

АНОТАЦІЯ

Дунаєв М. К. Підвищення ефективності теплової роботи прохідної нагрівальної печі.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник Ю.М. Каюков. Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

Виконано аналіз існуючих способів впливу радіаційних властивостей кладки на інтенсивність теплообміну в робочому просторі печі, виконано чисельне дослідження радіаційного теплообміну в системі газ - кладка – метал. Дослідження виконано для селективно-випромінюючого газу в випадку сірої і селективно-випромінюючої кладки. За результатами розрахунків визначені залежності щільності потоку результуючого випромінювання на поверхню металу і поглинальну здатність газу від ступеня чорноти кладки.

Ключові слова: нагрівальна піч, радіаційний теплообмін, селективність випромінювання, ступінь чорноти, відбівна здатність, продукти згоряння, кладка, метал.

ANOTATION

Dunaiev M. K. Improving the efficiency of thermal work of the through heating furnace.

Qualification work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, supervisor Yu.M. Kayukov. Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhia National University, Department of Heat and Hydropower, 2020.

The analysis of the existing ways of influence of radiation properties of a laying on intensity of heat exchange in working space of the furnace is executed, the numerical research of radiative heat exchange in system gas - a laying - metal is executed. The study was performed for selectively emitting gas in the case of

gray and selectively emitting masonry. According to the results of the calculations, the dependences of the flux density of the resulting radiation on the metal surface and the absorption capacity of the gas on the degree of blackness of the masonry are determined.

Key words: heating furnace, radiation heat exchange, radiation selectivity, degree of blackness, yield capacity, combustion products, masonry, metal.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Радіаційні характеристики тіл в променистому теплообміні	10
1.1.1 Радіаційні характеристики газоподібних тіл	11
1.1.2 Радіаційні характеристики металу, що нагрівається	16
1.1.3 Радіаційні характеристики кладки печі	19
1.2 Вплив ступеня чорноти кладки на променистий теплообмін в системі газ-кладка-метал	21
1.3 Методичні нагрівальні печі	23
1.3.1 Методичні печі, що працюють на газоподібному паливі з низькою теплоотою згоряння	26
1.3.2 Методичні печі, що працюють на газі високої теплоти згоряння	27
1.4 Прокідні нагрівальні печі	30
1.5 Опис конструкції печі з крокуючим подом	32
1.5.1 Корпус	32
1.5.2 Стаціонарні балки (под печі)	32
1.5.3 Конструкція крокуючих балок пода	32
1.5.4 Пристрої водяного затвора	33
1.5.5 Механізм пічної заслінки	33
1.5.6 Пічної рольганг завантаження	33
1.5.7 Система опалення печі	33
1.5.8 Рекуператор	34
1.5.9 Система водяного охолодження	34
1.5.10 Гідравлічна система печі	34
1.5.11 Автоматизація печі (АСУ)	35
1.6 Нагрів металу	35
1.7 Теплотехнічні зони печі	38
1.7.1 Методична зона	38
1.7.2 Зварювальна зона	38

1.7.3 Томільна зона	39
2 РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕЧІ З КРОКУЮЮЧИМ ПОДОМ ЗІ СВОДОВИМ ОПАЛЕННЯМ	42
2.1 Визначення основних геометричних розмірів печі	42
2.1.1 Вихідні дані	42
2.1.2 Розрахунок горіння палива	42
2.1.3 Розрахунок часу нагрівання металу	43
2.2 Час нагріву металу в методичній зоні	46
2.3 Час нагріву металу в зварювальної зоні	54
2.4 Час томління металу	57
2.5 Визначення основних розмірів печі	58
2.6 Математична модель радіаційного теплообміну в системі газ - кладка – метал	60
2.7 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка-метал	66
2.7.1 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка- метал для сірої кладки	70
2.7.2 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка- метал з урахуванням селективності радіаційних властивостей кладки	81
3 ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	88
3.1 небезпечні і шкідливі чинники прокатного виробництва	88
3.2 Заходи для поліпшення умов праці	92
3.3 Виробнича санітарія	94
3.4 Електробезпека	95
3.5 Пожежна безпека	97
3.6 Розрахунок температури на зовнішній поверхні печі	101
ВИСНОВКИ	104
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ	106

ВСТУП

Актуальність роботи. Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів - одна з найважливіших проблем, що стоять перед промисловістю нашої країни в даний час і в найближчому майбутньому. З огляду на важливість цієї проблеми, необхідно постійно шукати способи підвищення к.к.д. теплових агрегатів, що призведе до підвищення продуктивності або зниження споживання органічного палива промисловими тепловими агрегатами, найбільшими з яких є металургійні нагрівальні і термічні печі. З більш ефективним використанням палива тісно пов'язана задача зниження валових викидів шкідливих речовин, що входять до складу продуктів згоряння.

Об'єкт дослідження. Процеси теплообміну в металургійних печах.

Предмет дослідження. Вплив ступеня чорноти кладки на інтенсивність променевого теплообміну в системі газ-кладка-метал.

Мета роботи. Розробка методу інтенсифікації теплообміну випромінюванням в промислових нагрівальних печах за рахунок підвищення ступеня чорноти поверхні кладки.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- аналіз літературних джерел за тематикою дослідження;
- дослідження впливу властивостей кладки на інтенсивність теплообміну.

Методи та засоби дослідження. Поставленні задачі вирішувались шляхом вивчення теоретичних положень теплотехнологічних процесів й розрахунків параметрів теплообміну в робочому просторі прохідної нагрівальної печі з крокуючим подом.

Наукова новизна отриманих результатів. Встановлено залежності інтенсивності променистого теплообміну при різних ступенях чорноти кладки в системі газ-кладка-метал.

Практичні цінності роботи. Розроблено рекомендації що до підвищення ступеня чорноти кладки робочого простору прохідної нагрівальної печі з крокуючим подом.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора полягає в безпосередньому формуванні загальних концепцій цієї роботи, постановці, особистої участі в проведенні розрахункових досліджень. Автору належать основні ідеї роботи, постановка завдання, обґрунтування основних припущень, теоретичні викладки та аналіз отриманих результатів і формулювання висновків за результатами проведених досліджень.

Апробація роботи. Положення роботи викладенні на XII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ЗНУ «Молода наука 2019» (м. Запоріжжя 2019), та на XIII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ЗНУ «Молода наука 2020» (м. Запоріжжя 2020).

Структура та обсяг. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань з 42 позиції. Загальний обсяг складає 110 сторінок, у тому числі 35 ілюстрацію та 8 таблиць.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Радіаційні характеристики тіл в променистому теплообміні

Всі тіла, температура яких відмінна від нуля, безперервно випромінюють і поглинають променисту енергію. Випромінювання має двоєдину корпускулярно-хвильову природу. У зв'язку з цим променистий теплообмін між тілами розглядають як з позиції електромагнітної теорії світла, так і з позиції квантової теорії випромінювання [1].

У більшості високотемпературних теплових агрегатів основною складовою теплообміну є випромінювання. За винятком продуктів згорання промениста енергія в основному віддається і сприймається поверхнями об'єктів [3].

У променистому теплообміні поверхні, які є джерелами тепла (радіаційні труби в печах із захисною атмосферою, електричні нагрівачі та ін.), або сприймають тепло (метал, що нагрівається, труби з теплоносієм та ін.), виконують в теплообміні активну роль. Поверхня кладки, склепіння, перегородок є перевипромінювачами, перетворювачами променевої енергії. Вони не є ні джерелами тепла, ні теплоприймачами, але також беруть участь в теплообміні. Їх роль в променистому теплообміні можна визначити як пасивну [7]. Інтенсифікувати променистий теплообмін можна за рахунок зміни значень радіаційних характеристик поверхонь, таких як поглинальна або відбивна здатність.

Для випромінюючих поверхонь, які беруть активну участь в променистому теплообміні, підвищення ступеня чорноти однозначно позначається на збільшенні результуючого теплового потоку.

Для теплосприймаючої поверхні (металу, що нагрівається, труб з теплоносієм і т. п.) щільність результуючого теплового потоку $q_{рез}$ прямо пропорційна ε_m - ступеню чорноти поверхні, що нагрівається. Підвищення значення ε_m дозволить збільшити результуючий тепловий потік до цих поверхонь.

Вплив ступеня чорноти поверхонь перевипромінювачів (кладки), що виконують пасивну роль, на теплообмін випромінюванням, згідно з літературними даними, однозначно не визначено [8-10].

1.1.1 Радіаційні характеристики газоподібних тіл

При спалюванні органічного палива особлива роль відводиться організації процесу горіння, або полум'яним процесам [5].

Характеристики факела:

- стійкість процесу горіння;
- межі та довжина факела;
- радіаційні характеристики полум'я;
- положення факела щодо теплосприймаючої поверхні і кладки;
- швидкісні та інші аеродинамічні характеристики факела;
- екологічні характеристики.

У факелі енерготехнологічних агрегатів компонентами, що випромінюють і поглинають, можуть бути газоподібні продукти згорання (в основному це CO_2 і H_2O), а також частинки сажі і пилу. Радіаційні характеристики визначаються насамперед ступенем чорноти $\epsilon_{\text{ф}}$ і температурою $T_{\text{ф}}$ факела. У розрахунках теплообміну використовуються як спектральні коефіцієнти поглинання і ступеня чорноти, так і інтегральні характеристики.

Частинки сажі дають суцільний спектр випромінювання і мають інтенсивне випромінювання в області видимого спектру ($\lambda = 0,4 \div 0,75$ мкм), в той час як газоподібні продукти згорання мають смуги випромінювання і поглинання в інфрачервоній області спектра.

Інтегральна ступінь чорноти газоподібних продуктів згорання визначається за номограмами ВТІ при відомій температурі і оптичній товщині випромінюючого шару.

Для теплотехнічних розрахунків необхідне знання розподілу радіаційних характеристик по довжині факела [11]. Розрахункові формули дозволяють зв'язати концентрацію випромінюючих газоподібних компонентів P_x з довжиною факела через ступінь вигорання k і підсмоктування α_r

$$P_x = P_{н.г} \frac{kV_0}{kV_0 + (1 - k) + (\alpha_r - k)L_0},$$

де $P_{н.г}$ - концентрація компонента, що випромінює (CO_2 , H_2O), в продуктах повного згоряння палива при $\alpha = 1$ (наприклад, для факела природного газу $P_{н.г}^{\text{CO}_2} = 9,4\%$, $P_{н.г}^{\text{H}_2\text{O}} = 19,9\%$);

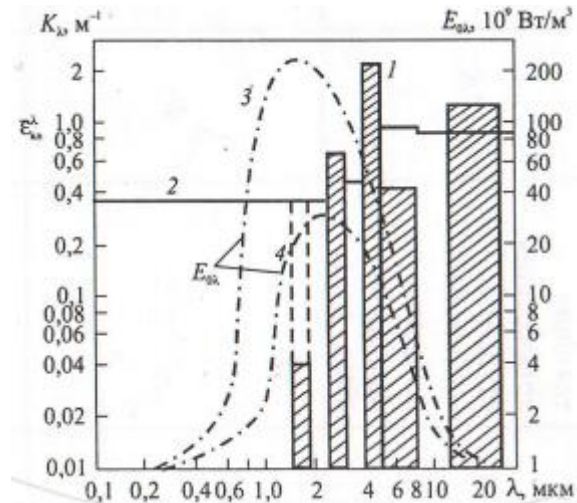
L_0 і V_0 - теоретично необхідне для горіння кількість повітря в вихідних продуктах горіння, що відходять, при $\alpha = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (при нормальних умовах).

З використанням значень концентрації, довжини факелу і температури можуть бути знайдені інтегральні і спектральні характеристики випромінювання цих газів.

Крім CO_2 і H_2O , в факелах печей можуть бути присутніми і такі компоненти, що випромінюють, як SO_2 (мазотовий факел), а також CO , OH і NO . Однак, навіть при високих температурах (3000 К) частка випромінювання, яку вносить CO , OH і NO від випромінювання CO_2 і H_2O не перевищує 4 % [4, 5].

Облік спектральних характеристик газів, що випромінюють, в теплотехнічних розрахунках досить складний через складність спектра їх випромінювання. Для опису цих спектрів застосовуються різні моделі. Відома, статистична модель спектра випромінювання, або модель вузької смуги, параметри якої знаходяться з експерименту або розраховуються квантово-механічним методом [2].

