

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

На правах рукопису

БАШЛІЙ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ КАМЕРНОЇ  
РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ПІЧІ

Спеціальність 05.14.04. - "Промислова теплоенергетика"

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

дисертації на здобуття наукового ступеню  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 1994



00801459 (R)

AB 29251

Дисертація виконана на кафедрі "Автоматизації технологічних процесів" Запорізького індустріального інституту

Науковий керівник -- доктор технічних наук,  
професор Ревун М.П.

Офіційні опоненти -- доктор технічних наук,  
професор Губинський В.І.

кандидат технічних наук,  
доцент Литвін А.І.

Провідна установа -- комбінат "Запоріжсталь"  
ім.С.Орджонікідзе, м.Запоріжжя

Захист відбудеться " 15 " Березня 1994 р. о 12<sup>30</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К.068.02.01 при  
Державній металургійній академії України за адресою:  
320635, м.Дніпропетровськ, пр.Гагаріна,4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДМАУ.

Автореферат разісланий 11 лютого 1994 р.

Вчений секретар спеціалізо-  
ваної вченої ради

к.т.н., доцент

Ю.С.Паніотов



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність проблеми

Камерні термічні печі широко застосовують на всіх металургійних заводах, що обумовлено їх універсальністю по виконуємих режимах і видах термообробки, формі та розмірам обробляємої продукції.

Зниження собівартості нагріву дуже залежить від тривалості витримки, яка, в свою чергу, визначається рівномірністю температурного поля садки. Аналіз тенденції розвитку теплових схем отоплення термічних печей показує, що за останній час в СНД і за кордоном одержує широке розповсюдження інтенсифікація теплообмінних процесів шляхом рециркуляції пічних газів.

Рециркуляційний контур, кількість імпульсу теплоносія, геометричні співвідношення та схема розміщення топливоопалючих пристроїв формують температурне поле робочого простору печі. Комплексно ця проблема недостатньо розглянута в вітчизняній і закордонній літературі.

Крім того, застосування імпульсного способу отоплення зіткнулось з проблемою створення надійних і достатньо простих в експлуатації паливних пристроїв, дозволяючих відмовитись, що особливо актуально, від багатовартих контрольних та запальних систем.

**Метою роботи** є розробка методики розрахунку кратності рециркуляції; визначення оптимальних геометричних співвідношень інжекційного пристрою; експериментальна апробація вибраної схеми розміщення топливоопалючих пристроїв і геометрії топки; розробка і впровадження імпульсного режиму отоплення, який реалізується за допомогою простого й надійного паливного пристрою та системи автоматичного регулювання, що забезпечує зниження собівартості та підвищує якість готової продукції.

**Наукова новизна.** Запропонована методика розрахунку кратності рециркуляції, яка відрізняється від раніш відомих тим, що при визначенні кратності рециркуляції робота протитиску, не піддається аналітичному розрахунку, виявлена через загальний коефіцієнт гідравлических втрат на шляху руху теплоносія. Здобуто рішення задачі оптимізації геометричних співвідношень рециркуляційного вузла для створення максимально можливої кратності рециркуляції.

Розроблено універсальний алгоритм розрахунку і методика розра-

хункового аналізу на ЭОМ статей теплового балансу пломінних і електричних нагрівальних, термічних і сушильних печей безперервної і періодичної дії.

**Практична цінність.** Результати досліджень на запропонованій математичній моделі розрахунку геометричних параметрів рециркуляції використані при конструюванні рециркуляційних вузлів та удосконаленні схеми опотлення термічної камерної печі. Запропоновано технічне рішення, яке забезпечує одночасне зниження витрати палива та підвищення рівномірності нагріву садки за рахунок імпульсної подачі свіжого теплоносія. Здобуті рішення, які дозволяють оцінити вплив способів опотлення (наприклад, імпульсно-рециркуляційного) на техніко-економічні показники роботи печі.

**Реалізація результатів роботи.** З використанням результатів математичного модулювання і експериментальної апробації розроблено і впроваджено нові схеми опотлення і конструктивні зміни рециркуляційних вузлів камерних печей термічного цеху електрометалургійного заводу "Дніпроспецсталь" з вживанням імпульсної подачі свіжого теплоносія у період витримки, що дозволило підвищити якість термообробки та збільшити вихід гідної продукції. Річний економічний ефект складає 60000 кб.р. (в цінах 1990р.).

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи доповідались і обговорювались на науково-технічній конференції "Совершенствование тепловых процессов и новые технологии промышленных установок и ТЭЦ" (Челябінськ, 1990р.); на науково-технічному семінарі "Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, качества деталей и заготовок при тепловой обработке металла в печных агрегатах машиностроительных предприятий" (Волгоград, 1990р.); на Всесоюзній нараді "Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии" (Новокузнецьк, 1991р.); на міжнародному семінарі "Научные основы конструирования металлургических печей. Теплотехника и экология". (Дніпропетровськ, 1993р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 1 авторське свідоцтво.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, висновку, списку літератури із 113 найменувань, додатку і містить 134 сторінки машинописного тексту, 54 малюнка, 31 таблицю. Загальний обсяг дисертації -- 228 сторінок.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У першій главі виконано аналіз сучасного стану питання, проведено літературний та патентний пошук в галузі вибраної тематики. Розглянуто вітчизняні та закордонні досягнення останніх років.

