УДК 685.5.011 DOI: https://doi.org/10.26661/2071-3789-2021-1-09

Зінченко Володимир Юрійович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-9464-299X
Іванов Віктор Ілліч, старший науковий співробітник, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0001-8816-3506
Каюков Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-4311-4801
Румянцев Володислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-3182-2536

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВОЮ РОБОТОЮ ТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ КАМЕРНОГО ТИПУ

Під час використання локальних систем автоматичного регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища у робочому об'ємі полуменевої термічної печі камерного типу налагоди, як правило, вибирають незалежно одна від одної без урахування їх взаємозв'язку. В той же час за управлінням витратою палива та повітря змінюється не лише температура, але і тиск нагрівального середовища у робочому об'ємі печі, що, в свою чергу, супроводжується змінюванням газообміну з довкіллям та значно впливає на температуру в робочому об'ємі. Все це призводить до суттєвої перевитрати газоподібного палива, та, як наслідок, підвищення вартості термічної обробки металу. За використанням схеми опалювання з постійним об'ємом продуктів горіння у печах такого типу управління їх тепловою потужністю зводиться до комбінування різних компонентів газоподібного палива за умови забезпечення заданої температури нагрівального середовища у робочому об'ємі. За принципом динамічного програмування Беллмана оптимізацію управління за цикл термічної обробки металу забезпечують шляхом вибирання для кожного періоду квантування оптимального за вартістю складу вживаного палива. Поточна вартість палива є лінійною функцією середніх витрат його окремих компонентів у періоди квантування. Тому знаходження його мінімального значення для кожного дискретного моменту часу подавали як розв'язання задачі лінійного програмування. Розроблено алгоритм визначення раціональних значень витрат окремих компонентів газоподібного палива, а також витрати надлишкового повітря, котрі використовують як управляльні дії для автоматичних систем регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища у робочому об'ємі печей. Запропоновано функціональну схему автоматичної системи управління, реалізація якої дозволяє не лише оптимізувати технологію опалювання за вартістю окремих компонентів палива, але і шляхом самонастроювання забезпечити автономність управління температурою та надлишковим тиском нагрівального середовища у робочому об'ємі печей. Під час управління за режимом реального часу з оптимізацією щодо вартості окремих компонентів палива виконується самонастроювання системи управління.

Ключові слова: термічна піч камерного типу, робочий об'єм, нагрівальне середовище, температура, компоненти палива, надлишкове повітря, алгоритм управління, система оптимізації управління, функціональна схема

Вступ. Теплова робота полуменевих термічних печей камерного типу як об'єкту управління визначається рівнем температури та надлишкового тиску нагрівального середовища в її робочій камері. Задані значення зазначених параметрів забезпечують шляхом автоматичного регулювання з використанням локальних систем. Структуру та налагоди таких систем, як правило, вибирають незалежно одна від одної без урахування їх взаємозв'язку. В той же час за управлінням витратами палива та повітря змінюється не лише температура,

© В.Ю. Зінченко, В.І. Іванов, Ю.М. Каюков, В.Р. Румянцев, 2021

але і тиск у робочій камері печі, що, в свою чергу, супроводжується змінюванням газообміну з довкіллям і суттєво впливає на температуру в її робочій камері. Як наслідок, підвищується витрата палива, а також зростає вартість термічної обробки металу.

Постановка завдання. Завданням є зниження витрат на термічну обробку металу в печах камерного типу шляхом скорочення споживання паливних енергетичних ресурсів і підвищення якості управління тепловою роботою печей.

Головна частина досліджень. Регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища у робочій камері полуменевої термічної печі здійснюють безперервно протягом 20…40 год., що технологічно необхідно для реалізації заданого температурно-часового режиму обробки металу [1].

