термічну обробку литих заготовок, що одержують на установках напівбезперервного розливання сталі, застосовують двокамерні термічні печі, які опалюють сумішшю природного та доменного газів.

Печі обладнано двопровідними пальниками типу ГНП-4, що розміщено по дев'ять у кожній зоні та забезпечують двостороннє нагрівання сталевих заготовок. У склепінні кожної робочої камери печі розташовано хромель-алюмелеві термоелектричні термометри (три термометри у чохлах) для контролю температури в її робочому обсязі.

П'ять-шість заготовок, укладених у металеві бугеля, піддають нагріванню під термічну обробку за багатоступінчастими температурно-часовими режимами залежно від марки сталі.

*Постановка завдання.* Дослідження теплової роботи двокамерних термічних печей і розробка раціональної технології їх опалювання.

*Основна частина.* Під час експериментальних досліджень вивчали розподіл температури за довжиною робочої камери, а також нагрівання під термічну обробку заготовок із сталі 4Х5МФ1С перерізом 370 x 370 мм і загальною

масою 26,7 т. Розподіл температури в сталевих заготовках контролювали шляхом використання гнучких хромель-алюмелевих термоелектричних термометрів, що встановлено на поверхні садки за довжиною заготовок; контроль температури в робочому обсязі печі виконували стаціонарно встановленими термодатчиками. Результати досліджень подано у табл. 1.

Експериментами встановлена наявність нерівномірного розподілу температури в робочому обсязі печі: значення перепаду температури за його довжиною на початку термічної обробки металу досягає 90-100 °С, а в період витримки – знижується до 50-60 °С. Для садки сталевих заготовок також зафіксовано нерівномірність поля температури на поверхні металу, максимальне значення різниці температури становить 80-90 °С з наступним її пониженням до 50-60 °С.

Результати виконаних досліджень дозволили зробити висновок про необхідність стабілізації газодинамічного режиму термічної печі шляхом підвищення об'ємної витрати продуктів горіння через змінювання технології її опалювання. Розглядали задачу переведення печей цього типу на опалювання з роздільним подаванням природного та доменного газів, а також наступного комбінування їх безпосередньо перед пальниками.

У такому разі управління тепловою потужністю термічної печі здійснюють одночасною дією як на регулятори витрати окремих компонентів палива для забезпечення заданої температури у її робочому обсязі, так і на регулятор об'єму продуктів горіння у періоди витримки й охолодження металу.

**Таблиця 1** – Змінювання температури у робочому обсязі печі (I, II, III) та на поверхні заготовок (1, 2, 3) у періоди нагрівання та витримки металу

Час нагрівання, год.	Температура, °C:					
	точка I	точка II	точка III	точка 1	точка 2	точка 3
4	765	680	670	720	590	570
	760	720	700	720	670	650
8	785	700	655	750	610	600
	780	740	725	750	700	680
12	810	790	740	780	730	690
	810	770	750	780	755	750
16	860	840	790	830	790	760
	860	815	790	830	790	780
20	865	840	810	835	800	790
	860	840	830	840	810	800
24	870	850	820	850	810	800
	870	860	850	850	830	810
28	870	850	825	860	820	800
	870	860	850	860	845	830

Примітка: точки I, II і III - температура лівої, центральної та правої частин робочого обсягу термічної печі відповідно; точки 1, 2 і 3 - температура поверхні лівої, центральної та правої частин садки сталевих заготовок відповідно; в чисельнику - для існуючої системи опалювання печі, у знаменнику - для роздільного підведення компонентів палива до печі відповідно

За наявності надлишку (або недостатчі) теплоти у робочому обсягу зазначеної печі витрату компонентів палива визначають із розв'язання нижченаведених систем рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}_{i\bar{a}} \cdot [Q_i^0]_{i\bar{a}} + \hat{A}_{a\bar{a}} \cdot [Q_i^0]_{a\bar{a}} &= Q_n(\dot{O}_n) \\ \hat{A}_{i\bar{a}} \cdot V_{i\bar{a}} + \hat{A}_{a\bar{a}} \cdot V_{a\bar{a}} &= V_{i\bar{a}} \\ \hat{A}_{a\bar{a}}^{\max} \cdot [Q_i^0]_{a\bar{a}} &< Q_n(\dot{O}_n) \end{aligned} \right\} \text{ за (1)}$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}_{a\bar{a}} \cdot [Q_i^0]_{a\bar{a}} + L_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}} \cdot i_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}} &= Q_n(\dot{O}_n) \\ \hat{A}_{a\bar{a}} \cdot V_{a\bar{a}} + L_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}} &= V_{i\bar{a}} \\ \hat{A}_{a\bar{a}}^{\max} \cdot [Q_i^0]_{a\bar{a}} &> Q_n(\dot{O}_n) \end{aligned} \right\} \text{ за (2)}$$