Розробка теорії в цій галузі пов'язана з іменами видатних вчених-металургів: В.Є.Грум-Гржимайло, Н.Н.Доброхотова, М.А.Глінкова, Б.І.Китаєва, К.Н.Соколова, Н.І.Кокарева, А.В.Кавадєрова, В.Н.Тимофєєва, А.С.Невського, І.Д.Семікіна та інші. За нашого часу проведено багато робіт, дозволяючих встановити загальні закономірності теплової роботи пломєневих печей.

В загальному випадку точність і рівномірність нагріву залежать від інтенсивності масообмінних процесів в робочому просторі.

Одним із способів вирівнювання температур в робочому просторі є рециркуляція газів, яка зменшує початкову температуру і звеличує обсяг теплоносія, що бере участь в теплообміні, в результаті чого досягається рівномірність температурних полів теплоносія і поверхні садки.

Виконано огляд отоплювальних систем діючих рециркуляційних печей та шляхи удосконалення рециркуляційних контурів.

Аналіз стану питання дозволив встановити мету й задачі дослідження, які доведені у вступі.

У другій главі розглянуті теоретичні дослідження аеродинамічних процесів в рециркуляційних печах.

Питання розрахунку кратності інжекції є центральним питанням розрахунку струминних апаратів й описано досить докладно в роботах Глінкова, Абрамовича і Єрмакова. У монографії Пуговкіна основна увага звернена на конструктивні вузли печей і розрахунки нагріву металу, а формула для розрахунку кратності рециркуляції приведена з роботи, присвяченій інжекційним пальникам. Та пічний інжектор, крім змішувача містить вихідний і рециркуляційний канали, де виникають гідравлічні втрати. Іванцов пропонує безрозмірні рівняння для розрахунку коефіцієнта інжекції, виведені з енергетичного балансу простого інжектору:

$$\frac{M_c W_c^2}{2} = \frac{(M_c + M_B) W_{cm}^2}{2} + \frac{M_c + M_B}{\rho_{cm}} \Delta P + M_c \frac{(W_c - W_{cm})^2}{2} + M_B \frac{W_{cm}^2}{2} \quad (1)$$

де  $W_c, W_{cm}$  -- швидкість на виході з сопла та в змішувачі, м/с;

$\rho_{cm}$  -- щільність суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  -- протитиск, Па.

$$K \sqrt{\frac{1}{K} + \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{K\gamma}} = \Delta \sqrt{1 - \frac{1}{2} \xi \Delta^2} \quad (2)$$

при  $\rho_c = \rho_B$   
 $K = \Delta \sqrt{1 - 1/2 \xi \Delta^2}$ , (3)

де  $\Delta$  -- відношення діаметрів  $\Delta = D_{cm} / d_c$ ;

$\gamma$  -- відношення щільностей  $\gamma = \rho_c / \rho_B$ ;

$\xi$  -- коефіцієнт протитиску  $\xi = \frac{\rho - \rho_0}{W_c^2 / (2g)}$ .

Тут індекс "с" відноситься до свіжого теплоносія, індекси "см" і "в" відповідно до суміші й звороту.

Найбільш цікавою й найбільш складною є робота протитиску (2-й член у правій частині). При розрахунку інжекційних пальників цей параметр обґрунтовано задано, а в пічному інжекторі, особливо з активним паливно-повітряним струмом, протитиск сам залежить від конструктивних параметрів інжектору.

Застосував рівняння Іванцова до розрахунків пічного інжектору і додаючи їх виразом для суми гідравлічних витрат у всій системі, одержимо відповідно дві формули для розрахунку кратності рециркуляції. Перша ураховує найбільш загальний випадок нерівняння щільностей  $\rho_c \neq \rho_s$  і роботу геометричного напору:

$$U = \frac{1}{\gamma} \left( \sqrt{\frac{1}{a+b+1/\gamma} \left( f - \frac{\gamma}{2} f^2 \right) - \left[ \frac{a}{a+b+1/\gamma} - \frac{(2a+1-1/\gamma)^2}{(a+b+1/\gamma)^2} \right] - \frac{2b+3/\gamma-1}{2\gamma(a+b+1/\gamma)}} \right) \quad (4)$$

де  $f$  -- співвідношення площ змішувача і сопла,  $f = F_{cm} / F_c$ ;

$\gamma$  -- безрозмірний геометричний тиск,  $\gamma = h_{geom} / (W_c^2 / 2g)$ ;

$h_{geom}$  -- геометричний напір, м;