Відомо, що для печей камерного типу найбільш раціональною є схема опалювання з постійним об'ємом продуктів горіння [2]. У такому разі управління тепловою потужністю печі зводиться до комбінування різних компонентів газоподібного палива за умови забезпечення заданої температури у робочому об'ємі печі. Хоча процес комбінування компонентів палива є безперервним за часом, проте оптимізацію подібного управління доцільно виконувати з використанням багатокрокової дискретної моделі [3], що одержують шляхом квантування за часом, і вибиранням допустимих оптимальних управляльних дій на кожному кроці. Під час вибирання періоду квантування виходять з можливості оцінки змінювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища в робочій камері печі як регулювальних величин з технологічно допустимою точністю, а також витрат палива та повітря як регулювальних дій за їх середнім значенням у період квантування. Відомо, що для камерних печей залежно від їх теплової потужності та продуктивності період квантування складає 5…20 хв.

За розв'язанням задачі оптимізації регулювання двох параметрів (температури та надлишкового тиску нагрівального середовища) потрібною є наявність не менше двох управляльних дій. У зв'язку з цим технологію опалювання термічних печей камерного типу розглядають із застосуванням роздільного подавання декількох видів (компонентів) палива та наступного комбінування їх у процесі спалювання [4].

Використовуючи принцип динамічного програмування Беллмана [5], оптимізацію управління за цикл термічної обробки металу можна забезпечити шляхом вибирання для кожного періоду квантування оптимального за вартістю складу вживаного палива:

$$S_0\left[m\right] = \min\left\{\Delta\tau\sum_{k=1}^{n} C_k \cdot \overline{B}_{T_k}\left[m\right] + S_0\left[m-1\right]\right\}, \tag{1}$$

де $S_0\left[m\right]$ – загальна вартість опалювання за m періодів квантування; m – номер періоду квантування; $\Delta\tau$ – період квантування за часом; n – кількість компонентів палива під час комбінування його складу; C_k – вартість k-го компонента палива; $\overline{B}_{T_k}\left[m\right]$ – середня витрата k-го компонента палива за m-й період квантування; $S_0\left[m-1\right]$ – загальна вартість опалювання за (m-1)-й період квантування.

Поточна вартість $S_0\left[m-1\right]$ палива є лінійною функцією середніх значень витрати його окремих компонентів $\overline{B}_{T_k}\left[m\right]$ за m періодів квантування. Знаходження його мінімального значення для кожного дискретного моменту часу можна подати як розв'язання задачі лінійного програмування [6,7].

Так, під час опалювання печі сумішшю різних компонентів палива його поточну вартість за період квантування визначають таким чином:

$$S_T\left[m\right] = C_1 \cdot B_{T_1}\left[m\right] + C_2 \cdot B_{T_2}\left[m\right] + \ldots\ldots + C_n \cdot B_{T_n}\left[m\right], \tag{2}$$

де $B_{T_1}\left[m\right]$, $B_{T_2}\left[m\right]$, …, $B_{T_n}\left[m\right]$ – середня витрата окремих компонентів палива; C_1, C_2, …, C_n – ринкова вартість окремих відповідних компонентів.

Для загального випадку систему рівнянь-обмежень можна записати як

$$\sum_{k=1}^{n}\left[Q_н^p\right]_k \cdot B_{T_k}\left[m\right]+\alpha_n \cdot L_n\left[m\right]=q^{\bar{t}}\left[m\right]; \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{n}V_{0,k}\cdot B_{T_k}\left[m\right]+L_n\left[m\right]=V^{\bar{p}}\left[m\right]; \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{n}B_{T_k}\left[m\right]\le B_T^{\max}; \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^{n}L_{0,k}\cdot B_{T_k}\left[m\right]+L_n\left[m\right]\le L_n^{\max}, \tag{6}$$

де $\left[Q_н^p\right]_k$, $V_{0,k}$ – теплота згоряння *k*-го компонента палива та питомий обсяг продуктів горіння, що одержують під час його спалювання відповідно; a_n, $L_n\left[m\right]$ – питома ентальпія та витрата надлишкового повітря відповідно; $B_T^{\max}$, $L_n^{\max}$ – максимальна продуктивність пальникових пристроїв і пічного вентилятора відповідно; $q^{\bar{t}}\left[m\right]$, $V^p\left[m\right]$ – теплове навантаження та витрата продуктів горіння, що встановлюють регулятори температури та надлишкового тиску в робочій камері печі відповідно.

