

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНО-РЕВЕРСИВНОГО СПОСОБУ ОПАЛЕННЯ КАМЕРНИХ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПЕЧЕЙ

<sup>1</sup>Запорізька державна інженерна академія

*Запропонована методика розрахунку визначення тривалості імпульсів і пауз при подачі палива і повітря в період витримки металу в камерній термічній печі. У результаті розрахунків визначено час термообробки металу і сумарна витрата палива за весь період термообробки.*

*Виконаний аналіз енергоефективності запропонованого та існуючих способів опалення.*

**Ключові слова:** термічна піч, імпульс, пауза, повернення.

### Вступ

Сьогодні одним з найважливіших завдань розвитку промисловості є скорочення витрат природного газу. Споживання газу на одиницю продукції в Україні більш ніж в 1,5 рази перевищує цей показник у промисловості країн ЄС, а витрати на енергоресурси у собівартості металургійної продукції досягають 45 %.

Нагрівальні пристрої, призначені для термічної обробки металу, є одним з основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів. Тому вирішення питання підвищення продуктивності печі та ефективного використання палива є актуальним.

Зниження споживання теплоносія не повинно погіршувати якість нагріву металу в термічних печах. З'являється необхідність удосконалення способів опалення при термічній обробці металу, які забезпечують мінімізацію витрат палива і не приводять до погіршення якості металу. Зниження енерговитрат багато в чому залежить від тривалості витримки, яка, в свою чергу, визначається рівномірністю температурного поля садки.

Рівномірність температурного поля садки в камерних термічних рециркуляційних печей залежить від характеру температурного поля в робочому просторі печі. Управління рециркуляційним контуром різними способами опалення, а також схема розміщення пальників і сопел впливають на формування температурного поля робочого простору печі і садки металу. Тому завдання визначення температурних полів як газового середовища, так і садки повинна бути розглянута комплексно. Розв'язання такого роду задач часто проводилося з припущенням рівномірності температури газового середовища. Однак в робочому просторі камерних термічних печей з підподою топкою спостерігаються зони з підвищеною і зниженою температурою газового середовища. Тому вирішення завдань нагрівання металу з урахуванням нерівномірності температурного поля газового середовища, на формування якого впливають способи опалення, є актуальними.

### Постановка завдання

На сьогодні для вирішення проблем, що виникають під час витримки, застосовують імпульсний спосіб подачі палива. Він дозволяє за зменшених теплових навантажень зберегти максимальні миттєві витрати продуктів згоряння, а, отже, їх швидкості і перемішування.

Однак за однонаправленого руху газів з використанням імпульсної подачі спостерігається перепад температури між вхідним і вихідним каналами топки. При багаторядній садці спостерігається також перепад температури по висоті печі.

Пропонується цю проблему вирішити за допомогою керування швидкістю продуктів згоряння, напрямком їх руху, а отже управлінням теплообміну в робочому просторі термічної печі [1].

Для порівняння якості теплової роботи печі за схемами, наведеними в [2], необхідно розробити математичну модель, в основу якої буде покладено вирішення завдання спряженого теплообміну в печі.

У математичній моделі необхідно визначити: час нагрівання і витримки, тривалості імпульсу і паузи подачі палива, витрата палива на піч, що в свою чергу, в подальшому, дозволить виконати чисельний розрахунок температури гріючого середовища і температурного поля перетину садки.

## Результати роботи

Випробування імпульсного опалення на камерній термічній печі з нерухомим подом виконують з постійною тривалістю періодів «імпульс-пауза»  $\tau_n$ . Для цього випадку кількість тепла, що поглинається металом за час  $\tau_n$  у разі звичайного опалення таке [3]:

$$\Delta Q_n = \int_{\tau}^{\tau+\tau_n} q(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{пв}}\right) d\tau, \quad (1)$$

де  $\tau$  — час, с;  $\tau_{пв}$  — постійна часу, с;  $q(\tau)$  — тепловий потік на поверхню металу.