$a, b$  -- безрозмірні комплекси:

$$\alpha = \frac{\psi_0}{2\psi_c} Z_1 \varphi_{вх} \quad ; \quad \beta = \frac{1}{2\psi_c} (\psi_1 Z_2 + \psi_{вх} \varphi_{вих}^2 Z_3)$$

$\varphi_{вх}, \varphi_{вих}$  -- відносні площі відповідно вхідного і вихідного перерізу  $\varphi_{вх} = F_{cm} / F_{вх}$ ,  $\varphi_{вих} = F_{cm} / F_{вих}$ ;

$Z_1$  -- коефіцієнт місцевого опору на вході в рециркуляційний канал;

$Z_2$  -- коефіцієнт місцевого опору при злитті потоків і звороті

на  $90^\circ$ ;

$Z_3$  -- коефіцієнт місцевого опору при звороті на  $90^\circ$  й виході;

$\Psi_c$  -- коефіцієнт нерівномірності швидкісного поля по кінетичній енергії в соплі;

$\Psi_f$  -- коефіцієнт нерівномірності швидкісного поля в змішувачі;

$\Psi_v$  -- коефіцієнт нерівномірності швидкісного поля в рециркуляційному каналі;

$\Psi_{вих}$  -- коефіцієнт нерівномірності швидкісного поля в каналі виходу.

Оскільки в переважній більшості випадків рециркуляційний і вихідний канал розташовані на одному рівні і мають невелику різницю в температурах, геометричний напір і різницю щільностей можна знехувати і тоді формула прийме вигляд :

$$U = \sqrt{\frac{f}{a+b+1} - \left[ \frac{a}{a+b+1} + \frac{a^2}{(a+b+1)^2} \right]} - \left( 1 - \frac{a}{a+b+1} \right) \quad (5)$$

Таким чином, здобуті рівняння інжекції містять тільки геометричні параметри і коефіцієнти втрат; всі раніш запропоновані формули містили два невідомих параметри -- коефіцієнт інжекції (рециркуляції) і коефіцієнт протитиску.

Наявність залежності кратності рециркуляції от геометричних параметрів пічного ежектора дозволяє визначити оптимальні значення його прохідних перерізів, забезпечуючих максимальну величину кратності рециркуляції.

З обліком позначень

$$F_{cm} = X_1, \quad F_{vx} = X_2, \quad F_{вих} = X_3 \quad (6)$$

і реальних обмежень на змінні  $X_i$  задача оптимізації формулюється таким чином: необхідно забезпечити максимум функції  $U(X_i)$

$$U(X_i) \rightarrow \max, \quad i=1,2,3, \quad (7)$$

при обмеженнях  $X_{ik} > X_i > X_{in}$ ,  $(8)$

що є типічною задачею нелінійного програмування при наявності обмежень в формі нерівнянь і має рішення шляхом пошуку максимуму одним з числених методів. Однак, є цікавість здобуття точного рішення розглянутої задачі з використанням аналітичного підходу.

Класичний метод знаходження екстремума функції трьох змінних у відкритій галузі передбачає рішення системи трьох рівнянь з трьома невідомими (необхідні умови) з знаходженням координат стаціонарної точки ( $X_{10}$ ,  $X_{20}$ ,  $X_{30}$ ) і подальшою перевіркою достатніх умов наявності максимуму:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial X_2} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial X_3} = 0 \end{cases} \quad (9) \quad \begin{matrix} 1 = A_{11} < 0 \\ 2 = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} > 0 \\ 3 = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix} < 0 \end{matrix}$$

де  $A_{ik} = \frac{\partial^2 U}{\partial X_i \partial X_k} (X_{10}, X_{20}, X_{30}), (i, k = 1, 2, 3)$ .

Аналіз нелінійних рівнянь (9) показав, що вони є достатньо складними і аналітично не вирішуються.

Доцільним підходом в данному випадку є такий.

Перетворимо функцію  $U(X_i)$  з обліком прийнятих значень змінних  $Z_i$ ,  $i$  (див. формулу (5))

$$\begin{aligned} a &= K_1 X_1/X_2, \\ b &= K_2 + K_3 X_1^2/X_3^2, \\ f &= K_4 X_1; \end{aligned}$$

тоді

$$\frac{a}{a+b+1} = \frac{K_1 X_1 X_3^2}{K_3 X_1^2 X_2 + K_1 X_1 X_3^2 + (1+K_2) X_2 X_3^2} = t, \quad (10)$$

де

$$K_1 = \frac{\Psi_B Z_1}{2 \Psi_C}, \quad K_2 = \frac{\Psi_1 Z_2}{2 \Psi_C}, \quad K_3 = \frac{\Psi_{ВИХ} Z_3}{2 \Psi_C}, \quad K_4 = \frac{1}{F_c} \quad (11)$$