За такої постановки задача має вирішення у разі спільності системи рівнянь (3)-(6), коли згідно з теоремою Кронекера-Конелли ранг *z* основної матриці та розширеної матриці системи співпадають. Розв'язання подібних завдань зазвичай виконують симплекс-методом [8].

У термічних печах камерного типу, як правило, використовують газоподібне паливо, яке складається з високо- та низькокалорійних компонентів, що спалюють з коефіцієнтом витрати повітря α, значення якого в період витримки нерідко перевищує 1,2…1,5 [9].

У зв'язку з тим, що умова спільності рівнянь (3)-(6) виконується для компонентів палива з суттєво різною теплотою згоряння та хімічною природою розглядали комбінування зазначених компонентів палива, а також надлишкового повітря L_n.

Для такого випадку система рівнянь-обмежень набуває наступного вигляду:

$$\left[Q_н^p\right]^в \cdot B_T^в\left[m\right]+\left[Q_н^p\right]^н \cdot B_T^н\left[m\right]+a_n\cdot L_n\left[m\right]=q^{\bar{t}}\left[m\right]; \tag{7}$$

$$V_0^в \cdot B_T^в\left[m\right]+V_0^н \cdot B_T^н\left[m\right]+L_n\left[m\right]=V^{\bar{p}}\left[m\right]. \tag{8}$$

Мінімум функції вартості $S\left[m\right]_{\min}$ можна записати як

$$S\left[m\right]_{\min}=\Delta\tau\cdot C_T^в\cdot B_T^в\left[m\right]+\Delta\tau\cdot C_T^н\cdot B_T^н\left[m\right], \tag{9}$$

де $B_T^в\left[m\right]$, $B_T^н\left[m\right]$ – витрата високо- та низькокалорійного компонентів палива у період часу *m* відповідно; $\left[Q_н^p\right]^в$, $C_T^в$, $\left[Q_н^p\right]^н$, $C_T^н$ – теплота згоряння та вартість високо- та низькокалорійного компонентів палива відповідно.

Якщо $q^{\bar{t}}\left[m\right]\ge\left[Q_н^p\right]^н\cdot B_{T_{\max}}^н\left[m\right]$, де $B_T^н\left[m\right]$ – максимально можлива витрата низькокалорійного компонента палива, що задовольняє умові (5), то оптимальне розв'язання буде за $L_в\left[m\right]=0$.

У разі недостачі теплової енергії у робочому об'ємі термічній печі виконують заміну низькокалорійного компонента палива на еквівалентну за обсягом продуктів горіння кількість його висококалорійного компонента.

Тоді значення параметрів $B_T^н\left[m\right]$ і $B_T^в\left[m\right]$ визначають за наступними формулами:

$$B_T^н\left[m\right]=\frac{\left[Q_н^p\right]^в\cdot V_0\left[m\right]-q^{\bar{t}}\left[m\right]\cdot V_0^в\left[m\right]}{\left[Q_н^p\right]^в\cdot V_0^н\left[m\right]-\left[Q_н^p\right]^н\cdot V_0^в}; \tag{10}$$

$$B_T^в\left[m\right]=\frac{q^{\bar{t}}\left[m\right]\cdot V_0^н\left[m\right]-\left[Q_н^р\right]^н\cdot V_0\left[m\right]}{\left[Q_н^р\right]^в\cdot V_0^н\left[m\right]-\left[Q_н^р\right]^н\cdot V_0^в}. \quad (11)$$

За наявності у печі надлишкової кількості теплоти її знижують шляхом розбавлення низькокалорійного компонента палива еквівалентною за обсягом продуктів горіння кількістю надлишкового повітря.