де  $\hat{A}_{a\bar{a}}, \hat{A}_{i\bar{a}}, [Q_i^0]_{a\bar{a}}, [Q_i^0]_{i\bar{a}}$  – витрата та калорійність доменного й природного газів відповідно;  $Q_n(\dot{O}_n)$  – теплова потужність печі;  $V_{i\bar{a}}, V_{a\bar{a}}$  – об'єм продуктів горіння доменного та природного газів відповідно;  $V_{i\bar{a}}$  – загальний об'єм продуктів горіння;  $i_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}}, L_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}}$  – ентальпія та питома витрата надлишкового повітря відповідно.

У такому разі система рівнянь-обмежень набирає вигляду:

$$[Q_i^0]_{i\bar{a}} \cdot \hat{A}_{i\bar{a}} + [Q_i^0]_{a\bar{a}} \cdot \hat{A}_{a\bar{a}} + a_a \cdot L_a = q^T; \quad (3)$$

$$V_{0,i\bar{a}} \cdot \hat{A}_{i\bar{a}} + V_{0,a\bar{a}} \cdot \hat{A}_{a\bar{a}} + L_a = V^P, \quad (4)$$

де  $L_a$  – витрата надлишкового повітря;  $q^T, V^P$  – теплове навантаження та витрата продуктів горіння, що встановлюють відповідно регулятор температури та регулятор тиску в печі.

Аналіз базисних вирішень показує, що за

$q^T \geq [Q_i^0]_{a\bar{a}} \cdot \hat{A}_{a\bar{a}}^{\max}$ , оптимальне вирішення буде для  $L_b = 0$ , де  $\hat{A}_{a\bar{a}}^{\max}$  – максимально можлива витрата доменного газу, що задовольняє умові:

$$\sum_{k=1}^2 B_{i\bar{a},k} + \hat{A}_{a\bar{a}} \leq \hat{A}_{\max}, \quad (5)$$

де  $B_{\max}$  – максимальна продуктивність пальників.

За недостатньої кількості теплоти, що одержують у печі під час спалювання доменного газу, її теплову потужність  $Q_n$  підвищують, використовуючи систему рівнянь (1), шляхом заміщення частини зазначеного газу  $B_{a\bar{a}}$  еквівалентною за об'ємом продуктів горіння кількістю природного газу  $B_{i\bar{a}}$ .

У такому разі витрати  $B_{a\bar{a}}$  і  $B_{i\bar{a}}$  обчислюють за формулами:

$$\hat{A}_{a\bar{a}} = \frac{[Q_i^0]_{i\bar{a}} \cdot V_{0,i\bar{a}} - q^0 \cdot V_{0,i\bar{a}}}{[Q_i^0]_{i\bar{a}} \cdot V_{0,a\bar{a}} - [Q_i^0]_{a\bar{a}} \cdot V_{0,i\bar{a}}}; \quad (6)$$

$$\hat{A}_{i\bar{a}} = \frac{q^0 \cdot V_{0,a\bar{a}} - [Q_i^0]_{a\bar{a}} \cdot V_{0,i\bar{a}}}{[Q_i^0]_{i\bar{a}} \cdot V_{0,a\bar{a}} - [Q_i^0]_{a\bar{a}} \cdot V_{0,i\bar{a}}}. \quad (7)$$

За наявності в робочому обсязі печі надлишку теплоти зниження її теплової потужності виконують, використовуючи систему рівнянь (2), шляхом розбавлення доменного газу відповідною кількістю надлишкового повітря  $L_{i\bar{a}}^{f\bar{a}\bar{a}\bar{e}}$  за умови підтримки заданого (для періоду нагрівання металу) рівня сумарної кількості продуктів горіння, а подавання природного газу припи-

няють.