і

$$U = \sqrt{\left(-\frac{K_4}{K_1} X_2 - 1\right) t + t^2} + t - 1. \quad (12)$$

Звідсіля належить, що при фіксованому  $X_2$  максимуми функції  $U$  і  $t$  збігаються, але на відзнаку від  $U$  функція  $t$  є дрібно-раціональною і її аналіз значно легший. Часткові похідні  $\frac{\partial t}{\partial X_1}$ ,  $\frac{\partial t}{\partial X_3}$ , здобуті з (10), мають вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial X_1} = \frac{X_2 X_3^2 [(1+K_2) X_3^2 - K_3 X_1^2]}{[K_3 X_1^2 X_2 + K_1 X_1 X_3^2 + (1+K_2) X_2 X_3^2]^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial t}{\partial X_3} = \frac{2 K_1 K_3 X_1^3 X_2 X_3}{[K_3 X_1^2 X_2 + K_1 X_1 X_3^2 + (1+K_2) X_2 X_3^2]^2} \quad (14)$$

З [14] належить, що  $\frac{\partial t}{\partial X_3} > 0$  і максимум знаходиться на верхньому кордоні змінної  $X_3$ .

По координаті  $X_1$  з умови  $\frac{\partial t}{\partial X_1} = 0$  екстремум є при значенні  $X_1 = \sqrt{\frac{1+K_2}{K_3}} X_3$ . Цей екстремум є максимумом, так як друга похідна  $\frac{\partial^2 t}{\partial X_1^2}$  завжди від'ємна.

$$\frac{\partial^2 t}{\partial X_1^2} = - \frac{2 K_3 X_1 X_2 X_3}{[K_3 X_1^2 X_2 + K_1 X_1 X_3^2 + (1+K_2) X_2 X_3^2]^2}$$

При відомих значеннях  $X_1$  і  $X_3$  функція  $t$ , а також  $U$  залежать тільки від одної змінної  $X_2$ , вплив якої на функцію  $U(X_2)$  не однозначний і додатковим аналізом визначено, що  $U(X_2) \rightarrow \max$  при  $X_2 \rightarrow \max$ . Похідна  $\frac{d(X_2 \cdot t)}{d X_2}$  в обмеженій галузі завжди  $> 0$ :

$$\frac{d(X_2 \cdot t)}{d X_2} = t + X_2 \frac{dt}{d X_2} = \frac{K_1 X_1 X_2 X_3^2 \{ (X_2 - 1) [K_3 X_1^2 + (1+K_2) X_3^2] + K_1 X_1 X_3^2 \}}{[K_3 X_1^2 X_2 + K_1 X_1 X_3^2 + (1+K_2) X_2 X_3^2]^2}$$

отже максимум  $U$  має місце на верхньому кордоні галузі визначення.

Дослідження на математичній моделі робочих параметрів рециркуляції показали, що недоцільно використовувати для створення рециркуляції розбавляюче повітря, тому що це веде до підвищених енерговтрат на нагрів надмірного повітря та на відновлення балансової кількості тепла при скороченому променевому потоці.

Математичне модулювання температурних параметрів суміші дозволяє здійснити вибір величини керівного впливу. Досліджено вплив геометричного напіру на кратність рециркуляції, звідки видно, що доцільно використовувати в проектах нових рециркуляційних печей однорівневі інжекційні пристрої.

Аналіз залежності кратності рециркуляції від геометричних параметрів однорівневого інжектору дозволяє зробити висновок про те, що розміри вихідного каналу впливають на кратність більш, ніж рециркуляційного. Так при збільшенні площі вихідного перерізу в 1,5 рази  $U$  звеличується на 83%, а при такому ж збільшенні вхідного перерізу -- на 36%. Існують критичні розміри каналу виходу, при яких крива переходить в галузь від'ємних значень.

Для порівняння здобутих залежностей з вже маємими експериментальними даними геометричні параметри інжекційного пристрою подані в безрозмірному вигляді, то є їх площі віднесені до площі змішувача. Розходження даних аналітичного розрахунку  $U$  з даними, здобутими на фізичній моделі аналогічного інжекційного пристрою склало 5-:-17%, тобто запропонована методика є придатною для практичних розрахунків. Результати теплотехнічного розрахунку нагріву металу по базовому варіанту та по варіанту з рекомендованими оптимальними парамет-

рами показують можливість скорочення на 3 години тривалості термообробки.

Третя глава присвячена розробці і промислового опробуванню елементів керуємої рециркуляції в камерних печах.

Як базовий варіант прийнято конструкцію штатних печей термічного цеху заводу "Дніпроспецсталь", які призначені для термообробки заготовок, сортового та бунтового прокату і підкату. Печі збудовані по проекту Стальпроекта і запроваджені в експлуатацію в 1954 році. Отоплення пічі відбувалось за допомогою двохпровідних пальників типу "труба у трубі" в кількості 10-ти штук, розташованих з обох боків печі по 5 з кожного боку у шаховому порядку. Кожен пальник сукупно з топкою й робочим простором створює свою зону регулювання температури, має регулюючі клапани газу й повітря.