Для цього разу значення $B_T^н\left[m\right]$ и $L_n\left[m\right]$ обчислюють з використанням співвідношень

$$B_T^н\left[m\right]=\frac{q^{\bar{t}}\left[m\right]-V_0\left[m\right]\cdot a_n}{\left[Q_н^р\right]^н-V_0^н a_n}; \quad (12)$$

$$L_n\left[m\right]=\frac{\left[Q_н^р\right]^н\cdot V_0\left[m\right]-q^{\bar{t}}\left[m\right]\cdot V_0^н\left[m\right]}{\left[Q_н^р\right]^н-V_0^н\cdot a_n}. \quad (13)$$

На відміну від симплекс-методу, який припускає за результатами аналізу змінювання функції (9) перехід від одного припустимого базисного вирішення до іншого, в цьому разі є можливим спрощення процедури пошуку оптимальних значень витрат $B_T^н\left[m\right]$, $B_T^в\left[m\right]$, $L_n\left[m\right]$ шляхом зіставлення значення поточної величини $q^{\bar{t}}\left[m\right]$ з максимальним значенням добутку $B_{T\max}^н\cdot\left[Q_н^р\right]^н$. Такий алгоритм легко реалізується під час використання системи оптимізації з обмеженими обчислювальними можливостями.

Автоматичне регулювання подавання компонентів газоподібного палива та надлишкового повітря виконують з використанням програми контролера, розробленої на підставі алгоритму управління (рис. 1).

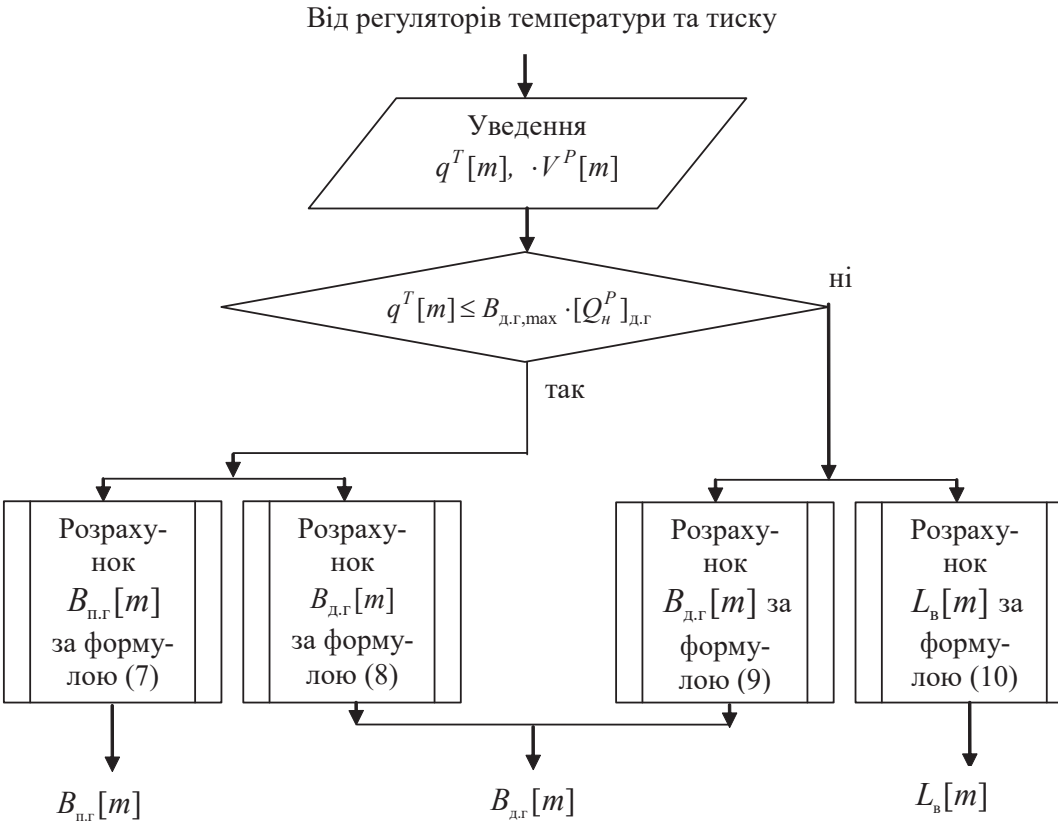

Рисунок 1 – Блок-схема обчислення оптимальних значень витрати природного та доменного газу, а також витрати надлишкового повітря

