

УДК 621.771А22

**Б.В. Гавриленко, С.В. Нєсжмаков, І.В. Скоробогатова**  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
кафедра гірничої електротехніки і автоматики  
E-mail: [kitagea@rambler.ru](mailto:kitagea@rambler.ru)

## ПИТАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ТОМИЛЬНІЙ ЗОНІ МЕТОДИЧНОЇ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

### *Анотація*

*Гавриленко Б.В., Нєсжмаков С.В., Скоробогатова І.В. Питання стабілізації температурного режиму в томильній зоні методичної нагрівальної печі. Проаналізовано вплив основних чинників на встановлення заданого температурного режиму в томильній зоні методичної нагрівальної печі (МНП). Запропоновано рішення відносно реструктуризації діючої системи автоматичного управління температурним режимом в томильній зоні МНП та підвищення якості нагріву металу за рахунок ефективного використання співвідношення «паливо-повітря».*

*Ключові слова:* методична нагрівальна піч, температурний режим, витрата, мнозв'язна система, модель, якість, стабілізація.

### **Загальна постановка проблеми.**

Теплова обробка слябу в методичній зоні характеризується зростанням теплового потоку в напрямку руху металу до зварювальної зони МНП. Далі вирівнювання температур по перетину заготовки металу проходить в томильній зоні печі.

При роботі МНП для кожної марки сталі і для кожного виду обробки тиском задається певний діапазон температур, за межами якого нагрів є неприпустимим [1].

Однією з необхідних вимог є отримання мінімального кінцевого перепаду температур по перетину заготовки металу для запобігання виникнення браку, викликаного незавершеністю структурних перетворень по всій товщині слябу.

Некоректно підібраний температурний режим в томильній зоні характеризується неоднаковим тепловмістом по перетину слябу, і при обробці тиском на прокатному стані 2300 приводить до сильнішого витягування ділянок матеріалу слябу по довжині заготовки, а по ширині – до скручування, при цьому має місце деформація металу. Внаслідок цього відпалюваний виріб не володіє якісними характеристиками, відміченими в технологічній карті процесу нагріву слябів.

Якість листового прокату залежить від ефективності протікання заданого технологічного процесу нагріву слябу в томильній зоні МНП. Дослідження температурних режимів для позначення впливу на техніко-економічні показники (витрату природного газу, продуктивність МНП та ін.) і вибір раціонального температурного режиму представляють важливе теоретичне і практичне значення [2].

### **Постановка задачі дослідження.**

В наступний час диференційований нагрів забезпечує отримання слябів заданої якості в залежності від сортаменту. На встановлення нормального температурного режиму в кожній зоні МНП впливають теплофізичні параметри кожної партії слябів, температурний режим нижньої і верхньої зварювальних зон, швидкість переміщення слябів уздовж печі і продуктивність МНП [4].

В томильній зоні МНП, обладнаної дуттєвими пальниками типу «труба в трубі», зміна теплового навантаження визначається зміною витрати палива з подальшою зміною витра-

ти повітря або зміною витрати повітря з подальшою зміною витрати палива [5]. Разом з тим, значна інерційність каналів витрати повітря і палива в перший момент регулювання впливає на відхилення температури робочого простору в томильній зоні МНП від заданого значення ( $t_{tz} \geq 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Ефективність використання природного газу визначається формуванням співвідношення «паливо-повітря» через коефіцієнт  $k_{Bg/Bv}$ . При коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 0,85 - 0,9$  виключається можливість подачі в зону зайвої кількості палива ( $Bg \geq 660 \text{ м}^3 / \text{год}$ ), повне згорання якого відбуватиметься в рекуператорі МНП. Однак тепло від згорання палива недостатньо повно засвоюється тілом слябу. Не засвоєна частина тепла віддається у вигляді температури димових газів ( $t_d' = 60..1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [6].

Для повернення в зону нагріву частини втраченого тепла застосовується додатковий нагрів атмосферного повітря, що поступає до рекуператору МНП. Фізичне тепло атмосферного повітря збільшує приходну складову теплового балансу, а внаслідок цього, кількість природного газу, необхідного для забезпечення заданого температурного режиму потрібно менш за попереднє значення витрати палива. Тобто ефективності спалювання природного газу сприяє температура підігріву повітря в рекуператорі ( $t_v'' = 250..400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [7].