В даний час в рамках зональних моделей енерготехнологічних агрегатів і печей вдалося реалізувати селективно-сіру апроксимацію спектра випромінювання газів (див рис. 1.1).



Температури: 1 – $T = 1500$ К; 3 – $T = 1800$ К; 4 – $T = 1200$ К

Рисунок 1.1 Спектр випромінювання суміші CO_2 і H_2O в продуктах згоряння природного газу, ступінь чорноти кладки (2) і щільність полусферичного випромінювання абсолютно чорного тіла (3, 4)

У роботах [2, 3], був застосований детермінований щодо розташування смуг спектра підхід при побудові селективно-сірої моделі газів: смуги випромінювання мали відповідно до їх фактичного розміщення по довжинах хвиль. Це дозволяє пов'язувати спектральне випромінювання частинок сажі, кладки, металу, плавильного пілу зі спектром випромінювання газоподібних продуктів згоряння.

В таблицях 1.1, 1.2 і 1.3 наведено характеристики спектру випромінювання цих газів (моделі з постійною шириною смуги), розташування смуги і інтегральні показники поглинання цих смуг $\alpha_z, \text{см}^{-2} \text{ ат}^{-1}$.

Таблиця 1.1 - Характеристика спектру випромінювання CO₂ (T₀ =300 К)

Смуга, мкм	2,5-3,0	4,0-4,8	12,5-25,0
$\alpha_z, 1/(\text{см}^2 \cdot \text{ат})$	72,5	2706,2	179,3

Таблиця 1.2 - Характеристика спектру випромінювання H₂O (T₀=330 К)

Смуга, мкм	1,5-1,75*	2,5-3,0	4,0-8,0	12,5-25,0
$\alpha_z, 1/(\text{см}^2 \cdot \text{ат})$	18,72	126,0	175,0	58,4

* Смуга об'єднує дві порівняно "слабкі" смуги поглинання H₂O з нульовими лініями 1,87 і 1,38мкм.

Таблиця 1.3 - Характеристика спектру випромінювання SO₂ (T₀=300 К)

Смуга, мкм	3,91-4,09	4,13-4,56	6,96-7,77	8,27-9,14	19,3
$\alpha_z, 1/(\text{см}^2 \cdot \text{ат})$	9,0	11,0	780,0	95,6	Немає

У розрахунках для інтегрального показника поглинання смуг α_z приймають температурну залежність [9]

$$\alpha_z(T) = \alpha_z(T_0)(T_0/T).$$

За допомогою звичайної селективно-сірої моделі важко домогтися досить точного розрахунку інтегральних ступенів чорноти в широкому діапазоні змін температури і оптичної щільності газів. У моделі не враховується вплив крил смуг та не розкривається наявність проміжків між лініями в смузі.

З метою усунення цих недоліків в роботах [4, 9] був запропонований метод корекції за інтегральними характеристиками (ЛЖ-метод). Спочатку з використанням інтегрального показника поглинання смуги α_z , і ширини

смуги $\Delta\omega_z$ знаходиться розрахункова спектральна (усереднена в межах кожної смуги) і інтегральна ступень чорноти газів:

$$\varepsilon_{\lambda z} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha_z}{\Delta\omega_z} P S_{\text{эф}}\right);$$

$$\varepsilon_{\text{рас}} = \frac{1}{\sigma_0 T^4} \sum_z \varepsilon_{\lambda z} \int_{\Delta\omega_z} E_{0\lambda} d\lambda,$$

де P – парціальний тиск, МН/м²; $S_{\text{эф}}$ - ефективна довжина променя, м; $E_{0\lambda}$ - функція розподілу Планка, Вт/(м²·мкм); σ_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м²·К⁴); λ – довжина хвилі, мкм.

Далі спектральна ступінь чорноти газу коригується за фактичними (експериментальними) значенням інтегральної ступеня чорноти газу $\varepsilon_{\text{экс}}$ (визначається за номограмами) та розраховується фактична спектральна ступінь чорноти

$$\varepsilon_{\lambda z} = \varepsilon_{\lambda z} \frac{\varepsilon_{\text{экс}}}{\varepsilon_{\text{рас}}},$$

а також спектральний коефіцієнт поглинання $K_{\lambda z}$ (м⁻¹) (середній в межах смуги)

$$K_{\lambda z} = \frac{-\ln(1 - \varepsilon_{\lambda z})}{S_{\text{эф}}}.$$

За запропонованою методикою спектроскопічні дані і моделі смуг використовуються лише для розподілу енергії випромінювання газу по смугах спектра. Коригування спектральних ступенів чорноти по експериментальним значенням інтегральної ступеня чорноти забезпечує

введення своєрідної поправки на обертальну структуру ліній в смузї, так як величина розрахункового середнього спектрального коефіцієнта поглинання у вигляді $K_{\lambda z} = (\alpha_z / \Delta\omega_z) \cdot P$ не відображає наявність проміжків між лініями в смузї і може бути застосована при високому тиску, коли окремі лінії спектра вже зливаються.

1.1.2 Радіаційні характеристики металу, що нагрівається

На рисунку 1.2 показано зміна інтегральної ступеня чорноти маловуглецевих сталей $\varepsilon(T)$ в залежності від часу витримки на повітрі при температурах 623 К і 673 К [12].

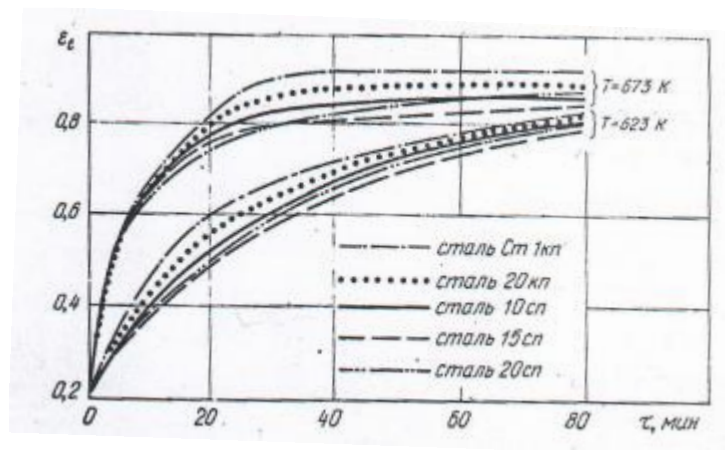


Рисунок 1.2 - Динаміка зміни інтегральної ступеня чорноти маловуглецевих сталей від часу (середовище – повітря)

З зіставлення динаміки зміни $\varepsilon(T)$ зразків сталей при температурах витримки 623 К і 673 К виявлено, що для температури 673 К характерне швидке зростання інтегральної ступеня чорноти. Це пояснюється початком інтенсивного утворення окисного шару на поверхні зразків.

На рисунку 1.3 представлені результати дослідження інтегральної ступеня чорноти мало вуглецевих сталей в залежності від температури [12].

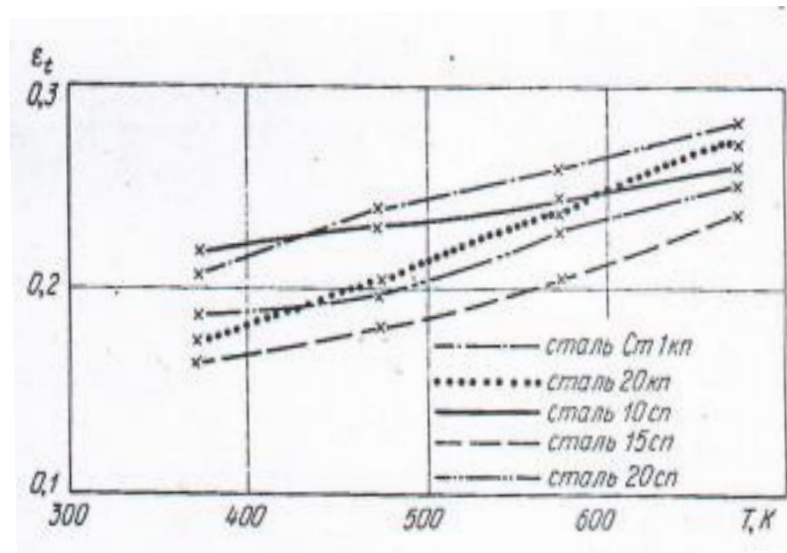


Рисунок 1.3 - Залежність інтегрального ступеня чорноти від температури (середовище – повітря)

У дослідженому діапазоні температур виявлено вплив температури на інтегральну ступінь чорноти мало вуглецевих сталей. Збільшення $\varepsilon(T)$ з ростом температури слід пояснити зміщенням максимуму енергії випромінювання абсолютно чорного тіла в сторону більш коротких довжин хвиль, де спектральна ступінь чорноти найбільша.

З метою визначення оптимальних умов протікання теплообміну в робочому просторі методичних печей в роботах [13, 14] проведено дослідження спектральної ступеня чорноти окалини $\varepsilon(\lambda, T)$, що утворюється на слябах з мало вуглецевих марок сталей при нагріванні в методичних печах. Вимірювання $\varepsilon(\lambda, T)$ виконані в інтервалі температур (1073...1473) К. Зразки окалини для дослідження відбирали з різних зон печей в залежності від часу нагріву металу. Виявлено істотне падіння $\varepsilon(\lambda, T)$ в короткохвильовому діапазоні спектра в процесі нагрівання металу (див. рис. 1.4, табл. 1.4).

Дослідженням стану поверхні зразків встановлено значне зниження шорсткості поверхні окалини в процесі нагрівання металу, що є причиною зменшення $\varepsilon(\lambda, T)$ в ближній інфрачервоній області спектра. Зміна шорсткості окалини пов'язано з оплавленням мікронерівностей на її поверхні.

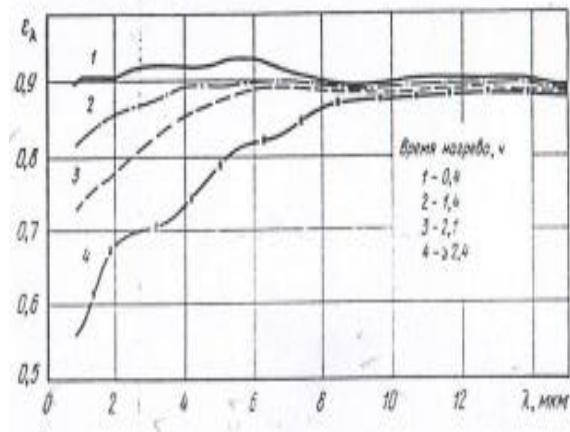


Рисунок 1.4 - Залежність спектральної ступеня чорноти окалини від довжини хвилі при різному часі нагріву металу в методичній печі

Таблиця 1.4 - Спектральна ступень чорноти окалини $\varepsilon(\lambda, T)$ при різному часі нагріву металу в печі

Довжина хвилі λ , мкм	Час нагріву, год				
	0,4	1,2	1,4	2,1	2,4
1	0,9	0,98	0,83	0,74	0,57
2	0,92	0,9	0,86	0,78	0,67
3	0,93	0,91	0,89	0,86	0,74
4	0,93	0,92	0,9	0,89	0,83

З цих даних можна зробити два висновки:

- падіння ступеня чорноти окалини зі збільшенням часу перебування металу в печі дуже істотно;

- найбільш різке падіння ступеня чорноти поверхні окалини спостерігається після $\tau = 2,1$ год.

Встановлено, що при досягненні температури (1260...1270) °С (час перебування в методичної печі становить близько 2,1 години) поверхня окалини набуває характерний блиск, який супроводжується значним

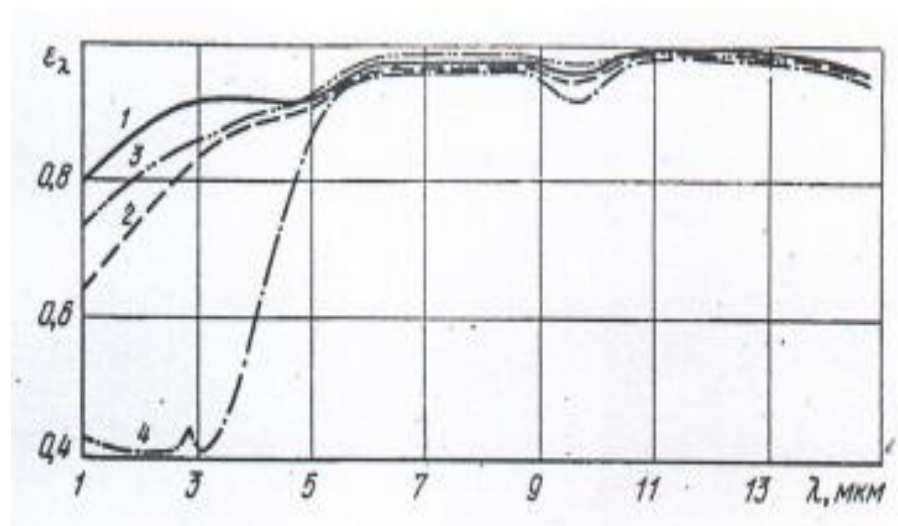
зниженням поглинальної здатності. Дослідження показали, що при досягненні зазначених температур поверхня окалини втрачає свою шорсткість і сплавляється.