Запропонована блок-схема вміщує:

– блок уведення поточної та заданої $T_n^{зад}(\tau)$ температури у печі для реального масштабу часу, витрати палива $B_{пг}$, $B_{дг}$, а також надлишкового повітря $L_n^{надл}$;

– блок перевірки досягнення поточною температурою печі $T_n(\tau)$ заданого значення $T_n^{зад}(\tau)$ і завершення температурно-часового режиму обробки металу $T_n^{зад}(\tau_k)$;

– блок підпрограми регулятора температури;

– блок підпрограми змінювання витрати паливних компонентів у разі зменшення або збільшення теплової потужності печі;

– блок перевірки досягнення значень граничних витрат $B_{пг}$, $B_{дг}$ та змінювання витрати відповідних паливних компонентів.

На рис. 2 наведено функціональну схему системи автоматичної оптимізації регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища в робочому об'ємі термічної печі камерного типу. У схемі прийнято такі позначення: $P_n^{зад}(\tau)$, $T_n^{зад}(\tau)$, $P_n(\tau)$, $T_n(\tau)$ – задані згідно з технологічними інструкціями термічної обробки металу та поточні значення надлишкового тиску й температури нагрівального середовища в печі як функції часу; $B_T^{вк}(\tau)_{зад}$, $B_T^{вк}(\tau)$, $B_T^{нк}(\tau)_{зад}$, $B_T^{нк}(\tau)$, $L_n(\tau)_{зад}$, $L_n(\tau)$ – відповідно задані та поточні значення витрати паливних компонентів і надлишкового повітря, що подають у пальникові пристрої.

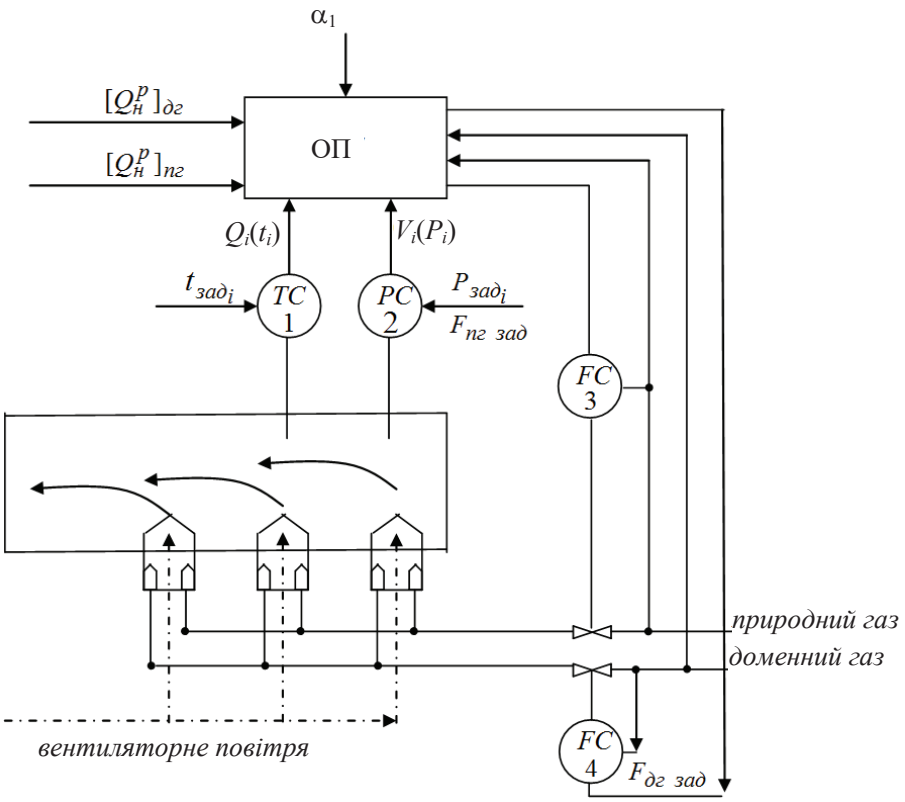

Рисунок 2 – Схема реалізації управління режимом опалювання термічної печі з використанням природного та доменного газів, а також надлишкового повітря за їх роздільного подавання