Недостатня подача повітря в зону горіння або надмірне його надходження, внаслідок сильного впливу люфтів в зчленуваннях виконавчих механізмів з поворотними засувками на зональних повітропроводах, призводить до зниження запасу стійкості системи автоматичного управління температурним режимом в томильній зоні МНП, тобто до перевитрати палива [8].

Для економічного спалювання палива в пальниках печі система управління повинна забезпечувати стабілізацію температури робочого простору в томильній зоні МНП в автоматичному режимі.

#### **Рішення задачі та результати дослідження.**

МНП представляє многозв'язний об'єкт з нелінейними залежностями [9]. Розглянемо структуру печі як двумірний об'єкт з перехресним зв'язком «томильна зона – рекуператор», у якого входи і виходи впливають один на одного, що приводить до взаємозалежності каналів витрати палива і витрати повітря. Вирішимо задачу стабілізації температурного режиму в томильній зоні методом синтезу регуляторів для двумірного об'єкту.

Розробка двурівневої многозв'язної системи автоматичного управління температурним режимом в томильній зоні МНП дозволить одночасно підстроювати систему до зміни співвідношення «паливо-повітря» і виключити запізнювання кожної з управляючих ланок. Стабілізація температури робочого простору в томильній зоні  $t_{tz}$  забезпечить рівномірний прогрів слябів до заданої технологічним процесом температури  $t_s$ .

Об'єм природного газу  $V_g$  з урахуванням його поточних компонентів  $V_{H_2}$ ,  $V_{CO}$ ,  $V_{CH_4}$ ,  $V_{C_2H_4}$ ,  $V_{CO_2}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{H_2O}$  і об'єм повітря  $V_a$ , відповідно  $V_{N_2}$ ,  $V_{O_2}$ , коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  з урахуванням температури підігріву повітря  $t_v''$  утворюють димові гази в нижньої і верхньої зварювальних зонах, і в томильній зоні МНП при згоранні одиниці палива наступного складу  $V_d$ :  $V_{CO_2}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{H_2O}$ ,  $V_{CO}$  [7]. Фізичне тепло атмосферного повітря з рекуператора впливає на засвоєння тепла матеріалом слябу. Вплив температури димових газів  $t_v''$  на значення температури підігріву повітря  $t_d'$  показан на рисунку 1. Система рівнянь теплового балансу, яка описує процес нагріву металу в томильній зоні МНП і підігріву атмосферного повітря, що йде до рекуператора МНП, має вид (1):