1.1.3 Радіаційні характеристики кладки печі

Кладка печі - частина металургійної печі, складена з вогнетривкої цегли. Вогнетривка футеровка є активним елементом і надає суттєвий вплив на теплообмін випромінюванням в робочому просторі полум'яних печей.

В процесі експлуатації вогнетриви футерування зазнають значних змін під впливом високих температур і агресивних середовищ. В першу чергу змінюються поверхневі шари, властивості яких є визначальними при радіаційному теплообміні в промислових печах [15].

Результати вимірювань спектральної ступеня чорноти високо глиноземистих і шамотних вогнетривів представлені на рисунку 1.5 [16-18].



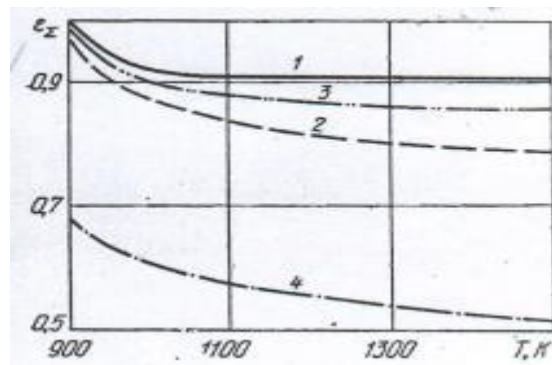
1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

Рисунок 1.5 - Залежність спектральної ступеня чорноти промислових вогнетривів від довжини хвилі

Спектральну ступінь чорноти вимірювали при температурах (700...1000) °С в діапазоні довжин хвиль (0,95...15) мкм при нагріванні зразків вогнетривів на повітрі.

Зі збільшенням терміну служби в нагрівальних печах спектральна ступінь чорноти вогнетривів зростає в діапазоні довжин хвиль (1...5) мкм. Після 2,5 років служби вогнетриви мають приблизно однаковий ступінь чорноти у всьому хвильовому діапазоні і наближаються за своїми властивостями до "сірих" тіл. Відомо, що вказаний діапазон довжин хвиль є найбільш важливим в енергетичному відношенні для теплообміну випромінюванням в печах.

Розрахункові значення інтегрального ступеня чорноти вогнетривів представлено на рисунку 1.6. Розрахунок виконано за спектральними кривими в діапазоні довжин хвиль (1...15) мкм (див. рис. 1.5). З отриманих кривих видно, що в процесі служби величина як високо глиноземистих, так і шамотних вогнетривів футерування зростає в 1,4 - 1,7 рази в порівнянні з новими вогнетривами.



1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

Рисунок 1.6 - Залежність інтегральної ступені чорноти від температури

1.2 Вплив ступеня чорноти кладки на променистий теплообмін в системі газ-кладка-метал

Якщо в системі газ-кладка-метал використовувати сіре наближення (радіаційні характеристики поверхонь теплообміну не залежать від довжини хвилі випромінювання) в описі радіаційних властивостей тіл, що беруть участь в теплообміні, то інтенсивність теплообміну не залежить від ступеня чорноти адіабатної кладки [19].

Випромінювання продуктів згоряння палива є селективним (радіаційні характеристики суттєво залежать від довжини хвилі випромінювання). Якщо при цьому вважати кладку адіабатною, то падаючий на неї від продуктів згоряння тепловий потік частково відбивається (прямо пропорційно величині $(1 - \varepsilon_K)$), а частково, поглинаючись, випромінюється власним випромінюванням (прямо пропорційно ступеня чорноти кладки ε_K), тобто [20]:

$$q_K^{\text{від}} = q_{\Gamma-K} \cdot (1 - \varepsilon_K),$$

$$q_K^{\text{вл}} = q_{\Gamma-K} \cdot \varepsilon_K.$$

Відбитий кладкою тепловий потік припадає на довжини хвиль смуг поглинання (і випромінювання) продуктів згоряння. Тому цей тепловий потік буде послаблюватися газовим шаром і до металу дійде частка, пропорційна $(1 - \varepsilon_\Gamma)$, тобто тепловий потік за вирахуванням поглиненої частини

$$q_{K-M}^{\text{від}} = q_{\Gamma-K} \cdot (1 - \varepsilon_\Gamma) = q_{\Gamma-K} \cdot (1 - \varepsilon_K) \cdot (1 - \varepsilon_\Gamma).$$

Власний променистий тепловий потік кладки розподіляється по всьому діапазону довжин хвиль, які припадають на довжини хвиль смуг поглинання і вікон прозорості. Частина цього теплового потоку, що припадає на вікна

прозорості, дійде до металу без послаблення. Друга частина, яка припадає на довжини хвиль смуг поглинання, буде послаблюватися і до металу дійде частина, пропорційна $(1 - \varepsilon_r)$.

Частку власного випромінювання від кладки, яка припадає на довжини хвиль смуг поглинання газу, приймають прямо пропорційної ступеня чорноти газу ε_r , а частку, що припадає на довжини хвиль вікон прозорості прямо пропорційної $(1 - \varepsilon_r)$, тобто

$$q_K^{ВЛ} = q_K^{ВЛ} \cdot \varepsilon_r + q_K^{ВЛ} \cdot (1 - \varepsilon_r) = q_{Г-К} \cdot \varepsilon_K \cdot \varepsilon_r + q_{Г-К} \cdot \varepsilon_K \cdot (1 - \varepsilon_K).$$

До металу частка власного випромінювання кладки, яка припадає на вікна прозорості, дійде без ослаблення, тобто

$$q_{К-М}^{ВЛ'} = q_K^{ВЛ} \cdot (1 - \varepsilon_r) = q_{Г-К} \cdot \varepsilon_K \cdot (1 - \varepsilon_r).$$

Частка власного випромінювання кладки, яка припадає на смуги поглинання, послаблюється в $(1 - \varepsilon_r)$ раз і буде дорівнювати

$$q_{К-М}^{ВЛ''} = q_{Г-К} \cdot \varepsilon_K \cdot \varepsilon_r \cdot (1 - \varepsilon_r).$$

Сумарний тепловий потік власного випромінювання кладки, що дійшов до поверхні металу після взаємодії з продуктами згоряння складе

$$q_{К-М} = q_{К-М}^{Від} + q_{К-М}^{ВЛ'} + q_{К-М}^{ВЛ''} = q_{Г-К} \cdot (1 - \varepsilon_r)(1 + \varepsilon_r \cdot \varepsilon_K).$$

Після перетворення можна визначити частку променистого теплового потоку продуктів згоряння, що досягає поверхні металу після взаємодії з внутрішньою поверхнею адіабатною кладки без урахування кутового коефіцієнта з кладки на метал

$$\frac{q_{\text{к-м}}}{q_{\text{Г-к}}} = (1 - \varepsilon_{\text{Г}})(1 + \varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{К}})$$

Загальний тепловий потік, який падає на метал, з урахуванням теплового потоку не тільки від кладки, а й від продуктів згоряння, а також геометрії системи

$$\begin{aligned} q_{\text{М}}^{\text{пад}} &= q_{\text{к-м}} \cdot \varphi_{\text{к-м}} + q_{\text{Г-м}} \cdot \varphi_{\text{Г-м}} = \\ &= q_{\text{Г-к}} \cdot \varphi_{\text{к-м}} \cdot [(1 - \varepsilon_{\text{Г}})(1 + \varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{К}})] + q_{\text{Г-м}} \cdot \varphi_{\text{Г-м}}, \end{aligned}$$

де $\varphi_{\text{к-м}} = F_{\text{М}}/F_{\text{К}}$ - кутовий коефіцієнт кладка-метал;

$\varphi_{\text{Г-м}} = F_{\text{М}}/(F_{\text{М}} + F_{\text{К}})$ - кутовий коефіцієнт газ-метал.

При рівномірно розподіленому режимі теплообміну $q_{\text{Г-к}}/q_{\text{Г-м}} = 1$, тоді

$$q_{\text{М}}^{\text{пад}} = q_{\text{Г-к}} \cdot [\varphi_{\text{к-м}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Г}})(1 + \varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{К}}) + \varphi_{\text{Г-м}}].$$

Відношення загального променистого теплового потоку, що падає на метал від кладки і продуктів згоряння палива, до теплового потоку від продуктів згоряння до кладки (відносний загальний тепловий потік до металу), [20] складе

$$\frac{q_{\text{М}}^{\text{пад}}}{q_{\text{Г-к}}} = \varphi_{\text{к-м}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{Г}})(1 + \varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{К}}) + \varphi_{\text{Г-м}}.$$

1.3 Методичні нагрівальні печі

Методичні нагрівальні печі широко застосовуються в прокатних і ковальських цехах для нагрівання квадратних, прямокутних, і круглих заготовок [21].

За способом генерації теплоти всі печі поділяють на паливні і електричні. За умовами теплопередачі вони підрозділяють на печі:

- а) з теплопередачею випромінюванням;
- б) з теплопередачею конвекцією.

Робота печей характеризується тепловою потужністю, тепловим навантаженням, температурним та тепловим режимами. За тепловим режимом печі поділяють на печі:

- а) працюючі по камерному режиму;
- б) працюючі по методичному режиму.

У печах, що працюють по камерному режиму, температура робочого простору залишається постійною протягом всього часу роботи печі. У печах, що працюють по методичному режиму, температура в печі змінюється по довжині печі або в часі.

За методом транспортування металу методичні печі відносяться до прохідних печей. Найбільш важливими класифікаційними ознаками методичних печей є:

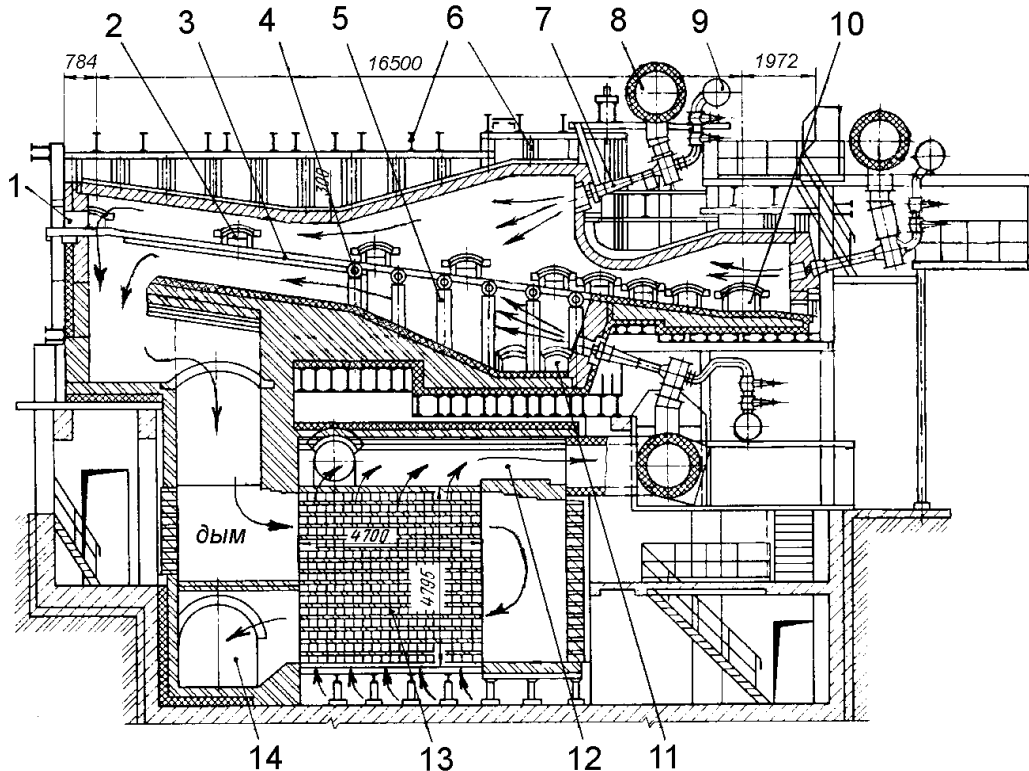
- а) температурний режим печі (по довжині);
- б) двосторонній або односторонній характер нагрівання металу;
- в) спосіб видачі металу з печі (бічна або торцева видача).