На рис. 2 наведено функціональну схему системи автоматичної оптимізації регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища в робочому об'ємі термічної печі камерного типу. У схемі прийнято такі позначення: $P_n^{зад}(\tau)$, $T_n^{зад}(\tau)$, $P_n(\tau)$, $T_n(\tau)$ – задані згідно з технологічними інструкціями термічної обробки металу

та поточні значення надлишкового тиску і температури нагрівального середовища у печі як функції часу; $B_T^{\text{вк}}(\tau)_{\text{зад}}$, $B_T^{\text{вк}}(\tau)$, $B_T^{\text{нк}}(\tau)_{\text{зад}}$, $B_T^{\text{нк}}(\tau)$, $L_n(\tau)_{\text{зад}}$, $L_n(\tau)$ – відповідно задані та поточні значення витрати паливних компонентів і надлишкового повітря, що подають у пальникові пристрої.

Застосування одних і тих же дій, значення яких обчислюють з використанням рівнянь (3)-(6), під час управління температурою та надлишковим тиском нагрівального середовища в робочій камері термічної печі зумовлює незалежність функцій $T_n(\tau)$ і $P_n(\tau)$ одна від одної, що забезпечує автономність управління зазначеними параметрами у разі змінювання $T_n^{\text{зад}}(\tau)$ і $P_n^{\text{зад}}(\tau)$. Під час управління процесом за режимом реального часу з оптимізацією за вартістю окремих компонентів палива виконується самонастроювання системи [10].

Висновки. Запропоновано алгоритм для визначення раціональних значень управляльних дій в автоматичних системах регулювання температури та надлишкового тиску нагрівального середовища в робочому об'ємі термічних печей камерного типу, що дає змогу не тільки оптимізувати технологію опалювання за вартістю окремих компонентів палива, але і шляхом самонастроювання забезпечити автономність управління температурою та надлишковим тиском нагрівального середовища в робочій камері печей камерного типу.

Бібліографічний перелік

1. Ревун М.П., Зинченко В.Ю., Лютый А.П. Оптимизация низкотемпературного нагрева в пламенных печах. *Теория и практика металлургии*. 2005. № 1–2(44–45). С. 60–63.
2. Деклараційний. патент України № 1614. Спосіб опалення камерних газових печей М.П. Ревун, В.Ю. Зінченко, О.П. Лютий; Заявл. 27.02.2006; опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.
3. Умнов А.Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра. 3-е изд. Москва : МФТИ, 2011. 368 с.
4. Ревун М.П., Гранковский В.И. Автоматическое управление нагревом металла. Киев : Техника, 1973. 138 с.
5. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton University Press. Princeton. NJ. USA. 2010. 350 p.
6. Банди Б. Основы линейного программирования. Москва : Радио и связь, 1989. 176 с.
7. Прасолов В.В. Задачи и теоремы линейной алгебры. Москва : Наука, 1996. 304 с.
8. Хемди А. Введение в исследование операций. Москва : Вильямс, 2007. 912 с.
9. Ревун М.П., Потапов Б.Б., Ольшанский В.М., Бородулин А.В. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии. Запорожье : ЗГИА, 2002. 443 с.
10. Ревун М.П., Зинченко В.Ю., Иванов В.И., Чепрасов А.И. Управление температурой и давлением в термической печи камерного типа. Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов научно-практ. конф. (ММТТ-27). Т. 2. Тамбов: изд. ТПУ, 2014. С. 91–95.