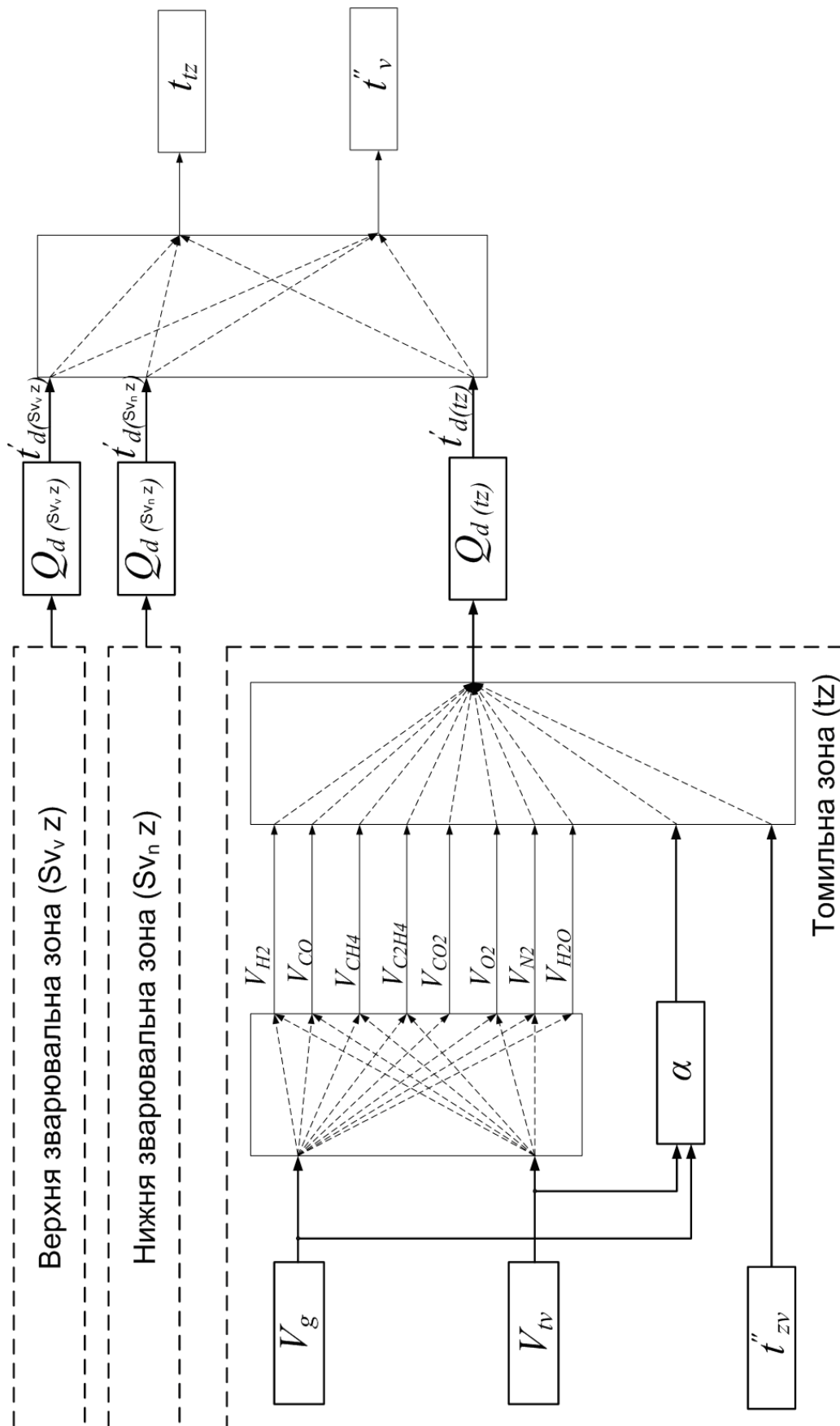


Рисунок 1 – Структура моделі встановлення температурного режиму в томильній зоні МНП

$$\begin{cases} Q_n^r + \alpha \cdot V_\alpha \cdot (c \cdot t_V'' - c \cdot t_V') = M \cdot c \cdot \frac{dt_s}{d\tau} + (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot t_d'' - \alpha \cdot V_\alpha \cdot c \cdot t_V' \\ V_\alpha \cdot (c \cdot t_V'' - c \cdot t_V') = (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot (t_d' - t_d'') \cdot \eta_V \end{cases}$$

де  $Q_n^r$  – теплота, що виділилася при згоранні палива,  $ккал/м^3$ ;  $Q_f^v$  – теплота, що вноситься зовнішнім повітрям,  $ккал/м^3$ ;  $Q_d$  – кількість тепла, що йде з димовими газами з нижньої зварювальної, верхньої зварювальної і томильної зони,  $ккал/м^3$ ;  $m$  – маса заготовки,  $кг$ ;  $i(t)$  – ентальпія  $ккал/м^3$ ;  $c$  – теплоємність,  $ккал/(кг^0C)$ ;  $t_s$  – температура слябу,  $^0C$ ;  $\eta_V = 0,95 - 0,99$ .

Перетворимо вираз (1):

$$\begin{cases} M \cdot \frac{di(t)}{d\tau} = Q_n^r + \alpha \cdot V_\alpha \cdot i_V'' - V_d \cdot i_d''(t) \\ V_\alpha \cdot (i_V''(t) - i_V'(t)) = \alpha \cdot (M \cdot \frac{di(t)}{d\tau} - Q_n^r + V_d \cdot i_d''(t)) - V_\alpha \cdot i_V'(t) \end{cases} \quad (2)$$

В якості параметрів двумірного об'єкту, що регулюються є температура підігріву повітря в рекуператорі і температура в томильній зоні МНП. Управляючими змінними є витрата палива, витрата повітря, враховуючи в співвідношенні коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ . На підставі розробленої моделі двумірного об'єкту з перехрестним зв'язком (див. Рис. 2), запишемо наступні непереривні передатні функції.