Крім того, класифікація виконується по виду нагріваються заготовок, методу утилізації тепла відхідних димових газів, виду палива, кількістю рядів заготовок в печі.

Конструкція методичної печі залежить від характеристик металу, що нагрівається, продуктивності стану і виду палива, на якому працює піч. Параметри металу визначають наявність або відсутність таких важливих складових частин печі: кількох ділянок підведення палива в зварювальну зону, томильну зону і зони нижнього підігріву. Від форми заготовок залежить горизонтальне або похиле розташування поду печі. При нагріванні тонких заготовок (50...60) мм, які з одного боку прогриваються досить швидко, можна не застосовувати нижній обігрів. Нагріваючи циліндричну

заготовку, яку не можна проштовхувати, необхідно робити похилий під по всій довжині, щоб заготовки могли перекочуватися.

На рисунку 1.7 зображена методична тризонна піч.



1-вікно посада, 2 - оглядові вікна; 3,4,5 - поздовжні (глісажні) поперечні і вертикальні опорні труби; 6 - металеві балки каркаса; інжекційні пальники - 7, 8- трубопровід гарячого повітря; 9 - трубопровід газу; вікно видачі 10, 11- вікна для прибирання шлаку ; 12- збірний канал гарячого повітря; керамічний рекуператор 13, 14- димової борів.

Рисунок 1.7– Методична тризонна піч

Вид застосовуваного палива обумовлює вибір таких конструктивних елементів печі, як рекуператори і пальники. В якості палива для методичних печей використовуються суміші коксового та доменного газів з різною теплотою згорання, природний газ і різні суміші природного, коксового та доменного газів, а також рідке паливо – мазут.

Для досягнення потрібної робочої температури в печі необхідно, щоб калориметрична температура горіння становила 1800 °С і більше. Подібна калориметрична температура може бути досягнута при використанні:

1) газу з низькою теплотою згоряння, тобто $Q_{\text{н}}^p = (5,0 \dots 5,8)$ МДж/м³, аж до чистого доменного газу з підігрівом повітря до (500...550) °С і газу до (250...300) °С;

2) холодного газу, що характеризується середньою теплотою згоряння, рівною 8,4 МДж/м³, з підігрівом повітря до (450...500) °С і застосуванням пальників будь-якої конструкції – як з попередніми, так і з зовнішнім змішуванням;

3) висококалорійного палива – газу з теплотою згоряння вище 12,57 МДж/м³ або мазуту. У цьому випадку утилізація тепла відхідних димових газів переслідує тільки одну мету – підвищити економічність роботи печі (знизити витрату палива), а для підвищення калориметричної температури підігрів повітря і газу в даному випадку необов'язкові.

1.3.1 Методичні печі, що працюють на газоподібному паливі з низькою теплотою згоряння

Піч опалюється за допомогою інжекційних пальників, які працюють на підігрітому повітрі (до 550°С) і газі (до 300°С). Застосування інжекційних пальників дозволяє найбільш раціонально використовувати хімічне тепло палива, так як при безполум'яному горінні досягається прискорення процесів горіння та наближення дійсної температури горіння до теоретичної (при зменшенні надлишку повітря і доведення до мінімуму недопалу палива).

У цих печах повітря для горіння засмоктується з атмосфери через розташований під піччю керамічний рекуператор (об'ємом 125 м³) і систему повітропроводів. Газоподібне паливо зазвичай підігрівається в трубчастому металевому рекуператорі, що встановлюється в димовому борві послідовно за повітряним рекуператором.

Подібні печі працюють дуже ефективно, забезпечуючи питому продуктивність ~ 550 кг/(м²·час). Однак ці печі мають велику кількість недоліків. Вони практично працюють на межі своїх можливостей. Підвищити температуру підігріву повітря вище 550 °С не можна, щоб уникнути samozаймання суміші в корпусі пальника. Здійснити стійкий підігрів газу вище 300°С також важко, оскільки температура димових газів за керамічним рекуператором не перевищує (550...600) °С [21].

1.3.2 Методичні печі, що працюють на газі високої теплоти згоряння

У печах, що працюють на паливі високої теплоти згоряння, підігрів газу не є необхідним. Підігрів повітря в металевих рекуператорах до (300...400) °С необхідний тільки в тих печах, які працюють на паливі теплотою згоряння (9,8...10,5) МДж/м³, при теплоті згоряння вище 10,5 МДж/м³ підігрів повітря для досягнення необхідної температури горіння не обов'язковий, проте для зменшення витрати палива підігрів повітря завжди доцільний.

Крім палива, конструкція методичних печей значною мірою залежить від необхідної продуктивності. Висока продуктивність методичних печей може бути забезпечена шляхом збільшення розмірів печей і підвищення їх питомої продуктивності. Для підвищення питомої продуктивності печей необхідно вести нагрівання металу форсовано, для чого слід підняти температурний рівень по всій довжині печі. З цією метою стали застосовувати печі з двома рядами пальників у верхній частині зварювальної зони печей. Одна з таких печей для нагріву слябів представлена на рисунку 1.8.

Піч розрахована на опалення паливом з високою теплотою згоряння при підігріві повітря в керамічному рекуператорі до (400...450) °С. Повітря просочується через рекуператор за допомогою екстаустера. Застосовуються турбулентні пальника низького тиску [21].

пічних стінок і, отже, створюється передумова до застосування методу розрахунку нагрівання металу за умови $t_2 = const$. Винятки становлять: зона I (методична), де відбувається теплообмін із зміною температури теплоносіїв, відповідним протитоку, і зона III (витримки), в якій температура середовища повинна бути змінена відповідно до вимог режиму витримки. Внаслідок того, що камери даної печі конструктивно відособлені, теплообмін випромінюванням вздовж пічного каналу не має істотного значення.

2. Печі, що підрозділені на ряд камер з самостійним введенням палива, в яких режими руху і горіння газів такі, що в межах кожної камери (поширений приклад конструкції представлений на рисунку 1.10) ефективна температура пічної середовища змінюється. Завдяки перепаду висоти пічного каналу на кордонах камер випромінювання уздовж печі так само, як у попередньому випадку, не може бути істотним. I – III – зони за теплотехнічними ознаками; 1 – 5 – зони за конструктивними ознаками.

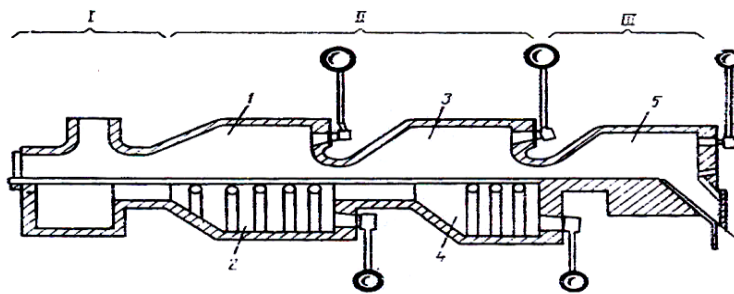


Рисунок 1.10 – Тризонна методична піч

3. Печі, які не мають на всьому протязі або на значних за довжиною ділянках будь-яких пережимів склепіння, що відокремлюють частини пічного каналу одну від іншої (див. рис. 1.11), характеризуються безперервною зміною температури пічного середовища. Однак теплові потоки, що сприймаються матеріалом, що нагрівається, не визначаються місцевою ефективною температурою внаслідок вельми істотного перенесення променистого тепла уздовж печі [21].

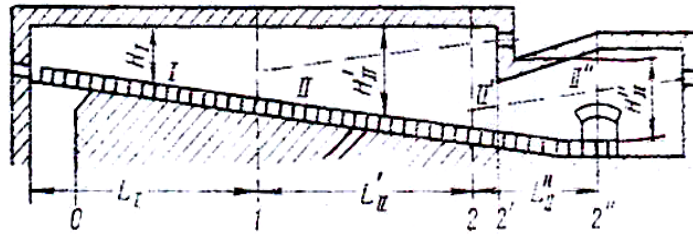


Рисунок 1.11 – Двзонна методична піч з неканалізованим подом і розосередженим підведенням тепла

Профіль зводу методичних печей значною мірою відповідає графіку зміни температури по довжині печі (див. рис. 1.12).

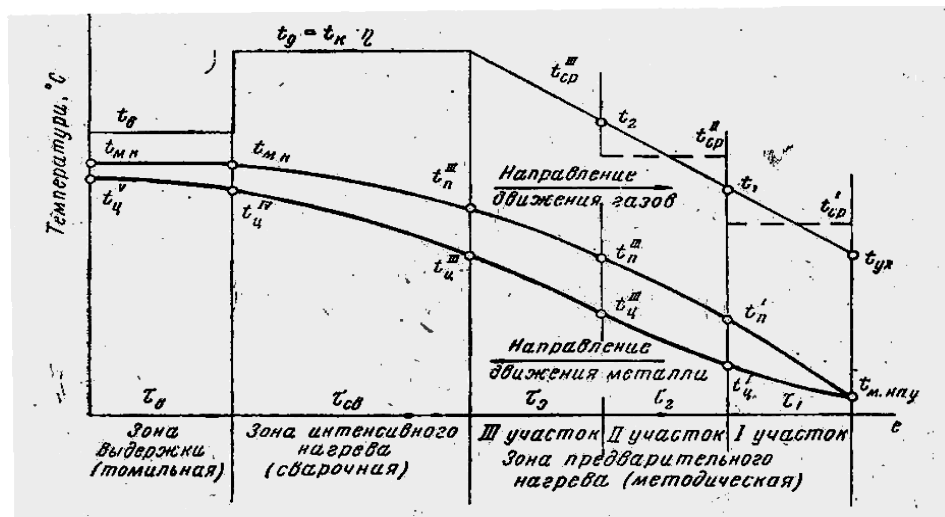


Рисунок 1.12 – Зміна температури газів і металу по довжині методичної печі

1.4 Прохідні нагрівальні печі

Прохідна нагрівальна піч з крокуючим подом - прохідна піч безперервної дії, в якій переміщення заготовок здійснюється за допомогою крокового механізму пода, що забезпечує підйом і переміщення садки на

крок. Піч обладнана торцевими, сводовими або бічними пальниками, розташованими вище нагрівасмого металу (одностороннє верхнє опалення).

Заготовки розміщуються на поду, поперек ходу балок, а нагрів проводиться зверху. Рухаються заготовки через камеру нагріву зворотно-поступальними рухами рухливих частин пода [21].

Прохідна нагрівальна піч з крокуючими балками - прохідна піч безперервної дії, в якій заготовки переміщуються за допомогою системи металевих рухливих балок, які піднімають, переміщують і укладають садку на крок вперед на нерухомі балки. Піч обладнана торцевими, сводовими або бічними пальниками в верхніх зонах і торцевими або бічними пальниками в нижніх зонах (двостороннє верхнє і нижнє опалення).

Принципові схеми печей зображені на рисунку 1.13.