Тоді витрати  $B_{\text{д.г}}$  і  $L_{\text{г}}$  визначають з використанням співвідношень:

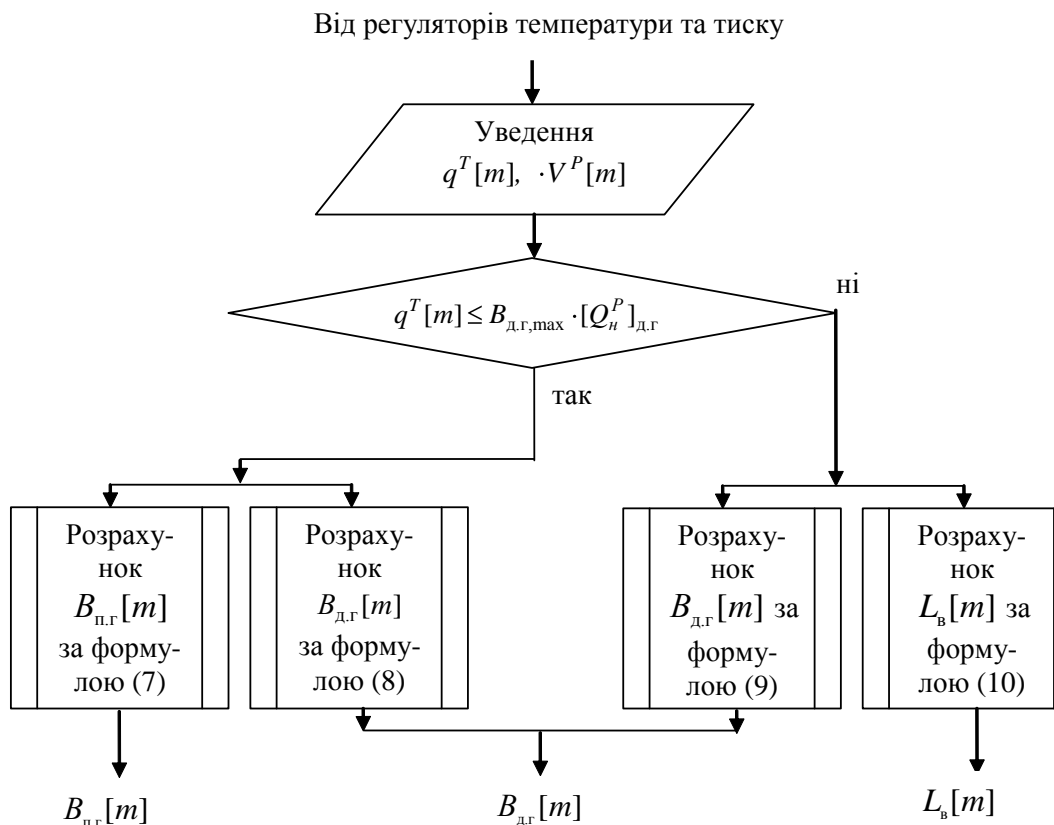
$$\hat{A}_{\text{д.г}} = \frac{q^T - V_0 \cdot a_{\text{г}}}{[Q_{\text{г}}^{\text{д}}]_{\text{д.г}} - V_0 \cdot a_{\text{г}}}; \quad (8)$$

$$L_{\text{г}} = \frac{[Q_{\text{г}}^{\text{д}}]_{\text{д.г}} \cdot V_0 - q^T \cdot V_{0,\text{д.г}}}{[Q_{\text{г}}^{\text{д}}]_{\text{д.г}} - V_{0,\text{д.г}} \cdot \dot{a}_{\text{г}}}. \quad (9)$$

Розрахунковий аналіз спалювання палива у разі роздільного подавання його компонентів виконують з використанням методики, що наведено у роботі [7].

Є можливим спрощення процедури пошуку оптимальних значень витрат  $B_{\text{д.г}}$ ,  $L_{\text{г}}$ ,  $L_{\text{в}}$ , виконуючи порівняння поточної величини  $q^T$  з максимальним значенням  $\hat{A}_{\text{д.г,max}} \cdot [Q_{\text{г}}^{\text{д}}]_{\text{д.г}}$ . Такий алгоритм легко реалізують системою оптимізації з обмеженими обчислювальними можливостями.

На рис. 1 подано спрощену блок-схему обчислення оптимальних значень витрати паливних складових, а також надлишкового повітря.