В процесі експлуатації було виявлено серйозний недолік в конструкції печей, закладений ще в проекті -- аеродинамічні характеристики пічі не дозволяли створити єдиний квазіізотермічний потік газів навколо садки і забезпечити стійкий рециркуляційний контур протягом всього періоду нагріву, що приводило до нерівномірності температурного поля садки і, отже, до збільшення періоду витримки.

На підставі результатів досліджень виконано проект реконструкції, який упроваджено на 3-х печах термічного цеху. Реконструйовані печі відрізняються від існуючих тим, що переведені на одnobічне отоплення. Замість 9 топкок виконано 4 основні і одна топка теплової завіси. Убрані жаротривкі екрани біля каналу виходу. Значно розширені отвори рециркуляційного і вихідного каналів.

Крім того, топку викладено каналами різного прохідного перерізу: біля центру поду є ступінчате розширення, в районі котрого виконано вікно вторинної рециркуляції. В цім місці струмом рухаючогося газу створюється розрідження і відпрацювавші гази з робочого простору прососуються через центральну (найбільш низькотемпературну відстаючу в нагріві) частину садки, додатково звеличуючі рівномірність її нагріву. Кожен пальник в комплекті з підподою топкою створює пічний інжектор, створюючий основний рециркуляційний контур через рециркуляційний канал на початку топки і додатковий -- через рециркуляційний канал посередині топки по її довжині. Розміри перерізів топки й каналів близькі до оптимальних за кратністю інжекції, відповідно приведеній методиці розрахунку.

Було проведено серію контрольних нагрівів з закладкою гнуч-

ких термопар в характерних точках садки. Результати дослідницьких нагрівів показали значне підвищення рівномірності нагріву металу в експериментальному варіанті проти існуючої схеми опотлення.

Однак, нова піч не могла використати всі свої можливості, працюючи на штатних пальниках типу "труба у трубі". Кількість пальників було скорочено майже вдвічі (з 10 до 6), вони мали дуже вузькі межі регулювання по тепловій потужності та коефіцієнту витрати повітря і при збільшенні витрат відбувався відрив пломеню.

Відсутність надійних в експлуатації пальникових пристроїв ставила під сумнів реконструкцію всіх печей термічного цеху, нова піч не могла бути автоматизована без додаткового устаткування системою контролю факелу і запальними пристроями, не були здобуті стабільні результати по якості металу в дослідних нагрівах. Виникла необхідність створення більш досконального пальника.

Пальник часткового попереднього змішання розроблено на базі штатного (мал.1). Він працює таким чином. По центральній трубі 3 подається газ, по периферійному каналу корпусу 1 -- повітря. На ділянці раптового розширення створюється зона максимального розріджування в районі радіальних 6 і нахильних 7 повітряних отворів. При цьому забезпечується підсос частини повітря за рахунок кінетичної енергії газового струму для попереднього змішання у насадку 4. Завихрювальники 2, центруючі накінецьник, одночасно з розсіювачами 8, влаштованими на шляху руху повітря та газоповітряної суміші, додатково поліпшують попереднє сумішоутворення.

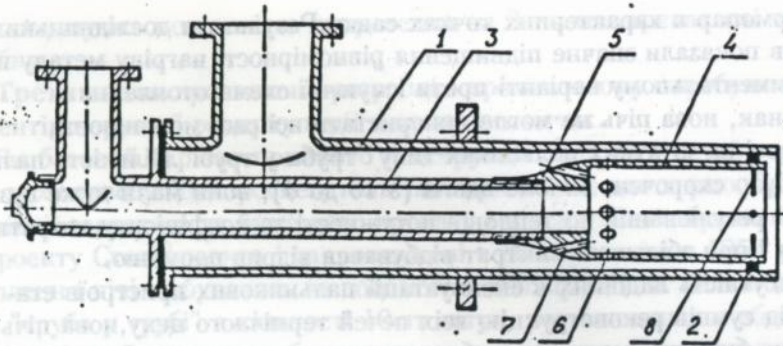
Експеримент зафіксував стабільну працю пальника при співвідношенні "газ-повітря" 1:25. Межа регулювання по витраті газу при стехіометричному спалюванні склала 1:40. Робоча характеристика пальника подано на мал.2.

У лютому 1993 року пальники були атестовані і здобули сертифікату Державного республіканського центру по випробуванню та упродженню паливовикористовуючого обладнання. По данній конструкції пальникового пристрою здобуто позитивне рішення про видачу патенту.