Рекуператор

$$W_{11}(p) = \frac{y_1}{x_1} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5$$

Томильна зона

$$W_{22}(p) = \frac{y_2}{x_2} = W_6 \cdot W_7 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{10}$$

Зв'язок «рекуператор – томильна зона»

$$W_{12}(p) = \frac{y_2}{x_1} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_9 \cdot W_{10}$$

Зв'язок «томильна зона – рекуператор»

$$W_{21}(p) = \frac{y_1}{x_2} = W_6 \cdot W_7 \cdot W_8 \cdot W_4 \cdot W_5$$

Елементи з передатними функціями  $W_{12}$  і  $W_{21}$  є елементами зв'язку. Вхідні і вихідні величини квантуються синхронно з тактом квантування  $T_0=4$  с. Отримаємо, застосовуючи z-перетворення, відповідні дискретні передавальні функції вказаних елементів відносно квантователів:

$$\begin{aligned} W_{11}(z) &= \frac{y_1(z)}{x_1(z)} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot W_5(z); \\ W_{22}(z) &= \frac{y_2(z)}{x_2(z)} = W_6 \cdot W_7 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{10}(z); \\ W_{12}(z) &= \frac{y_2(z)}{x_1(z)} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_9 \cdot W_{10}(z); \\ W_{21}(z) &= \frac{y_1(z)}{x_2(z)} = W_6 \cdot W_7 \cdot W_8 \cdot W_4 \cdot W_5(z). \end{aligned} \quad (3)$$