References

1. Revun M.P., Zinchenko V.Yu., Lyutyy A.P. Optimizatsiya nizkotemperatyrnogo nagreva v plamennykh pechakh. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2005. No 1–2(44–45). S. 60–63.
2. Deklaratsionnyy patent Ukrainy No 1614. Sposib opalennya kamernykh gazovykh pechey. M.P. Revun, V.Yu. Zinchenko, O.P Lyutyy; Zayavl. 27.02.2006; opubl. 17.07.2006. Byul. No 7.
3. Umnov A.E. Analiticheskaya geometriya i lineynaya algebra. 3-e izd. Moskva : MFTI, 2011. 368 s.
4. Revun M.P., Grankovskiy V.I. Avtomaticheskoe upravlenie nagrevom metalla. Kiev : Tekhnika, 1973. 138 s.
5. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton University Press. Princeton. NJ. USA. 2010. 350 p.
6. Bandi B. Osnovy lineynogo programmirovaniya. Moskva : Radio i svyaz', 1989. 176 s.
7. Prasolov V.V. Zadachi i teoremy lineynoy algebry. Moskva : Nauka, 1996. 304 s.
8. Khemdi A. Vvedenie v issledovanie operatsiy. Moskva : Vil'yams, 2007. 912 s.

9. Revun M.P., Potapov B.B., Ol'shanskiy V.M., Borodulin A.V. Vysokotemperaturnye teplotekhnologicheskie protsessy i ustanovki v metallurgii. Zaporozhe : ZGIA, 2002. 443 s.

10. Revun M.P., Zinchenko V.Yu., Ivanov V.I., Cheprasov A.I. Upravlenie temperaturoy i davlniem v termicheskoy pechi kamernogo tipa. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov nauchno-prakt. konf. (MMTT-27). T. 2. Tambov : izd. TPU, 2014. S. 91–95.

Zinchenko Volodymyr, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0002-9464-299X

Ivanov Viktor, senior staff scientist, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0001-8816-3506

Kayukov Yurii, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0003-4311-4801

Rumyancev Volodyslav, associate professor, candidate of technical science, Zaporozhe national university. ORCID: 0000-0003-3182-2536

ENGINEERING DESIGN ALGORITHM BY THERMAL WORK FOR THERMAL FURNACES OF CHAMBER TYPE

At the use of the local systems of automatic control for temperature and sur-plus pressure of warming medium in the working volume of flaming thermal furnace of chamber type of their tuning, as a rule, choose independent of each other without the account of their intercommunication. At the same time at a controlling the expense of fuel and air not only a temperature but also pressure changes in the working chamber of furnace, that, in turn, accompanied by the change of interchange of gases with an medium and renders considerable influence on a temperature in a working chamber. All of it is accompanied by the substantial overrun of gaseous fuel, and, as a result, appreciation of value of heat treatment of metal. At the use of chart of heating with the permanent volume of foods of burning in the furnaces of such type a controlling by thermal power is taken to combining of different components of gaseous fuel on condition of providing of the set temperature in the working volume. On principle of the dynamic programming for Bellman optimization of management for the cycle of heat treatment of metal was provided by a choice for every period of quantum of optimal on a cost composition of the applied fuel. The present value of fuel serves is the linear function of middle charges of its separate components in periods of quantum and determination of its minimum value for every discrete moment of time presented as a decision of task of the linear programming. The algorithm of determination is worked out for gaseous fuel separate components charges optimal values and also expense of surplus air, used as managing influences for the automatic systems of control of temperature and surplus pressure of warming medium in the working volume of furnaces. The functional diagram of automatic control system, realization of which allows not only to optimize technology of heating on the cost of separate components of fuel, but also by self-tune to provide the noninteraction of controlling a temperature and surplus pressure of warming medium in the working chamber of furnace of chamber type is offered. In the process of management real-time with optimization on the cost of separate components of fuel the self-tune of the system is executed.

Keywords: thermal furnece of chamber type, working volume, warming medium, temperature, surplus pressure, components of fuel, surplus air, algorithm

Стаття надійшла: 31.03.2021 р.