Тоді за імпульсного опалення

$$\Delta Q_n = q_{нач} \cdot \tau_u, \quad (2)$$

де  $q_{нач}$  — питомий тепловий потік на метал на початку кожного періоду (для першого періоду  $q_{нач} = q_{кн}$ ), Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{кн}$  — щільність теплового потоку в кінці нагріву, Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_u$  — час імпульсу, с.

За постійних значень тривалості імпульсу і паузи до кінця періоду витримки температура поверхневого шару в момент імпульсу може перевищувати задану, при цьому можлива поява поверхневих дефектів. Авторами [3] запропоновано тривалість імпульсів змінювати протягом витримки в залежності від величини теплового потоку на поверхню металу, постійної часу, робочої теплової потужності і потужності холостого ходу. В процесі витримки тривалість імпульсу зменшується, оскільки зменшується тепловий потік для кожного періоду.

Для виключення критичного зниження температур поверхневого шару металу діапазон управління температурою повинен обмежуватися таким чином, щоб нижня межа температури газового середовища в період імпульсу була вищою, ніж поверхневого шару металу.

Умовно тривалість імпульсу визначається двома складовими

$$\tau_{им} = \tau_{имI} + \tau_{имII}, \quad (3)$$

де  $\tau_{имI}$  — тривалість подачі палива для нагрівання металу після паузи, с;  $\tau_{имII}$  — тривалість подачі палива для компенсації втрат теплоти за рахунок потужності холостого ходу, с:

$$\tau_{имI} = \int_{\tau}^{\tau+\tau_{пз}} q(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{пв}}\right) \cdot \frac{d\tau}{q_{кн}}, \quad (4)$$

де  $\tau_{пз}$  — тривалість паузи, с.

З умов балансу теплоти, яка втрачається за рахунок потужності холостого ходу печі  $M_{xx}$  за період  $\tau_{пз}$  і повертається в період імпульсу

$$\tau_{имII} = \frac{M_{xx}}{M_{раб} - M_{xx}} \cdot \tau_{пз}, \quad (5)$$

де  $M_{раб}$  — робоча потужність печі, Вт

$$M_{раб} = B_T \cdot Q_n^p + m \cdot B_T \cdot V_d^0 \cdot i_b, \quad (6)$$

де  $i_b$  — питома ентальпія повернення продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup>;  $m$  — коефіцієнт повернення [4].

Перетворюючи інтеграл, з (4) отримаємо:

$$\tau_{им} = \frac{q(\tau)}{q_{кн}} \cdot \tau_{пв} \left[ \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{пв}}\right) - \exp\left(-\frac{\tau + \tau_{пз}}{\tau_{пв}}\right) \right] + (M_{xx} \cdot \tau_{пз}) / (M_{раб} - M_{xx}). \quad (7)$$

Тривалість паузи визначається за формулою:

$$\tau_{пз} = \tau_{пв} \left[ \ln(M_{раб} - M_{xx}) - \ln(M - M_{xx}) \right] \left[ \ln t_k - \ln(t_k - \Delta t) \right], \quad (8)$$

де  $t_k$  — кінцева температура нагрівання металу, °С;  $\Delta t$  — допустиме відхилення від температури витримки, °С.

Таким чином, використовуючи методику, запропоновану в [3], але враховуючи зміну робочої потужності  $M_{раб}$  від величини коефіцієнта повернення  $m$ , можна розрахувати зміну тривалості імпульсів і пауз протягом витримки з використанням повернення продуктів згорання в період паузи.

Для визначення впливу коефіцієнта повернення на перепад температури по висоті і ширині печі, витрату палива, побудовані залежності перерахованих характеристик, в яких коефіцієнт повернення змінювався від 0,1 до 0,3.

Підтвердження ефективності роботи запропонованих способів опалення та пристроїв теплової обробки сталі можна отримати на основі таких результатів.

На рис. 1 показана залежність тривалості витримки від способу опалення.

Розрахунки показали, що тривалість імпульсного опалення в порівнянні з тривалістю при безперервному опаленні менше на 4 години.

На рис. 2 показана залежність тривалості подачі палива з максимальною витратою від способу опалення.