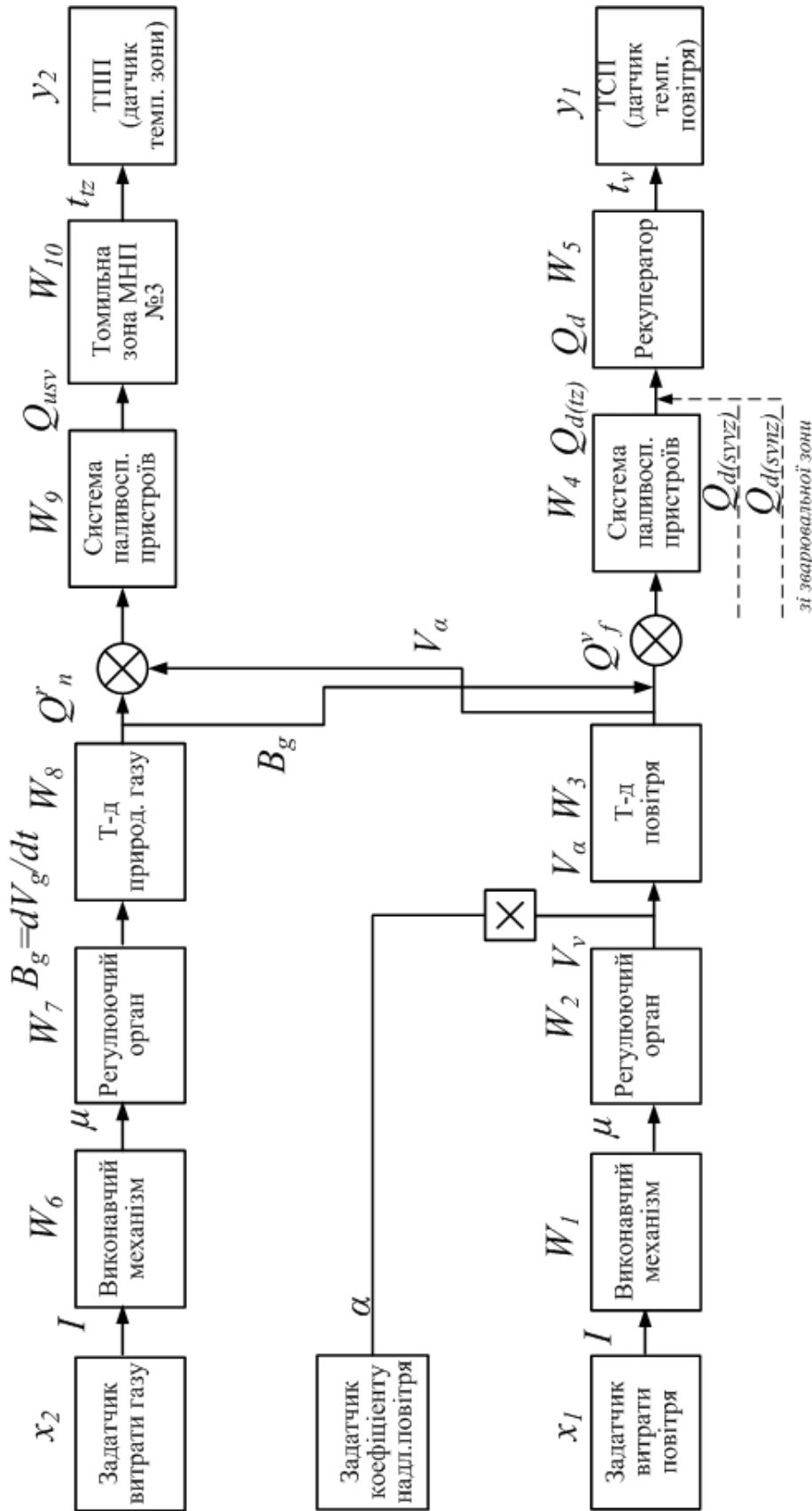


Рисунок 2 - Модель двувимірного об'єкту з перехрестним зв'язком

Запишемо вираз (3) в матричній формі за допомогою матриці  $W(z)$  :

$$\begin{bmatrix} y_1(z) \\ y_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11}(z) & W_{21}(z) \\ W_{12}(z) & W_{22}(z) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Перехідні процеси по встановленню температури в робочому просторі томильної зони МНП і температури підігріву повітря в рекуператорі представлені на рисунку (3) і (4) відповідно.

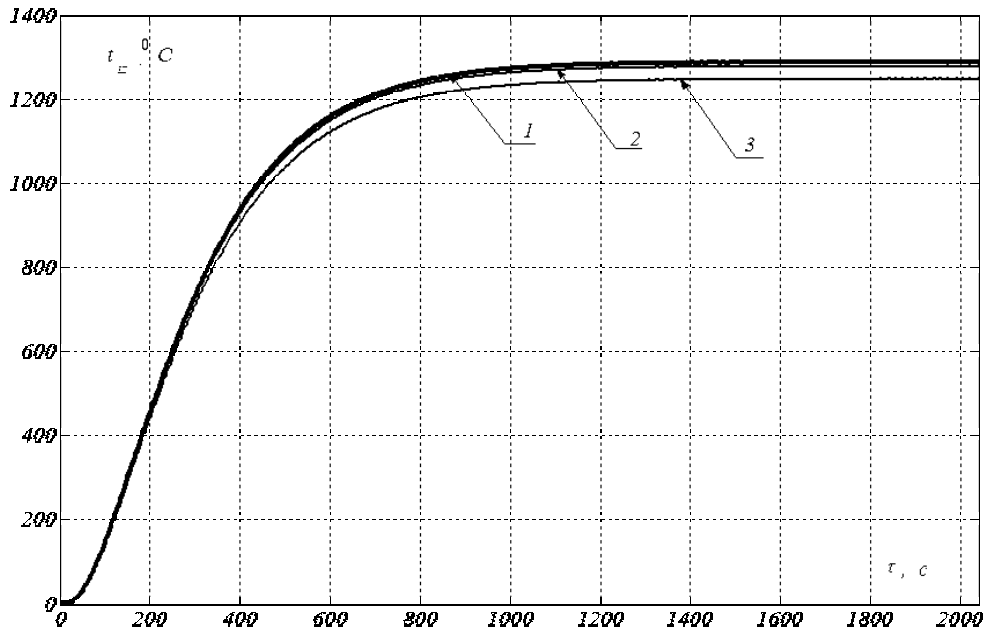


Рисунок 3 - Перехідний процес по встановленню температури в робочому просторі томильної зони МНП в заданому діапазоні