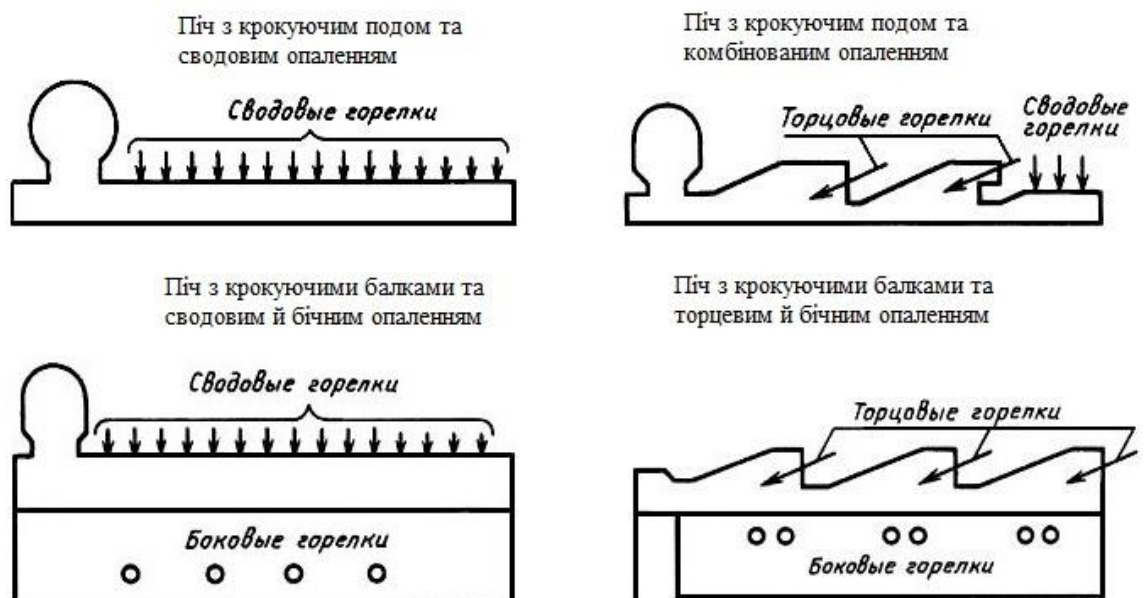


Рисунок 1.13 – Схеми прохідних печей

Цикл нагріву металу - час, протягом якого окрема заготівля знаходиться в печі.

Нагрівання печей проводиться продуктами горіння природного газу. Печі з крокуючим подом застосовуються, переважно для нагріву заготовок з

товщиною (діаметром) до 150 мм. Продуктивність подібних печей, як правило, не перевищує 130 т [22].

1.5 Опис конструкції печі з крокуючим подом

1.5.1 Корпус

Корпус збирається в єдиний нагрівальний блок з пічних футерованих модулів, планшетів, перекриттів і т.п. Пічні модулі збираються на рамі опори печі, кріпляться між собою і до опорних рам. Рама опори печі складається з масивних сталевих металоконструкцій. Рівень своду печей виконаний на різних рівнях, включаючи похилі ділянки. Частина склепіння додатково фіксується (підвішується) за допомогою масивних балкових перекриттів. До елементів печі, що знаходиться на узвишші (пальники, засувки) підведені сходові марші та площадки для обслуговування. У корпусі є ущільнювані отвори для прибирання окалини і технічного обслуговування [23].

1.5.2 Стаціонарні балки (под печі)

Стаціонарні балки (под печі) збирається з бетонних плит, армованих металом. Нижче йдуть шари з волокнистої теплоізоляції. Рухомий під печі складається з декількох рядів крокуючих балок. Внизу у балок рухомого пода є спеціальні кожуха, направляючі окалину в канали гідрозмиву і ножі водяного затвора. Плоскість поверхні балок крокуючого пода і елементи стаціонарного знаходиться на одному рівні в паузах між крокуванням.

1.5.3 Конструкція крокуючих балок пода

Конструкція крокуючих балок пода складається з рами вертикального переміщення і рами горизонтального переміщення, проміжних роликів,

гідроприводів, і похилих опор. Взаємне переміщення двох рам (крок) щодо нерухомого пода переміщує заготовки в процесі роботи.

1.5.4 Пристрої водяного затвора

Для запобігання вільного з'єднання пічних газів і повітря передбачені водяні ущільнення. Водяні ущільнення виконані у вигляді поздовжніх каналів (баків) з елементами лабіринтових ущільнень [23].

1.5.5 Механізм пічної заслінки

По краях бічних стінок печі достовляючого і відвідного рольгангов, розташовані пічні заслінки. Сторона підведення і відведення узгоджується з замовником, виходячи з планування цеху. Пічні заслінки переміщуються у вертикальній площині по спеціальних напрямних за допомогою приводів.

1.5.6 Пічної рольганг завантаження

Пічної рольганг завантаження є проміжною ланкою між балками печі. Пічної рольганг являє собою зварену раму, на якій розміщені консольні ролики. Ролики виконані водоохолоджуваними. Робоча частина роликів розміщена в пічному просторі. Датчик довжини заготовки визначає її довжину і видає сигнал приводам на виконання переміщення і зупинки заготовки в потрібному місці.

1.5.7 Система опалення печі

Нагрівання печі здійснюється теплом, виділеним при горінні природного газу (опціонально мазут). Залежно від довжини, ширини печі і принципової схеми опалення печей можуть застосовуватися різні пальники

за типом і місцем розташування (див. рис. 1.13). У печі застосовуються сучасні пальники з низьким викидом NO_x , такі як плоскоплум'яні, пальники типа труба в трубі і т.п. Як правило, подібні печі мають методичну, зварювальну та томильную зони. Кожен пальник обладнаний необхідною арматурою і комутований в певну зону нагріву.

1.5.8 Рекуператор

По ходу димового каналу розміщується теплоізольована камера з трубчастим рекуператором. Повітря горіння (до надходження на пальники) проходить через рекуператор, де підігрівається відходними димовими газами. Відпрацьовані гази після рекуператора направляються в димову трубу [23].

1.5.9 Система водяного охолодження

Система водяного охолодження призначена для подачі води для зниження температури експлуатації деяких пічних пристроїв (пічні рольганги і т.п.). Система водяного охолодження включає: гідравлічні рукава, клапани, крани, вентилі, реле протоки рідини, ніпелі для приєднання гідравлічних рукавів і т.п.

1.5.10 Гідравлічна система печі

Гідравлічна система печі включає насосну станцію, гідроциліндри, дроселі, гідравлічні магістралі, фільтри, масляний бак, необхідну арматуру і т.д. Додатково може бути встановлена телевізійна система пічного відеоспостереження. Система відеоспостереження показує зображення внутрішнього обсягу нагрівальної печі (розташування заготовок в печі) під час виробничого процесу нагріву заготовок.

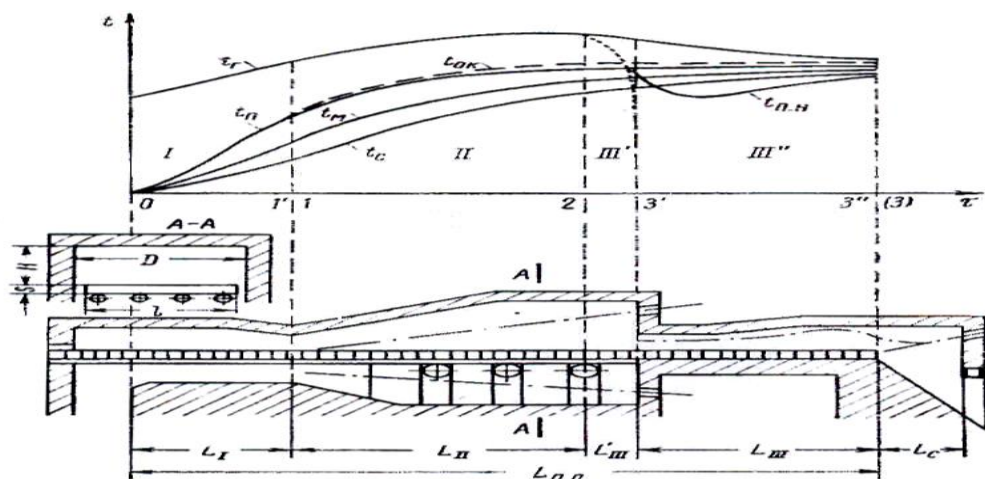
1.5.11 Автоматизація печі (АСУ)

Нагрівальна піч обладнана автоматизованою системою управління нагрівальними печами (АСУ ТП). Система АСУ піччю змонтована в шафах, локальних пультах управління із застосуванням промислового ПК, логічного контролера і т.д. Рівень управління може узгоджуватися, а система АСУ може інтегруватися з іншими установками [23].

1.6 Нагрів металу

Під режимом нагріву мають на увазі характер зміни температури пічних газів і металу в часі. Узагальнено цей режим може бути визначений як тризонний і двозонний.

При роботі печі за тризонним режиму (див. рис. 1.14) у першій по ходу металу зоні (зоні I або методичної) відбувається нагрів металу за рахунок фізичного тепла продуктів згоряння, яке завершується на кордоні зон I і II. Так як віддача фізичного тепла викликає охолодження газів, то їх температура по довжині зони I помітно знижується [25].



I – III – зони печі; 0, 1, 2, 3 – межі розрахункових зон

Рисунок 1.14 – Схема тризонною методичної печі і її температурного режиму

Характер температурного режиму нагрівальної печі визначається пластичністю матеріалу, термічною масивністю виробів, що наріваються, початковим і необхідним кінцевим станом металу, конструктивними особливостями печі. При режимі є три теплотехнічні зони: методична, зварювальний і томильною.

Процес нагріву металу представлений на рисунку 1.15. Метал послідовно проходить через методичну, зварювальну та томильну зони у протитечії димовим газам. При досягненні потрібної температури на поверхні та по товщині заготовки вона видається на рольганг прокатного стану. Димові гази рухаються у напрямі до завантажувального вікна, проходять через керамічний та металевий рекуператор, після чого проходять фільтрацію від шкідливих складових та викидаються в атмосферу через димову трубу.

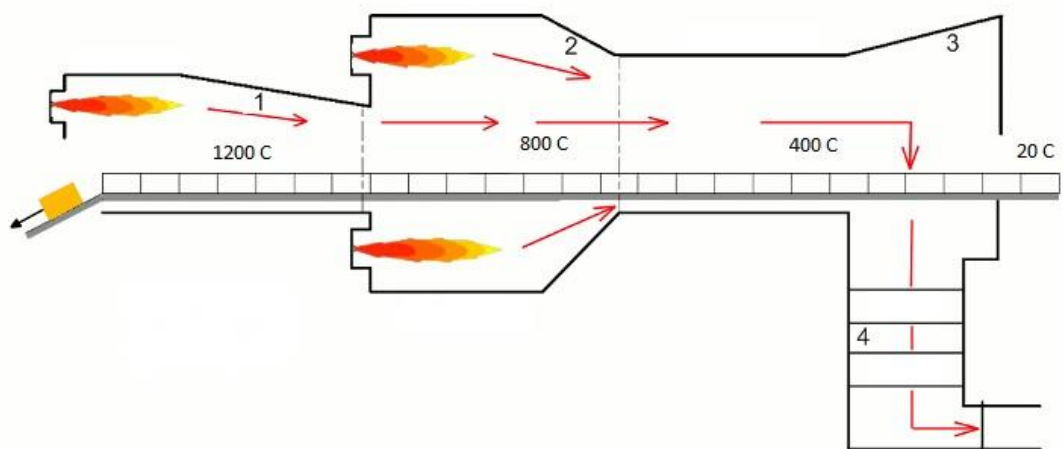


Рисунок 1.15 – Нагрів металу в методичній печі (1 – томільна зона, 2 – зварювальна зона, 3 – методична зона, 4 – керамічний та металевий рекуператори)

У зоні II (зварювальна зона), спалюється паливо і на поверхні матеріалу, що нагрівається, досягається максимальна температура. Виділення тепла при горінні в тій чи іншій мірі компенсує віддачу тепла газами, і цим

стримується зниження їх температури. Проте зазвичай при введенні палива через торцеві пальники (або форсунки) спостерігається зниження температури газів від кордону 2 до межі 1 та до торцевої стінки, в якій встановлені паливоспалювальні пристрої.

Перше обумовлено посиленням відбором тепла більш холодними заготовками, які надходять із зони I в зону II. Друге пояснюється тим, що поблизу пальників або форсунок тільки починається нагрівання газів теплом, що виділяються при горінні.

Очевидно, що підвищенням тепловиділення на початку і кінці зони II шляхом відповідного розташування пальників або форсунок можна домогтися вирівнювання температури газів по всій довжині зони.

Призначенням зони III є вирівнювання температури в об'ємі заготовок, що нагріваються. При русі останніх по водоохолоджуваних глиссажних трубах на нижній поверхні заготовок залишаються смуги зі зниженою температурою (темні смуги). Знаходження заготовок на суцільному поді зони III дозволяє вирівняти нагрівання нижній поверхні і одночасно зменшити перепад температури на товщині заготовок.

Двוזонний режим роботи методичних печей передбачає нагрівання металу в зонах I і II, але виключає витримку.