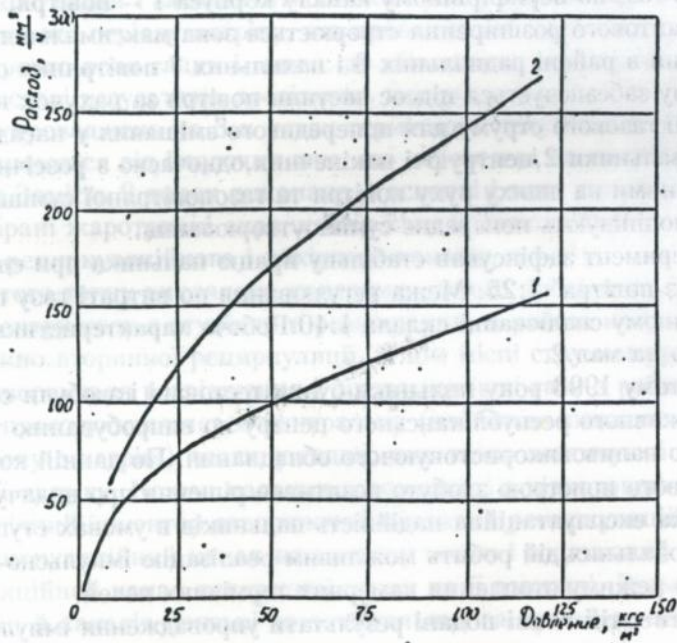
Висока експлуатаційна надійність пальників в умовах ступеневих збурювальних дій робить можливим реалізацію імпульсно-рециркуляційного режиму опотлення камерних термічних печей.

**В четвертій главі** подані результати упродження імпульсного способу опотлення на печах термічного цеху ДСС.

По-перше, імпульсний спосіб опотлення дозволяє добитися ста-



Мал. 1. Схема паливного пристрою.



Мал. 2. Витратні характеристики паливника.

1-газ; 2-повітря.

більших рециркуляційних показників: кратності, швидкості руху теплоносія і, отже, конвективної складаючої теплообміну не тільки в початковий період нагріву при максимальних витратах палива й повітря. Ці показники залишаються незмінними (максимальними) при змінному тепловому навантаженні печі, змінюється тільки співвідношення часових інтервалів повного включення і виключення витрат свіжого теплоносія.

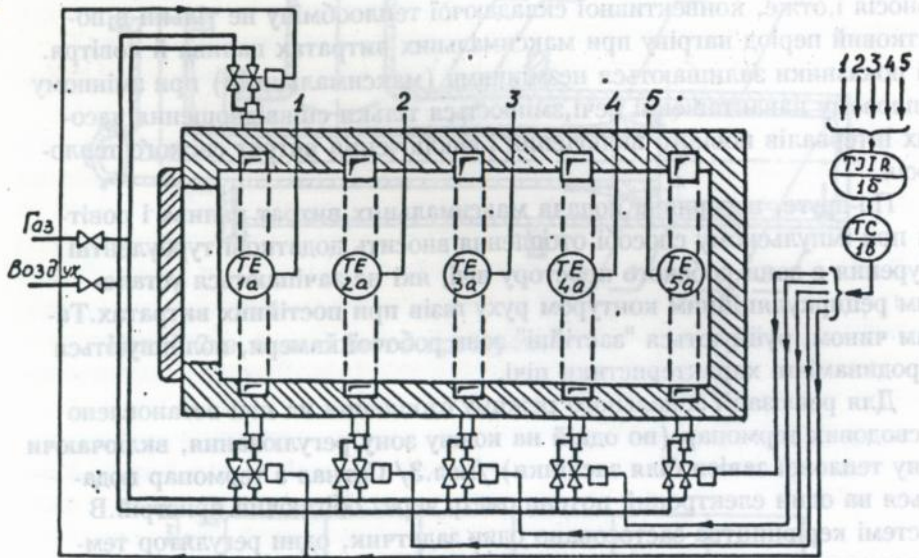
По-друге, переривна подача максимальних витрат палива і повітря при імпульсному способі опотлення вносить додаткові турбулентні збурення в зони робочого простору пічі, які не зачіпаються усталеним рециркуляційним контуром руху газів при постійних витратах. Таким чином, руйнуються "застійні" зони робочої камери, поліпшуються аеродинамічні характеристики пічі.

Для реалізації зонального режиму опотлення на пічі встановлено 5 сводових термопар (по одній на кожну зону регулювання, включаючи зону теплової завіси біля заслінки) /мал.3/. Сигнал з термопар подається на один електронний потенціометр через обігаючий пристрій. В системі керівництва застосовано один задатчик, один регулятор температури, шість виконавчих механізмів і регулюючих органів у вигляді спарених дроселів на повітряному та газовому трактах кожного пальника. Система керування забезпечує автоматичну стабілізацію температури в п'яти точках робочого простору пічі по двохпозиційному режиму.