(1 –  $Bg = 660 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; 2 –  $Bg = 600 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; 3 –  $Bg = 400 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; )

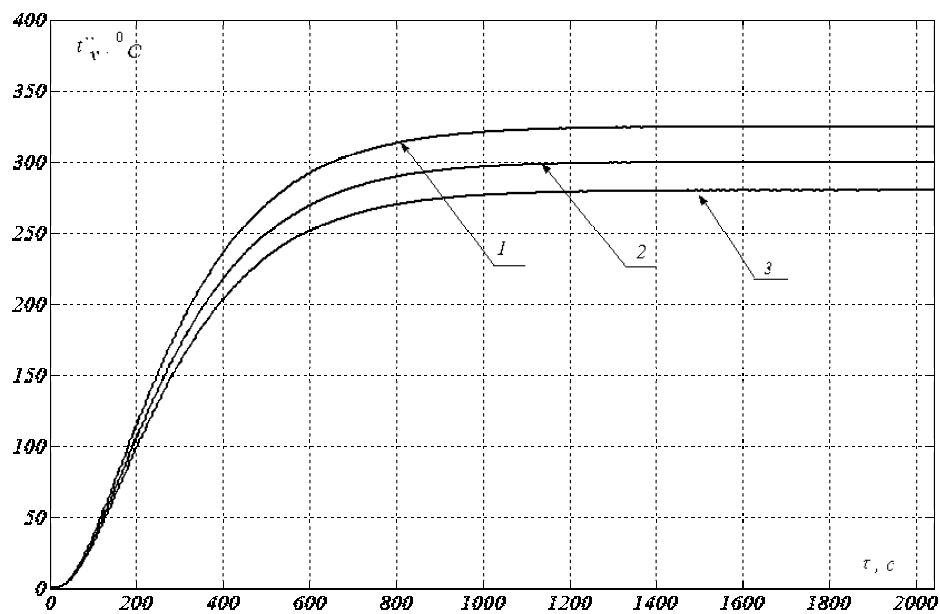


Рисунок 4 - Перехідний процес по встановленню температури повітря в рекуператорі МНП в заданому діапазоні

(1 –  $Bg = 660 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; 2 –  $Bg = 600 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; 3 –  $Bg = 400 \text{ м}^3 / \text{год}$ ; )

Перехідні характеристики двомірного об'єкту (див. Рис. 3, 4) отримані моделюванням процесу нагріву заготовки металу ст.40 в томильній зоні МНП: при подачі на входи витрати палива в діапазоні від 400 до 660  $m^3/год$ , витрати повітря в діапазоні від 3172 до 5234  $m^3/год$ ,  $\alpha = 0,9$ ,  $k_{Bg/Bv} = 7,93$ ,  $T_{mod} = 34$  хв. Проаналізуємо вплив витрати природного газу на встановлення заданого температурного режиму в томильній зоні МНП. Результати моделювання зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження температурного режиму в томильній зоні МНП

№ характеристики (рис. 3, 4)	$B_g, m^3/год$	$t_{tz}, ^\circ C$	$t_v'', ^\circ C$
1	400	1250	280
2	644	1280	300
3	660	1290	325

Аналіз температурних режимів в середовищі MATLAB доказує зростання температури в томильній зоні МНП з одночасним зростанням температури димових газів, які характеризують параметри нагріву повітря, що поступає до рекуператора (2).

Внаслідок дії перехресного зв'язку «томильна зона – рекуператор» температура димових газів, що йдуть з нижньої і верхньої зварювальних зон, а також томильної зони до рекуператору, теж підвищується. А це впливає на значення температури повітря, що проходить через рекуператор. Отже температура атмосферного повітря після рекуператора становить більше значення, тобто 325  $^\circ C$  (рисунок 4, характеристика 3). Перехідна характеристика 2 дозволяє отримати раціональний температурний режим в робочому просторі томильної зони МНП. Разом з тим, на ефективність нагріву заготовки металу, виникнення браку при обробці тиском і випуском неякісного листового прокату впливає значний час встановлення температури робочого простору томильної зони МНП ( $t = 16,67$  хв.) при  $T_{mod} = 34$  хв.