Тривалість подачі палива з максимальною витратою при  $\tau_u \neq \text{const}$  менше на 5,6 годин порівняно з  $\tau_u = \text{const}$ . За імпульсно-реверсивного опалення зі збільшенням коефіцієнта повернення відбувається плавне зменшення тривалості подачі палива. Якщо  $m = 0,3$ , то тривалість зменшилась на 0,7 годин порівняно з імпульсним опаленням. Таким чином, збільшується продуктивність термічної печі і знижується питома витрата палива.

Переваги зміни тривалості імпульсу і паузи, порівняно з їх постійним значення було описано раніше і доведено в роботі [3]. Для імпульсно-реверсивного опалення отримані залежності, графіки яких показані на рис. 3.

Розрахунки показали, що тривалість паузи має лінійну залежність і зростає пропорційно тривалості витримки. Тривалість імпульсів змінюється аналогічно зниженню теплової потужності печі при безперервному опаленні. Загальний період залежить від суми тривалості паузи і імпульсу. Зміна часу періоду  $\tau_n$  не допускає перегріву поверхні металу і значно скорочує витрату палива в порівнянні з постійним  $\tau_n$ .

З урахуванням зміни тривалості витримки і тривалості подачі палива з максимальною витратою розрахована сумарна витрата палива за весь цикл для кожного виду опалення. Залежності за результатами розрахунку показані на рис. 4.

При імпульсному опаленні з перемінним  $\tau_n$  значно скорочується витрата палива. При імпульсно-реверсивному опаленні з коефіцієнтом повернення  $m = 0,3$  витрата палива знижується на  $522 \text{ м}^3$  за весь цикл термообробки.

Для підтвердження адекватності математичної моделі використовувалися результати промислових випробувань теплової роботи термічної печі № 12 ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпрспецсталь» ім. А. В. Кузьміна» [5].

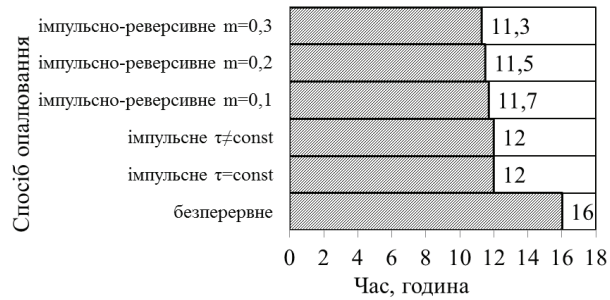


Рис. 1. Залежність тривалості витримки від способу опалення



Рис. 2. Залежність тривалості подачі палива з максимальною витратою від способу опалення

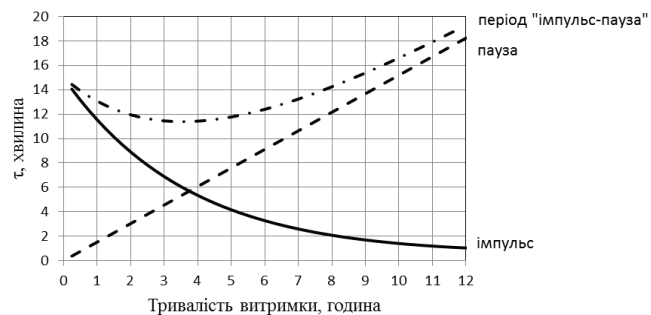


Рис. 3. Залежність зміни тривалості імпульсів, пауз і загального періоду «імпульс-пауза» протягом витримки

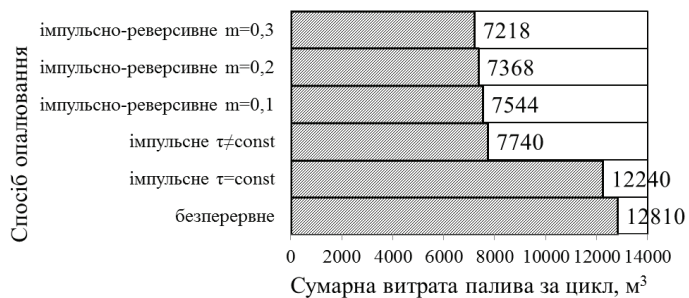


Рис. 4. Залежність сумарної витрати палива за цикл термообробки від способу опалення

## Висновки

Виконано розрахунок тривалості імпульсів і пауз при подачі палива і повітря в період витримки металу. Враховується зміна тривалості періоду  $\tau_n$ . Для імпульсно-реверсивного опалення враховано зміну робочої потужності печі  $M_{\text{раб}}$  від величини коефіцієнта повернення  $m$ .