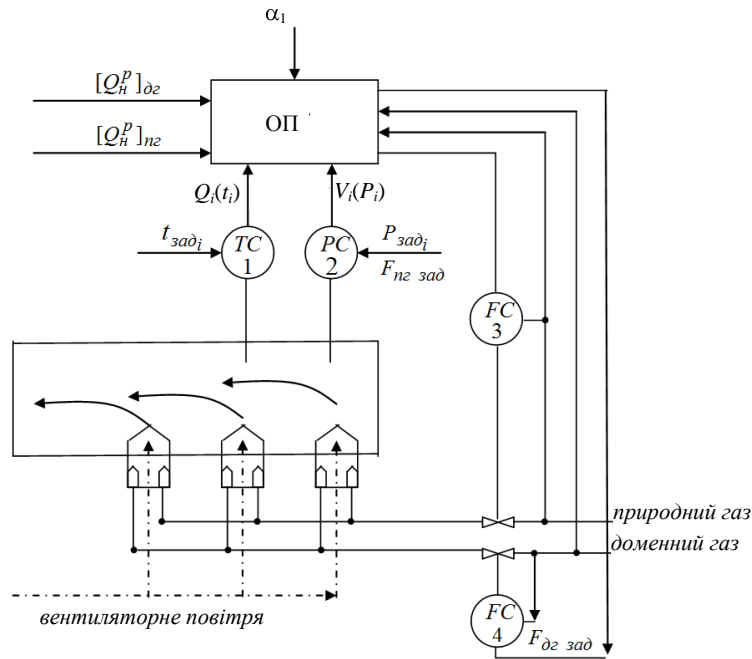
**Рисунок 1** – Блок-схема обчислення оптимальних значень природного та доменного газів, а також надлишкового повітря

Розраховані значення параметрів, обчислених за наведеною блок-схемою, можуть бути використані як справляльні дії для відповідних систем автоматичного регулювання [8].

Схему реалізації управління режимом опалювання термічної печі з використанням природного та доменного газів, а також надлишкового повітря, під час їх роздільного подавання, пода-

но на рис. 2 [9,10].

Результатами наступних експериментів на термічній печі [11] встановлено, що за переведенням її на роздільне подавання природного та доменного газів перепад температури в горизонтальному перерізі робочого обсягу печі знижується до 15-20 °С, а за довжиною садки сталевих заготовок – до 25-30 °С.



**Рисунок 2** – Схема реалізації управління режимом опалювання термічної печі з використанням природного та доменного газів, а також надлишкового повітря за їх роздільного подавання

**Висновки.** Виконано комплекс експериментально-розрахункових досліджень теплової роботи двокамерної термічної печі за переведенням її на роздільне подавання природного та

доменного газів, а також надлишкового повітря. Показано переваги запропонованого методу опалювання печі зазначеного типу.

### Бібліографічний перелік

1. **Кривандин В. А.**, Марков В. Л. *Металлургические печи* : учеб. пособие. 2-е изд-во перераб. и доп. Москва : Metallurgiya, 1977. 463 с.
2. **Лисенко В. Г.**, Лобанов В. И., Китаев Б. И. *Теплофизика металлургических процессов*: учеб пособие. Москва : Metallurgiya, 1982. 239 с.
3. **Несенчук А. П.**, Жмакин Н. П., Кальтман И. И. *Пламенные печи для нагрева и термообработки* : учеб пособие. Минск : Высшая школа. 1983. 350 с.
4. **Розенгарт Ю. И.**, Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородин А. В. *Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах*. Киев-Донецк : Выща школа, 1986. 296 с.
5. **Мастрюков Б.С.**, Сборщиков Т.С. *Теплофизика металлургических процессов* : учеб пособие Москва : Metallurgiya, 1993. 320 с. ISBN 5-229-00709-5.
6. **Губинский В. И.**, Лу Джун-У. *Теория пламенных печей*. Москва : Машиностроение, 1995. 256 с. ISBN 3-127-026472.
7. **Ревун М. П.**, Зінченко В. Ю., Иванов В. І., Чепрасов О. І. Деякі аспекти стадійного спалювання газоподібного палива у термічних печах. *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2015. Вип. 1 (33). С. 72-76.
8. **Зінченко В. Ю.**, Ревун М. П., Иванов В. І., Чепрасов А. И. К автоматизации управления тепловой работой термической печи камерного типа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61, № 8. С. 644-648.
9. **Зінченко В. Ю.**, Иванов В. І., Чепрасов О. І., Радченко Ю. М. До управління тепловою роботою полумєневих термічних печей камерного типу. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. 2015. Вип. 7. С. 87-91.
10. **Зінченко В. Ю.**, Иванов В. І., Чепрасов О. І., Каюков Ю. М. До оптимізації процесу стадійного спалювання палива у печах камерного типу за роздільної подачі його компонентів. *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. Вип. 2 (40). С. 101-105.
11. **Зінченко В. Ю.**, Иванов В. І., Чепрасов О. І., Каюков Ю. М. Отопление нагревательных печей при раздельной подаче топливных составляющих. *Prospects of World Science-2018: Materials of XIV International research and practice conference*. 30.07-07.08.2018. Sheffield: 2018. Vol. 4. P. 52-54.