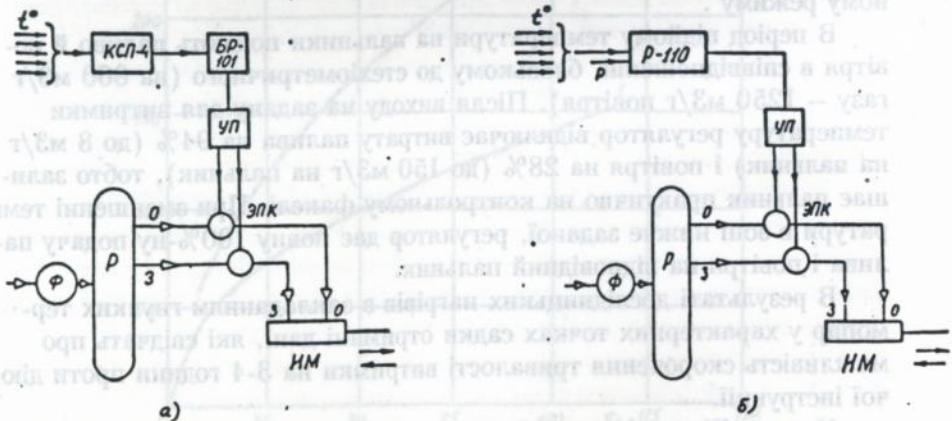
В період підйому температури на пальники подають паливо й повітря в співвідношенні, близькому до стехіометричного (на 800 м<sup>3</sup>/г газу -- 1250 м<sup>3</sup>/г повітря). Після виходу на задану для витримки температуру регулятор відключає витрату палива на 94% (до 8 м<sup>3</sup>/г на пальник) і повітря на 28% (до 150 м<sup>3</sup>/г на пальник), тобто залишає пальник практично на контрольному факелі. При зменшенні температури в зоні нижче заданої, регулятор дає повну 100%-ну подачу палива і повітря на відповідний пальник.

В результаті дослідницьких нагрівів з закладанням гнучких термопар у характерних точках садки отримані дані, які свідчать про можливість скорочення тривалості витримки на 3-4 години проти діючої інструкції.

На мал.4 подана модернізація системи автоматичного регулювання, зміна електричних виконавчих механізмів на пневматичні і зміна КСП на мікроконтролер "Реміконт Р-110".



Мал. 3. Схема автоматичного керування температурним режимом пічі.



Мал. 4. Модернізація елементів системи автоматичного керування.

Крім того, розроблено універсальний алгоритм і комплексну FORTRAN - програму розрахунку статей теплового балансу пломєневих та електричних нагрівальних, термічних та сушильних печей безперервної і періодичної дії.

При моделюванні процесу передбачено ряд обмежень, але в випадку необхідності можливо включення додаткових розділів в алгоритм розрахунку. По суті, модель є основою для творчої діяльності споживача, який може чи то додати власні розробки, чи то відсікати зайве, чи то змінювати методику розрахунку згідно з сучасними вимогами.

Програма працює в діалоговому режимі і наділена банком теплофізичних даних для найбільш розповсюджених матеріалів.

Було виконано розрахунок ТБ й визначення ККД в базовому і реконструйованому варіантах печей. Результати показали, що ККД пічі зростає на 14%, питома витрата палива знижується на 12%.

І заключний розділ -- розрахунок річного економічного ефекту від впроваджених заходів. Він склав в розцінках 1990р., як найбільш стабільного в відношенні цінової політики -- 60 000 крб/рік.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Сформульована задача вибору оптимальних теплових схем опотлення печей з метою інтенсифікації теплообмінних процесів шляхом рециркуляції пічних газів та застосування перспективного імпульсного способу опотлення.

2. Розроблено математичну модель розрахунку робочих параметрів рециркуляції, в доповнення до відомих моделей розглядає вираз кратності рециркуляції через коефіцієнт гідравлічних втрат, а не через коефіцієнт протитиску. Дослідження на математичній моделі дозволили отримати ряд функціональних залежностей та оцінити вплив кратності рециркуляції на концентрацію випромінюючих компонентів, температуру і швидкість руху теплоносія, а також вплив геометричного напору та конструктивних розмірів інжекційного пристрою на кратність рециркуляції, що дозволяє здійснити вибір величини керуючого впливу.

3. Отримано рішення задачі оптимізації процесу рециркуляції по геометричним параметрам рециркуляційного й вихідного каналів і

каналу змішувача. Визначено максимум кратності рециркуляції при оптимальних прохідних перерізах цих каналів.

4. Експерименти на термічній камерній пічі показали принципову можливість переходу на однобічну схему опотлення з рекомендуємими геометричними співвідношеннями рециркуляційних вузлів. В реконструйованих по запропонованому проекту печах, завдяки конструктивним рішенням подової опотлювальної системи, забезпечується стійка рециркуляція продуктів згорання у всіх періодах термообробки без застосування надмірного енергетичного повітря, однак відсутність надійних в експлуатації паликових пристроїв ставила під сумнів реконструкцію всіх печей термічного цеху.

5. Розроблений на базі стандартного палика типу "труба у трубі" паликовий пристрій часткового попереднього змішання володіє широкими межами регулювання по тепловій потужності (1:40) і коефіцієнту витрати повітря (1:25) і не потребує влаштування запальних пристроїв і систем контролю факелу. Завдяки великій стійкості горіння, модернізований палик дозволяє реалізувати будь-який режим опотлення, в тому числі й імпульсний.