Час термообробки металу при імпульсно-реверсивному опаленні з  $m = 0,3$  скоротився на 6 годин порівняно з безперервним опаленням і на 0,7 годин порівняно з імпульсним опаленням.

Порівняно з імпульсним опаленням сумарна витрата палива при імпульсно-реверсивному опаленні з  $m = 0,3$  зменшилась на 522 м<sup>3</sup>/цикл.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яковлева И. Г. Интенсификация конвективной теплоотдачи в термических рециркуляционных печах при реверсивной подаче возврата [Текст] / И. Г. Яковлева, Е. Н. Барищенко, И. Н. Мных // *Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. — Днепропетровск : Новая идеология, 2012. — Выпуск 4 (19). — С. 190—195.
2. Яковлева И. Г. Анализ распределения температуры в рабочем пространстве печи при различных условиях рециркуляции продуктов горения [Текст] / И. Г. Яковлева, Е. Н. Барищенко, И. Н. Краснокутская (Мных И. Н.) // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. — Выпуск 3/1 (39). — Харьков : Технологический центр, 2009. — С. 19—22.
3. Ревун М. П. Интенсификация работы нагревательных печей [Текст] / М. П. Ревун, В. И. Гранковский, А. Н. Байбуз — К. : Техника, 1987. — 137 с.
4. Яковлева И. Г. К расчёту параметров греющей смеси продуктов сгорания в термической печи при реверсивной подаче возврата в подподовую топку [Текст] / И. Г. Яковлева, И. Н. Мных, Е. Н. Барищенко // *Металлургическая теплотехника : сб. науч. трудов Национальной металлургической академии Украины*. — Выпуск 3 (18). — Днепропетровск : Новая идеология, 2011. — С. 155—163.
5. Разработка конструкции горелочного устройства для низкотемпературного отпуска в печах термического цеха [Текст] : отчет о НИР Тема 6-1/2002 / рук. М. П. Ревун; А. А. Данишевский, А. Н. Андриенко. ТГЛ. Цех КИП и автоматики. ОАО «Завод «Днепроспецсталь» им. А. Н. Кузьмина», 2003. — 75 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.04.2015

*Мных Ирина Николаевна* — канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: irinamnih@yandex.ru.

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя

I. N. Mnykh<sup>1</sup>

## Determination of parameters of pulse-reverse method of heating recirculation chamber furnaces

<sup>1</sup>Zaporizhia State Engineering Academy

*There has been suggested the design procedure of determining the duration of the pulses and pauses in the flow of fuel and air during the period of exposure of the metal in chamber heat treating furnace. The result of the calculation determined the heat treatment of metal and the total fuel consumption over the entire period of heat treatment.*

*The analysis of the efficiency of the proposed and existing methods of heating has been carried out.*

**Keywords:** furnace, pulse, pause, return.

*Mnykh Iryna M.* — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Heat Power Engineering, e-mail: irinamnih@yandex.ru

И. Н. Мных<sup>1</sup>

## Определение параметров импульсно-реверсивного способа отопления камерных рециркуляционных печей

<sup>1</sup>Запорожская государственная инженерная академия

*Предложена методика расчета определения длительности импульсов и пауз при подаче топлива и воздуха в период выдержки металла в камерной термической печи. В результате расчетов определено время термообработки металла и суммарный расход топлива за весь период термообработки.*

*Выполнен анализ энергоэффективности предложенного и существующих способов отопления.*

**Ключевые слова:** термическая печь, импульс, пауза, возврат.

*Мных Ирина Николаевна* — канд. техн. наук, доцент кафедры теплоенергетики, e-mail: irinamnih@yandex.ru