**Зінченко** Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, инженерный институт Запорожского национального университета (Украина,

Запорожье). E-mail: elelna.zinchenko@mail.ru

**Иванов** Виктор Ильич, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, инженерный институт Запорожского национального университета (Украина, Запорожье). E-mail: vitas.1850@gmail.com

**Каюков** Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидроэнергетики, Инженерный институт Запорожского национального университета (Украина, Запорожье). E-mail: teplogidroenergetik@gmail.com

**Радченко** Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, теплотехники и охраны труда, Национальная металлургическая академия Украины (Украина, Днепр). E-mail: yu\_n\_radchenko@gmail.com

## РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТОПЛЕНИЯ ДВУХКАМЕРНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Выполнен анализ качества нагрева под термическую обработку стальных заготовок при существующей технологии отопления двухкамерных термических печей смесью природного и доменного газов. Предложена рациональная технология их отопления с комбинированием указанных топливных составляющих, реализация которой позволит увеличить объемный расход продуктов сгорания в течение всего цикла термической обработки, а, следовательно, снизить неравномерность нагрева стальных заготовок.

Ключевые слова: двухкамерная термическая печь, стальные заготовки, нагрев под термическую обработку, комбинирование топливных составляющих, качество нагрева

**Zinchenko** Vladimir, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automated Control by Technological Processes, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: elelna.zinchenko@mail.ru

**Ivanov** Viktor, Senior Staff Scientist of Metallurgy Department, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: vitas.1850@gmail.com

**Kayukov** Yuriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department Heating Engineering and Water Power Engineering, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: teplogidroenergetik@gmail.com

**Radchenko** Yuriy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Ecology, Heat-Transfer and Labour Protection, National Metallurgy Academy of Ukraine (Ukraine, Dnieper). E-mail: yu\_n\_radchenko@gmail.com

## DEVELOPMENT OF RATIONAL TECHNOLOGY FOR HEATING OF TWO-CELL THERMAL FURNACES

The analysis of quality of heating is executed for heat treatment of steel blanks at existent technology of heating of two-cell thermal furnaces mixture natural and domain gases. There is offered rational technology of their heating with combining of the mentioned fuel constituents, realization of which will allow to increase the volume expense of products of combustion during all cycle of heat treatment, and, consequently, to reduce the unevenness of heating of steel blanks. The wide turn-down of thermal power of furnaces during realization of the multi-stage temperature-sentinel modes of heat treatment of metal predetermines requirements to incineration of gaseous fuel for her different periods. During experimental researches studied distribution of temperature on length of working chamber, and also warming under heat treatment of purveyances from steel by the 4X5MΦ1C section of 370 x a 370 mm and by general mass 26,7 т. Distribution of temperature in steel purveyances was controlled by the use flexible hromel- alumel thermels, set on the surface of metal charge on long purveyances; control of temperature in the swept volume of furnace was executed by the stationary set temperature-sensitive element. The results of the executed researches allowed to draw conclusion about the necessity of stabilizing of the gas-dynamic mode of thermal furnace by the increase of by volume expense of foods of burning through the change of technology of her heating. The task of translation of furnaces of this type on heating with separate admission natural and domain gases, and also their subsequent combining immediately in front of gas-rings are examined. At that rate a management thermal power of thermal furnace is carried out by the simultaneous operating both on the regulators of expense of separate components of fuel for providing of the set temperature in her swept volume and on the regulator of volume of foods of burning in periods of self-control and cooling of metal. On a thermal furnace it is set the results of subsequent experiments, that during translation of her on separate admission natural and domain gases the overfall of temperature in the horizontal section of the swept volume of furnace goes down to 15-20 °C, and after length gardens of steel purveyances - to 25-30 °C. The complex of experimentally-calculation researches of thermal work of two-cell thermal heater is executed during

translation of her on a separate serve natural and domain gases, and also surplus air. Advantages of the offered method of heating of furnace of this type are shown.

Key words: two-cell thermal furnace, steel blans, heating for heat treatment, combining of fuel constituents, quality of heating

Стаття надійшла до редакції 27.09.2019 р.  
Рецензент, проф. І. Г. Яковлева