Велике значення для роботи методичних печей має спосіб видачі металу з печі. Розрізняють торцеву і бічну видачі металу. При торцевій видачі необхідний один штовхач, який виконує роль виштовхувача. Для печей з бічною видачею встановлюють не тільки штовхач, але і виштовхувач, тому такі печі при розміщенні в цеху вимагають великих площ. Однак з точки зору теплової роботи печі з бічною видачею мають переваги. При торцевій видачі через вікно видачі, яке розташовано нижче рівня поду печі, відбувається інтенсивне підсмоктування холодного повітря. Явище підсосу посилюється інжектуючою дією пальників, що розміщені у торці томильної зони. Підсос в піч холодного повітря викликає зайві витрати палива і сприяє інтенсивному «заростанню» подини печі окалиною [24].

В методичних печах з нижнім обігрівом метал прошовується по водоохолоджуваним опорним трубам.

1.7 Теплотехнічні зони печі

1.7.1 Методична зона

Одним з факторів, що лімітують швидкість нагріву металу, є термічні напруги, які обумовлені різницею температур. Зовнішні більш нагріті шари прагнуть розширитися і тому знаходяться в стислому стані. Внутрішні більш холодні шари схильні при цьому до розтягуючих зусиль. Якщо ці напруги не перевищують межі пружності, то з вирівнюванням температури по перетину термічні напруги зникають. Сталь (за винятком деяких спеціальних марок) володіє пружними властивостями до температури (450...500) °С. Вище цієї температури вона переходить в пластичний стан. Отже, температурні напруги повинні враховуватися до переходу металу з пружного стану в пластичне. Тому рекомендується повільний (методичний) нагрів заготовок до тих пір, поки температура центру не перевищить 500 °С.

Перша (по ходу металу) зона має непостійну по довжині температуру і називається методичною зоною. Спалювання палива в цій зоні не проводиться. У ній метал поступово підігрівається до надходження в опалювальну зону високих температур (зварювальну зону). Щоб уникнути виникнення надмірних термічних напруг необхідне повільне нагрівання масивних тіл, в інтервалі температур від 0 до 500 °С. Поступовий нагрів металу в методичній зоні забезпечує таку швидкість нагріву, при якій не виникає неприпустимого перепаду температур по перетину заготовки [26].

1.7.2 Зварювальна зона

Друга (по ходу металу) зона називається зоною високих температур або зварювальною зоною. Призначення цієї зони - швидке нагрівання поверхні

заготовки до кінцевої температури, що становить 1150 - 1250 °С. Для інтенсивного нагріву поверхні металу до цих температур в зварювальній зоні необхідно забезпечувати температуру на 150 - 250 °С і вище.

В зварювальній зоні при прискореному нагріванні температура газів залишається постійною. Так як температура поверхні металу змінюється по ходу нагріву, то коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням буде також змінюватися [26].

1.7.3 Томільна зона

Третя (по ходу металу) томільна зона (зона витримки) служить для вирівнювання температури по перетину металу і ліквідації холодних плям на нижній поверхні заготовок. У зварювальній зоні до високих температур нагрівається тільки поверхня металу; температура середніх шарів металу, значно менше температури поверхні, тобто створюється перепад температур по перетину металу, неприпустимий за технологічними вимогами. У томільну зону метал надходить з цим перепадом температур по товщині. Температуру в томільній зоні підтримують всього на (50...70) °С вище необхідної кінцевої температури нагрівання металу. Тому температура поверхні металу в томільній зоні практично не змінюється і підтримується на досягнутому в зварювальній зоні рівні; відбувається тільки вирівнювання температури по товщині металу в умовах рівномірно розподіленого радіаційного режиму зовнішнього теплообміну [26]. Це легко досягається застосуванням існуючих засобів автоматизації теплового режиму печей.

У печах з томільною зоною температура поверхні металу трохи нижче, ніж в методичних печах без цієї зони, але метал краще прогрівається по перетину під час томління в печі.

Паливоспалювальні пристрої томільної і зварювальної зон розташовують на торцевих стінках печі, але є методичні печі, де паливоспалювальні пристрої розташовані на бічних або сводових стінах

зварювальної зони. Це дозволяє забезпечити постійну високу температуру по довжині зони і інтенсифікувати роботу печі. Однак при цьому ускладнюються обслуговування печі і її автоматизація. Наявність томильної зони в трьохзонних печах підвищує продуктивність печей на (15...20) % [27].

Аналіз об'єкту дослідження показав:

1. Зі збільшенням терміну служби в нагрівальних печах спектральна ступінь чорноти вогнетривів зростає в діапазоні довжин хвиль (1...5) мкм. Після 2,5 років служби вогнетриви мають приблизно однаковий ступінь чорноти у всьому хвильовому діапазоні і наближаються за своїми радіаційними властивостями до "сірих" тіл.

2. Діапазон довжин хвиль (1...5) мкм є найбільш важливим в енергетичному відношенні для теплового випромінювання в печах. Тому збільшення спектральної ступені чорноти вогнетривів в зазначеному діапазоні повинно помітно позначитися, як на величині інтегральної ступені чорноти кладки ε_2 , так і на величині результуючого теплового потоку q_1^p :

- інтегральна ступінь чорноти кладки ε_2 зростає:

1) для високо глиноземистого вогнетриву після 8 місяців і 2,5 років служби на 60 % і на 70 % відповідно;

2) для шамотного вогнетриву після 1 року служби на 54 %;

- збільшення ε_2 сприяє підвищенню:

1) температури кладки T_2 в середньому для всіх вогнетривів на (4...5) °С;

2) результуючого теплового потоку q_1^p в середньому для всіх вогнетривів на (14...17) %.

3. Виконано розгляд конструкції та принципу дії прохідних нагрівальних печей з рухливим подом, їх тепловий та температурний режими:

- з крокуючими балками або крокуючим подом;

- торцевим, бічним, сводовим або комбінованим опаленням.

4. Розглянуто особливості роботи печі зі сводовим опаленням їх переваги та недоліки:

- заготовки не труться об подину та між собою і не отримують механічних пошкоджень;
- при ремонтах піч легко звільняється від заготовок;
- в печі легко варіюється односторонній і тристоронній нагрів заготовок;
- початкова окалина яка тільки з'явилась не обсипається і захищає заготовки від подальшого окислення, що знижує чад сталі до 1 %;
- знижена витрата палива за рахунок відсутності глісажних труб.
- легко можна здійснити багатозонний режим нагріву;
- недостатньо відрегульовані плоскополум'яні пальники можуть викликати місцевий перегрів металу;
- в процесі крокування окремі заготовки можуть кантуватися і тим самим розбивати подину.

2 РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕЧІ З КРОКУЮЮЧИМ ПОДОМ ЗІ СВОДОВИМ ОПАЛЕННЯМ

2.1 Визначення основних геометричних розмірів печі

2.1.1 Вихідні дані

Розрахувати піч з крокуючим подом для нагріву блюмів середнєвуглецевої сталі продуктивністю $P = 83,33$ кг/с (300 т/год). Блюм має перетин $0,25 \times 0,25$ м² і довжину $L = 11$ м. Піч опалюється природним газом за допомогою плоскополум'яних пальників. Початкова температура металу $t_M^{\text{нач}} = 0$ °С, кінцева температура поверхні $t_M^{\text{кон}} = 1200$ °С, перепад температур по перетину блюма в кінці нагріву $\Delta t_{\text{кон}} = 50$ °С.

2.1.2 Розрахунок горіння палива

Результати розрахунку горіння природного газу $Q_H^p = 35069,6$ кДж/м³ [28]:

- склад продуктів згоряння: 9,14 % CO₂; 17,94 % H₂O; 0,91 % O₂, 72,01 % N₂;

- об'єм повітря і продуктів згоряння при спалюванні газу з коефіцієнтом витрати повітря $n = 1,05$: $V_g = 9,79$ м³/м³; $V_d = 10,8$ м³/м³.

Ентальпія продуктів згоряння, кДж/м³

$$i_0 = \frac{Q_H^p}{V_d} = \frac{35069,6}{10,8} = 3247,18.$$

Цій ентальпії відповідає калориметрична температура горіння, °С

$$t_k = 1966.$$

2.1.3 Розрахунок часу нагрівання металу

Визначимо орієнтовні розміри печі. При однорядному розташуванні металу ширина печі, м

$$B = L + 2 \left(\frac{0,2}{0,3} \right) = 11,5.$$

У печах з плоскополум'яними пальниками звід виконується не профільованим і по всій довжині печі можна прийняти висоту склепіння $H = 1,0$ м. Довжина печі буде знайдена після розрахунку часу нагріву металу.

Час нагріву металу в печі з плоскополум'яними пальниками (сводовим опаленням) розраховуємо за формулою, с

$$\tau = \frac{S_{cp}(t_{кон} - t_{нач})10^3}{q}, \quad (2,1)$$

де $q = \frac{q_{нач} - q_{кон}}{\ln \frac{q_{нач}}{q_{кон}}}$ - середня в межах зони щільність результуючого потоку

на метал, що нагрівається, Вт/м²;

$q_{нач}, q_{кон}$ - щільність результуючого потоку на метал на початку і в кінці даної зони, Вт/м²;

S - розрахункова товщина металу, м;

c - середня в інтервалі температур $t_{нач} - t_{кон}$ теплоємність металу, кДж/(кг · К);

ρ - щільність металу, кг / м³;

$t_{кон} = t_{кон}^{пов} - \frac{2}{3}(t_{кон}^{пов} - t_{кон}^{центр})$ - середня по перерізу температура металу в кінці зони, °С;

$t_{нач} = t_{нач}^{пов} - \frac{2}{3}(t_{нач}^{пов} - t_{нач}^{центр})$ - то ж на початку зони, °С.

Щільність потоку результуючого випромінювання на метал для печі зі сводовим опаленням, Вт/м²

$$q_M = \varepsilon_M \left[C_{\text{пр}} \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] - \varepsilon''_{\phi} \left[C_{\text{пр}} \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T''_{\phi}}{100} \right)^4 \right] + \varepsilon'_{\phi} (1 - \varepsilon''_{\phi}) \left[C_{\text{пр}} \left(\frac{T'_{\phi}}{100} \right)^4 - C_0 \left(\frac{T_K}{100} \right)^4 \right], \quad (2,2)$$

де $C_{\text{пр}} = C_0 - \frac{1 - \varepsilon_K}{\varepsilon_K} \frac{q_{\phi, \text{конв}}^K}{\left(\frac{T_K}{100} \right)^4}$ - наведений коефіцієнт випромінювання

системи, Вт/(м² · К⁴);

$C_0 = 5,7$ - Вт/(м² · К⁴);

$\varepsilon'_{\phi}, T'_{\phi}$ - ступінь чорноти і температура газів в зоні горіння (див. рис. 2.1);

$\varepsilon''_{\phi}, T''_{\phi}$ - теж, в зоні теплообміну;

$q_{\phi, \text{конв}}^K$ - щільність конвективного теплового потоку від факела на кладку, Вт/м²;

$\varepsilon_M, \varepsilon_K$ - ступінь чорноти металу і кладки, відповідно.

Температуру кладки T_K знаходимо по вираженню, К

$$T_K = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{\phi, \text{конв}}^K}{C_0 \varepsilon_K} + \frac{1}{C_0} \left[q_{\phi}^K + \varepsilon_M C_0 \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 (1 - \varepsilon'_{\phi})(1 - \varepsilon''_{\phi}) \right]}, \quad (2,3)$$

де

$$q_{\phi}^K = C_0 \left[\varepsilon'_{\phi} \left(\frac{T'_{\phi}}{100} \right)^4 + \varepsilon''_{\phi} (1 - \varepsilon'_{\phi}) \left(\frac{T''_{\phi}}{100} \right)^4 \right] \quad (2,4)$$

- щільність потоку випромінювання від факела на кладку, Вт/м².



Рисунок 2.1 - Схема теплообміну в печі з плоскополум'яними пальниками

Можна прийняти, що температура зони горіння по всій довжині печі дорівнює дійсній температурі горіння палива, °С

$$t_{\text{действ}} = \eta_{\text{пир}} t_{\text{к}} = (0,75 \div 0,85) t_{\text{к}}. \quad (2,5)$$

У нашому випадку

$$t'_{\phi} = t_{\text{действ}} = 0,82 \cdot 1966 = 1600.$$

Температуру газів в зоні теплообміну можна прийняти рівною, °С

$$t''_{\phi} = 0,5(t'_{\phi} + t_{\text{м}}^{\text{пов}}). \quad (2,6)$$

З виразу (2,5) випливає, що температура зони теплообміну змінюється по довжині печі.