6. Промислове випробування показало, що імпульсний спосіб опотлення дозволяє розвинути та удосконалити теплообмінні процеси в печах з рециркуляційним рухом теплоносія за рахунок стабільних параметрів рециркуляції в період імпульсу і додаткових турбулентних збурень в зонах робочого простору, який не закипається усталеним рециркуляційним контуром при постійних витратах. Розроблено систему автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсно-рециркуляційний режим опотлення. Результати дослідних нагрівів свідчать про рівномірність нагріву садки, яка дозволяє скоротити тривалість витримки на 3-4 години проти діючої інструкції.

7. Розроблено універсальний алгоритм розрахунку і методика розрахункового аналізу на ЕОМ статей теплового балансу пламенивих і електричних нагрівальних, термічних та сушильних печей безперервної і періодичної дії, яка дозволяє виконувати оперативний контроль та прогноз ефективності роботи печей; оптимізувати по витраті палива конструкцію і структуру огорожень пічі, режим тиску в паликових печах; визначити ефективність рекуперації тепла залишаючих газів; порівняти техніко-економічні показники печей різноманітних конструкцій при однаковій продуктивності за структурою теплового балансу, питомою витратою палива, термічному ККД і т.д.

8. Запропонована конструкція рециркуляційного вузла, однобічна схема опотлення пічі, модернізований пальниковий пристрій часткового попереднього змішання і система автоматичного регулювання, реалізуюча імпульсно-рециркуляційний режим опотлення, упроваджені в термічному цеху електрометалургійного заводу "Дніпроспецсталь". Економічний ефект від упровадження заходів складає 60000 крб.в рік (в цінах 1990р.).

По темі цього дослідження виконано 16 наукових праць, повний список яких знаходиться в дисертації. Основними з них є такі:

1. Рыжков Г.М., Башлий С.В. Математическое моделирование эффективности тепловой работы печей // Совершенствование тепловых процессов и новые технологии промышленных установок и ТЭЦ: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Миасс, Челябинский политехнический институт, 1990. - С. 15-16.
2. Рыжков Г.М., Башлий С.В. Камерная печь с управляемой рециркуляцией продуктов сгорания для термообработки проката и поковок // Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, качества деталей и заготовок при тепловой обработке металла: Тез. докл. Всес. науч.-техн. сем. - Волгоград, 1990. - С. 58.
3. Рыжков Г.М., Башлий С.В. Математическое моделирование негерметичности ограждений рабочего пространства печи // Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии: Тез. докл. Всес. сов. - Новокузнецк, 1991. - С. 195.
4. Рыжков Г.М., Башлий С.В. Численное моделирование и анализ работы нагревательных печей // Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии: Тез. докл. Всес. сов. - Новокузнецк, 1991. - С. 203.
5. Башлий С.В., Рыжков Г.М. Определение потерь тепла вследствие негерметичности печи / Технология и оборудование производства цветных и черных металлов и сплавов: Сб. научн. тр. - Киев, 1991, - С. 115-117.
6. Башлий С.В., Рыжков Г.М. Реконструкция камерной термической рециркуляционной печи / Технология и оборудование производства цветных и черных металлов и сплавов: Сб. научн. тр. - Киев, 1991, - С. 117-120.
7. Ревун М.П., Чепрасов А.И., Башлий С.В., Андриенко А.Н. Горелка частичного предварительного смешения / Сталь, - 1993. - №9. - С. 87-89.
8. Рыжков В.Г., Ревун М.П., Рыжков Г.М., Башлий С.В. Расчет параметров греющей смеси при рециркуляции продуктов сгорания // Науч-

- ные основы конструирования металлургических печей:теплотехника и экология:Тез.докл.Междунар.сем.-Днепропетровск,1993.-С.51-52.
- 9.Рыжков В.Г.,Ревун М.П.,Рыжков Г.М.,Башлий С.В.Зависимость кратности рециркуляции продуктов сгорания от конструктивных параметров печного инжектора//Научные основы конструирования металлургических печей:теплотехника и экология:Тез.докл.Междунар.сем.-Днепропетровск,1993.-С.52-53.
- 10.Ревун М.П.,Башлий С.В.,Чепрасов А.И.,Андриенко А.Н.Горелка частичного предварительного смешения//Научные основы конструирования металлургических печей:теплотехника и экология:Тез.докл.Междунар.сем.-Днепропетровск,1993.-С.49-50.
- 11.Ревун М.П.,Чепрасов А.И.,Башлий С.В.,Андриенко А.Н.Система импульсного отопления рециркуляционной термической печи//Научные основы конструирования металлургических печей:теплотехника и экология:Тез.докл.Междунар.сем.-Днепропетровск,1993.-С.54-55.

LIBRARY  
 11/11/2017

Підписано до друку 04.01.94. Формат  
Замовлення № 20. Тираж 30 прим.

330006, Запоріжжя, ЗП, ксерокс, пр.

AB 29.251