#### Висновки.

1. На основі класичного методу досліджена та розроблена модель нагріву слябів в МНП як двомірного об'єкту управління.

2. Досліджені перехідні процеси по встановленню температури в робочому просторі томильної зони МНП і температури підігріву повітря в рекуператорі, які показують залежність температури нагріву повітря в рекуператорі від температури димових газів із зон нагріву і витримки, і поліпшують енергетичні характеристики використання природного газу.

3. Оскільки якість протікання температурного режиму в томильній зоні МНП характеризується високою точністю за відсутності перехідного процесу з перерегулюванням, в зоні цього типу необхідно застосовувати ПІ і ПІД - регулятори. Задатчики витрати повітря і газу на основі діючого стану об'єкту одночасно будуть формувати завдання для локальних регуляторів [10].

4. Реалізація способу з перехресними зв'язками дозволить за рахунок випереджувального розрахунку характеристик палива і повітря здійснити стабілізацію температури в робочому просторі томильної зони МНП.

5. Стабілізація параметрів газу і повітря горіння дозволить поліпшити вплив обурень в томильній зоні МНП. В іншому випадку це приводить до перегріву металу і порушенню режиму термообробки. Аналіз теплових законів дозволяє дослідити рівень стабілізації температурного режиму в томильній зоні МНП, а внаслідок цього і якість нагріву злитка.

#### Література

1. Буглак Л. И., Вольфман И. Б., Ефроймович С. Ю., Захаров Г. К., Климовицкий М. Д. Автоматизация методических печей [учеб. пособие] / М. Д. Климовицкий. – М.: Металлургия, 1981. – 195 с.
2. Липухин Ю. В, Булатов Ю. И. Автоматизация основных металлургических процессов [учеб. пособие] / Ю. В. Липухин. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.

3. Каплан В. Г. Наладка и эксплуатация печей для нагрева металла [учеб. пособие] / В. Г. Каплан – М.: Металлургия, 1990. – 398с.
4. Розенгарт Ю. И., Потапов Б. Б. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах [учеб. пособие] / Ю. И. Розенгарт– Киев, Донецк: Высшая школа, 1986. – 296с.
5. Полухин П. И., Федосов Н.М.. Прокатное производство [учеб. пособие] / П. И. Полухин – М.: Металлургия, 1982. – 696с.
6. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. И. Методические нагревательные печи [учеб. пособие] / Н. Ю. Тайц. – М.: Металл, 1964. – 408 с.
7. Кривандин В. А. Теплотехника металлургического производства [учеб. пособие] / В. А. Кривандин. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
8. Солодовников В. В. и др. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования [учеб. пособие] / В. В. Солодовников. – М.: Машиностроение, 1985. – 534 с.
9. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер с англ. [учеб. пособие] / И. М. Макарова – М.: Мир, 1984. – 541с., ил.
10. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования [учеб. пособие] / В. А. Бессекерский– М.: Наука, 1975. – 768 с.

#### **Аннотация**

**Гавриленко Б.В., Неержмаков С.В., Скоробогатова И.В. Вопросы стабилизации температурного режима в томильной зоне методической нагревательной печи.** Проанализировано влияние основных факторов на установление заданного температурного режима в томильной зоне методической нагревательной печи (МНП). Предложено решение относительно реструктуризации действующей системы автоматического управления температурным режимом в томильной зоне МНП и повышение качества нагрева металла за счет эффективного использования соотношения топливо-воздух.

**Ключевые слова:** методическая нагревательная печь, температурный режим, расход, многосвязная система, модель, качество, стабилизация.

#### **Abstract**

**Gavrilenko B.V., Neerzhmakov S.V., Skorobogatova I.V. Questions of the stabilization temperature modes in the malleabilizing zone of continuous heating furnace.** The influence of basic factors to establishment for assigned temperature modes in the malleabilizing zone of continuous heating furnace (CHF) is analyzed. The decision for conversion system for automatic control temperature modes in the malleabilizing zone of CHF and improvement of the quality of heating metal for the effective use of relationship fuel-air is proposed.

**Keywords:** continuous heating furnace, temperature modes, expense, multiconnected system, model, quality, stabilization.

Здано в редакцію:  
01.04.10р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Кравцов В.В.