Температуру центру виробу можна знайти за формулою, °С

$$t_{\text{центр}} = t^{\text{пов}} - \frac{qS}{2\lambda'}. \quad (2,7)$$

де $t^{\text{пов}}$ - температура поверхні металу в перерізі печі, °С;

q - щільність результуючого потоку на метал в тому ж перерізі, Вт/м²;

λ - коефіцієнт теплопровідності металу при середній температурі в перерізі, Вт/(м · К).

Приймаємо, що проєктована піч має три теплові зони: методичну, зварювальну, томильну; в кінці методичної зони температура поверхні металу дорівнює 600 °С, а в кінці зварювальної 1200 °С.

2.2 Час нагріву металу в методичній зоні

Температура газів в зоні теплообміну дорівнює [див. формулу (2,5)]:

- на початку методичної зони, °С

$$t''_{\text{ф.нач}} = \frac{(1600 + 0)}{2} = 800;$$

- в кінці методичної зони, °С

$$t''_{\text{ф.кон}} = \frac{(1600 + 600)}{2} = 1100.$$

Парціальні тиски CO₂ та H₂O в продуктах згоряння дорівнюють, кПА

$$P_{\text{CO}_2} = 9,0; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = 17,6.$$

Для розглянутого випадку шар газів в зонах горіння і теплообміну можна прийняти плоскопаралельним нескінченної протяжності. В цьому випадку ефективна довжина променя визначається за формулою

$$S_{\text{эф}} = 1,8 \cdot H. \quad (2,8)$$

Товщину зони горіння приймаємо рівною $H' = 0,1$ м. Товщина зони теплообміну H'' з урахуванням товщини металу δ дорівнює, м

$$H'' = H - H' - \sigma = 1,0 - 0,1 - 0,25 = 0,65$$

$$\text{Тоді } S'_{\text{эф}} = 1,8 \cdot 0,1 = 0,18 \text{ та } S''_{\text{эф}} = 1,8 \cdot 0,65 = 1,17.$$

Для зони горіння, кПа · м

$$P_{CO_2} S'_{\text{эф}} = 9,0 \cdot 0,18 = 1,62;$$

$$P_{H_2O} S'_{\text{эф}} = 17,6 \cdot 0,18 = 3,17.$$

За графіками (див. рис. 2.2) при температурі $t' = 1600$ °С знаходимо

$$\varepsilon_{CO_2} < 0,03; \quad \varepsilon'_{H_2O} < 0,03; \quad \beta = 1,0.$$

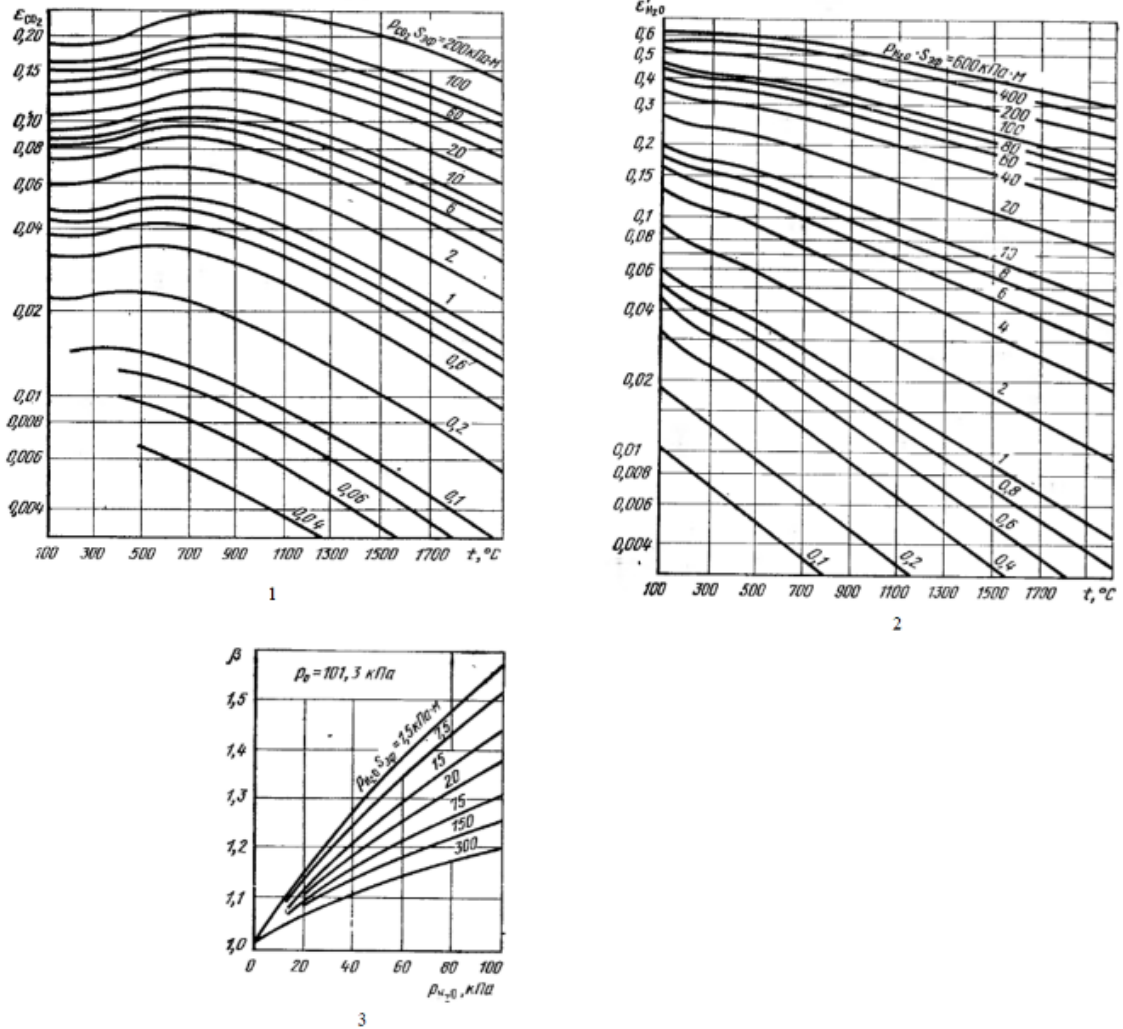
Оскільки знайдені значення ступенів чорноти дуже малі (через малу товщини шару), приймемо, що $\varepsilon'_{\text{ф}} = 0$.

Це означає, що теплообмін між зоною горіння і поверхнею кладки відбувається тільки за рахунок конвекції, кПа · м

Для зони теплообміну:

$$P_{CO_2} S''_{\text{эф}} = 9,0 \cdot 1,17 = 10,53,$$

$$P_{H_2O} S''_{\text{эф}} = 17,6 \cdot 1,17 = 20,6.$$



1 – номограма для визначення ступеня чорноти CO₂, 2 – номограма для визначення ступеня чорноти H₂O, 3 – номограма для визначення поправочного коефіцієнта β .

Рисунок 2.2 - Номограми для визначення ступеня чорноти трьох атомних газів

За графіками (див. рис. 2.2) знаходимо:

- на початку методичної зони ($t''_{\phi} = 800$ °C):

$$\epsilon_{CO_2} = 0,11; \quad \epsilon'_{H_2O} = 0,185; \quad \beta = 1,09;$$

$$\epsilon''_{\phi} = 0,11 + 1,09 \cdot 0,185 = 0,312.$$

- в кінці методичної зони ($t''_{\phi} = 1100$ °C):

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,09; \quad \varepsilon'_{H_2O} = 0,145; \quad \beta = 1,09;$$

$$\varepsilon''_{\phi} = 0,09 + 1,09 \cdot 0,145 = 0,248.$$

Щільність теплового потоку випромінюванням на кладку дорівнює [див. форм. (2,4)], Вт/м²:

- на початку методичної зони

$$q_{\phi}^k = 5,7 \left[0 \left(\frac{1600 + 273}{100} \right)^4 + 0,312(1 - 0) \left(\frac{300 + 273}{100} \right)^4 \right] = 23573,7;$$

- в кінці методичної зони

$$q_{\phi}^k = 5,7 \left[0 \left(\frac{1600 + 273}{100} \right)^4 + 0,248(1 - 0) \left(\frac{1100 + 273}{100} \right)^4 \right] = 50235,0.$$

Прийняв значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі від факела до кладки, рівним $\alpha^{\text{конв}} = 150$ Вт/(м² · К), знайдемо щільність конвективного теплового потоку $q_{\phi, \text{конв}}^k$.

Для цього орієнтовно задамося значенням температури кладки $t_k = 0,5(t'_{\phi} + t''_{\phi})$, °C:

- на початку методичної зони

$$t_k = 0,5(1600 + 800) = 1200;$$

щільність конвективного теплового потоку, Вт/м²

$$q_{\Phi.\text{конв}}^{\text{к}} = 150(1600 - 1200) = 60000.$$

За формулою (2,3) знаходимо температуру кладки, К

$$T_{\text{к}} = 100 \sqrt[4]{\frac{60000}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[23573,7 + 0,8 \cdot 5,7 \left(\frac{0 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0,312)(1 - 0) \right]} \\ = 1147,3.$$

При розрахунку було прийнято, що $\varepsilon_{\text{м}} = \varepsilon_{\text{к}} = 0,8$.

Оскільки отримана велика розбіжність між прийнятим і розрахованим значенням $t_{\text{к}}$ приймаємо нове значення температури, що дорівнює середньому арифметичному з двох попередніх, °С

$$t_{\text{к}} = 0,5(1200 + 843,3) = 1037,15.$$

Тоді щільність конвективного теплового потоку, Вт/м²

$$q_{\Phi.\text{конв}}^{\text{к}} = 150(1600 - 1037,15) = 84427,5;$$

температура кладки, К

$$T_{\text{к}} = 100 \sqrt[4]{\frac{84427,5}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[23573,7 + 0,8 \cdot 5,7 \left(\frac{0 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0,312)(1 - 0) \right]} \\ = 1227,2.$$

За формулою (2,2) знаходимо величину щільності результуючого потоку в метал на початку методичної зони.

Для цього за уточненим значенням $T_{\text{к}}$ знаходимо, Вт/м²

$$q_{\Phi.\text{КОНВ}}^{\text{К}} = 150(1600 - 954,2) = 96870;$$

$$C_{\text{пр}} = C_0 - \frac{1 - \varepsilon_{\text{к}}}{\varepsilon_{\text{к}}} \frac{q_{\Phi.\text{КОНВ}}^{\text{К}}}{\left(\frac{T_{\text{к}}}{100}\right)^4} = 5,7 - \frac{1 - 0,8}{0,8} \frac{96870}{\left(\frac{954,2+273}{100}\right)^4} = 4,63;$$

ураховуючи, що $\varepsilon'_{\Phi} = 0$

$$q_{\text{М}}^{\text{нач}} = 0,8 \left\{ \left[4,63 \left(\frac{954,2 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{0 + 273}{100} \right)^4 \right] - 0,312 \left[4,63 \left(\frac{954,2 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{800 + 273}{100} \right)^4 \right] \right\} = 76404,8;$$

- в кінці методичної зони:

$$t_{\text{к}} = 0,5(1600 + 1100) = 1350;$$

$$q_{\Phi.\text{КОНВ}}^{\text{К}} = 150(1600 - 1350) = 37500;$$

$$T_{\text{к}} = 100 \sqrt[4]{\frac{37500}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[50235 + 0,8 \cdot 5,7 \left(\frac{0 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0,248)(1 - 0) \right]} = 1197.$$

Уточнюємо значення температури кладки, задаючись новою величиною, °С

$$t_{\text{к}} = 0,5(1350 + 924) = 1137.$$

Тоді

$$q_{\Phi.\text{КОНВ}}^{\text{К}} = 150(1600 - 1137) = 69450;$$

$$T_K = 100 \sqrt[4]{\frac{69450}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[50235 + 0,8 \cdot 5,7 \left(\frac{600 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0,248)(1 - 0) \right]}$$

$$= 1288.$$

Тепер

$$q_{\text{ф.конв}}^{\text{к}} = 150(1600 - 1015) = 87750;$$

$$C_{\text{пр}} = C_0 - \frac{1 - \varepsilon_K}{\varepsilon_K} \frac{q_{\text{ф.конв}}^{\text{к}}}{\left(\frac{T_K}{100} \right)^4} = 5,7 - \frac{1 - 0,8}{0,8} \frac{87750}{\left(\frac{1015 + 273}{100} \right)^4} = 4,9;$$

$$q_{\text{М}}^{\text{мет}} = 0,8 \left\{ \left[4,9 \left(\frac{1015 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{600 + 273}{100} \right)^4 \right] - 0,248 \left[4,9 \left(\frac{1015 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{1100 + 273}{100} \right)^4 \right] \right\} = 94829,6.$$

Середня по довжині методичної зони щільність результуючого теплового потоку на метал дорівнює, Вт/м²

$$q = \frac{94829,6 - 76404,8}{\ln \frac{94829,6}{76404,8}} = 85285,8.$$

Знаходимо температуру центру блюма в кінці методичної зони [див. форм. (2,7)], °С

$$t_{\text{цент}} = 600 - \frac{94829,6 \cdot 0,138}{2 \cdot 35,5} = 415,7.$$

Тут $\lambda_{600} = 35,5$ Вт/(м · К) - коефіцієнт теплопровідності середньо-вуглецевої сталі при $t = 600$ °С; $S = 0,138$ м - розрахункова товщина блюма.

У печі з крокуючим подом вироби лежать на поду з зазором α , який в нашому випадку приймаємо рівним товщині блюма, тобто $\alpha = \delta$.

По таблиці (див. рис. 2.3) знаходимо коефіцієнт несиметричності нагріву $\mu = 0,55$ та $S = \mu \cdot \delta = 0,55 \cdot 0,25 = 0,138$ м.

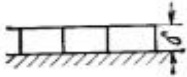
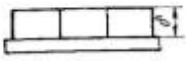



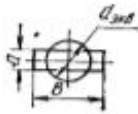
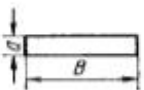

№	Расположение заготовок	μ												
	1. Односторонний нагрев на монолитном полу	1,0												
	2. Двусторонний нагрев на водоохлаждаемых трубах	0,55—0,6												
	3. Односторонний нагрев на монолитном полу	<table border="1"> <tr> <td>a/δ</td> <td>0</td> <td>0,5</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>>2</td> </tr> <tr> <td>μ</td> <td>1</td> <td>0,6</td> <td>0,55</td> <td>0,5</td> <td>0,4</td> </tr> </table>	a/δ	0	0,5	1	2	>2	μ	1	0,6	0,55	0,5	0,4
a/δ	0	0,5	1	2	>2									
μ	1	0,6	0,55	0,5	0,4									
	4. Односторонний нагрев на монолитном полу	0,75—0,8												
	5. Односторонний нагрев на монолитном полу	<table border="1"> <tr> <td>a/d</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>μ</td> <td>0,8</td> <td>0,6</td> <td>0,5</td> </tr> </table>	a/d	1	2	2	μ	0,8	0,6	0,5				
a/d	1	2	2											
μ	0,8	0,6	0,5											
	6. Четырехсторонний нагрев плоской заготовки при $b/a < 1,8$ $d_{\text{эфф}} = 1,128 \sqrt{ab}$	$\mu = 0,5$; $S = 0,5 d_{\text{эфф}}$												
	7. Четырехсторонний нагрев плоской заготовки при $b/a > 1,8$	$\mu = 0,5$; $S = 0,5 a$												
	8. Круглые вертикальные заготовки	0,5												

Рисунок 2.3 - Коефіцієнти несиметричності нагріву

Знаходимо середню температуру металу, °С:

- на початку зони

$$t_{\text{нач}} = 0;$$

- в кінці зони

$$t_{\text{кон}}^{\text{мет}} = 600 - \frac{2}{3}(600 - 415,7) = 477;$$

- по довжині зони

$$t_{\text{м}} = 0,5(0 + 477) = 238,5.$$

При середній температурі металу по довжині методичної зони знаходимо коефіцієнт теплопровідності середньо-вуглецевої сталі $\lambda = 45,8$ Вт/(м · К) і питому теплоємність $c = 0,52$ кДж/(кг · К) [29, додат. IX].

За формулою (2,1) знаходимо час нагрівання металу в методичній зоні, с

$$\tau_{\text{м}} = \frac{0,138 \cdot 0,52 \cdot 7800(477 - 0)10^3}{85285,8} = 3209.$$

2.3 Час нагріву металу в зварювальній зоні

Оскільки початком зварювальної зони є кінець методичної зони, то з попереднього розрахунку запозичуємо:

$$\varepsilon_{\phi}'' = 0,248; \quad t_{\phi}'' = 1100; \quad t_{\text{м}}^{\text{поб}} = 600;$$

$$t_{\text{к}} = 1015; \quad t_{\text{м}}^{\text{цент}} = 415,7;$$

$$q = 94829,6.$$

В кінці зварювальної зони, °С

$$t_{\text{м}}^{\text{поб}} = 1200;$$

$$t''_{\phi} = 0,5(1600 + 1200) = 1400.$$

За графіками на (див. рис. 2.2) при $t''_{\phi} = 1400$ °С, кПа · м

$$p_{CO_2} S''_{\phi} = 10,53;$$

$$p_{H_2O} S''_{\phi} = 20,6;$$

знаходимо

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,078; \quad \varepsilon'_{H_2O} = 0,115; \quad \beta = 1,09;$$

$$\varepsilon''_{\phi} = 0,078 + 1,09 \cdot 0,115 = 0,203.$$

Переймаючись значенням $t_k = (1600 + 1400) / 2 = 1500$ °С,

знаходимо, Вт/м², К

$$q_{\phi, \text{конв}}^k = 150(1600 - 1500) = 15000;$$

$$q_{\phi}^k = 5,7 \cdot 0,203(1 - 0) \left(\frac{1400 + 273}{100} \right)^4 = 90647;$$

$$T_k = 100 \sqrt[4]{\frac{15000}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[90647 + 5,7 \cdot 0,8 \left(\frac{1200 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0)(1 - 0,203) \right]}$$

$$= 1498.$$

Уточнюємо значення температури кладки, °С

$$t_k = (1500 + 1225) / 2 = 1362,5;$$

$$q_{\phi, \text{конв}}^k = 150(1600 - 1365,5) = 35175 \text{ Вт/м}^2;$$

$$T_k = 100 \sqrt[4]{\frac{35175}{5,7 \cdot 0,8} + \frac{1}{5,7} \left[90647 + 0,8 \cdot 5,7 \left(\frac{1200 + 273}{100} \right)^4 (1 - 0)(1 - 0,203) \right]}$$

$$= 1521,5.$$

За уточненим значенням T_k знаходимо

$$q_{\Phi, \text{КОНВ}}^k = 150(1600 - 1248,5) = 52725 \text{ Вт/м}^2;$$

$$C_{\text{пр}} = 5,7 - \frac{1 - 0,8}{0,8} \frac{52725}{\left(\frac{1248,5 + 273}{100} \right)^4} = 5,45 \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4);$$

$$q_M^{\text{СВ}} = 0,8 \left\{ \left[5,45 \left(\frac{1248,5 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{1200 + 273}{100} \right)^4 \right] - 0,203 \left[5,45 \left(\frac{1248,5 + 273}{100} \right)^4 - 5,7 \left(\frac{1400 + 273}{100} \right)^4 \right] \right\}$$

$$= 0,8(237288 + 31357,4) = 44068,3 \text{ Вт/м}^2.$$

Середня по довжині зварювальної зони щільність результуючого теплового потоку на метал дорівнює, Вт/м²

$$\overline{q_{\text{СВ}}} = \frac{94829,6 - 44068,3}{\ln \frac{94829,6}{44068,3}} = 66238,6.$$

Температура центру б'юма в кінці зварювальної зони [див. форм. (2,7)], °С

$$t_M^{\text{цент}} = 1200 - \frac{44068,3 \cdot 0,138}{2 \cdot 29,6} = 1097,2.$$

Середні температури металу, °С:

- на початку зварювальної зони

$$\overline{t_{\text{Нач}}^{\text{СВ}}} = t_{\text{мет}}^{\text{КОН}} = 447;$$

- в кінці зварювальної зони

$$\overline{t_{\text{КОН}}^{\text{СВ}}} = 1200 - \frac{2}{3} (1200 - 1097,2) = 1131,5;$$

- по довжині зварювальної зони

$$\overline{t_{\text{СВ}}} = 0,5(477 + 1131,5) = 804,25.$$

При цій температурі знаходимо [29, додат. IX], $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$,
 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

$$c = 0,695;$$

$$\lambda = 26,2.$$

Час нагріву металу в зварювальної зони [див. форм. (2,1)], с

$$\tau_{\text{СВ}} = \frac{0,138 \cdot 0,695 \cdot 10^3 \cdot 7800(1131,5 - 477)}{66238,6} = 7368.$$

2.4 Час томління металу

Розрахунок часу перебування металу в томильної зоні печі виробляємо за методикою.

Перепад температур по перетину металу, $^{\circ}\text{C}$:

- на початку томильної зони

$$\Delta t_{\text{Нач}}^{\text{ТОМ}} = 1200 - 1097,2 = 102,8;$$

- в кінці зони

$$\Delta t_{\text{КОН}}^{\text{ТОМ}} = 35.$$

Ступінь вирівнювання температури

$$\delta_{\text{выр}} = \frac{\Delta t_{\text{кон}}^{\text{ТОМ}}}{\Delta t_{\text{нач}}^{\text{ТОМ}}} = \frac{35}{102,8} = 0,34.$$

Знаходимо $F_0 = 1,3$ [29, рис. 19 (крива 3)].

При середній температурі металу в томильної зоні, °С

$$\overline{t}_{\text{ТОМ}} = 0,5 \left[1131,5 + 1200 - \frac{2}{3} (1200 - 1165) \right] = 1154,1$$

знаходимо значення коефіцієнта температуропровідності середньо-вуглецевої сталі $\alpha = 5,56 \cdot 10^{-6}$ м/с [29, додат. IX].

Тоді час томління металу, с

$$\tau_{\text{ТОМ}} = F_0 \cdot \frac{S^2}{\alpha} = \frac{1,3 \cdot 138^2}{5,56 \cdot 10^{-6}} = 4452,7.$$

Загальний час нагріву металу, с

$$\tau = \tau_{\text{М}} + \tau_{\text{СВ}} + \tau_{\text{ТОМ}} = 3209 + 7368 + 4452,7 = 15029,7.$$

2.5 Визначення основних розмірів печі

Для забезпечення продуктивності $P = 83,33$ кг/с в печі повинно одночасно перебувати кількість металу, кг

$$G = P \cdot \tau = 83,33 \cdot 15029,7 = 1252,4 \cdot 10^3.$$

Маса одного блюма, кг

$$g = b \cdot \delta \cdot l \cdot \rho = 0,25 \cdot 0,25 \cdot 11,0 \cdot 7800 = 5362,5.$$

Число блюмів, що одночасно знаходяться в печі, шт

$$n = G/g = 1252,4 \cdot 10^3 / 5362,5 \cong 233.$$

З урахуванням зазорів ($\alpha = 0,125$ м) між блюмами довжина печі дорівнює, м

$$L = n \cdot (b + a) = 233(0,25 + 0,125) = 87,4.$$

При ширині печі $B = 11,5$ м, площа поду, м²

$$F = B \cdot L = 11,5 \cdot 87,4 = 1005.$$

Висоту всіх зон залишаємо колишньої $H = 1,0$ м. Довжину печі розбиваємо на зони пропорційно часу нагріву:

- довжина методичної зони, м

$$L_M = L \cdot \frac{\tau_M}{\tau} = \frac{87,4 \cdot 3209}{15029,7} = 18,7;$$

- довжина зварювальної зони, м

$$L_{CB} = L \cdot \frac{\tau_{CB}}{\tau} = \frac{87,4 \cdot 7368}{15029,7} = 42,9;$$

- довжина томильної зони, м

$$L_{ТОМ} = L \cdot \frac{\tau_{ТОМ}}{\tau} = \frac{87,4 \cdot 4452,7}{15029,7} = 25,8.$$

Розподіл температур металу, кладки і продуктів згоряння по довжині печі представлено на рис. 2.4. Приймаємо, що звід печі виконаний з шамоту класу А товщиною 300 мм. Стіни мають товщину 460 мм, причому, шар шамоту становить 345 мм і шар теплової ізоляції (діатомітова цегла) 115 мм. Під печі двошаровий: високоглиноземна цегла товщиною 460 мм і діатомітова цегла 115 мм.

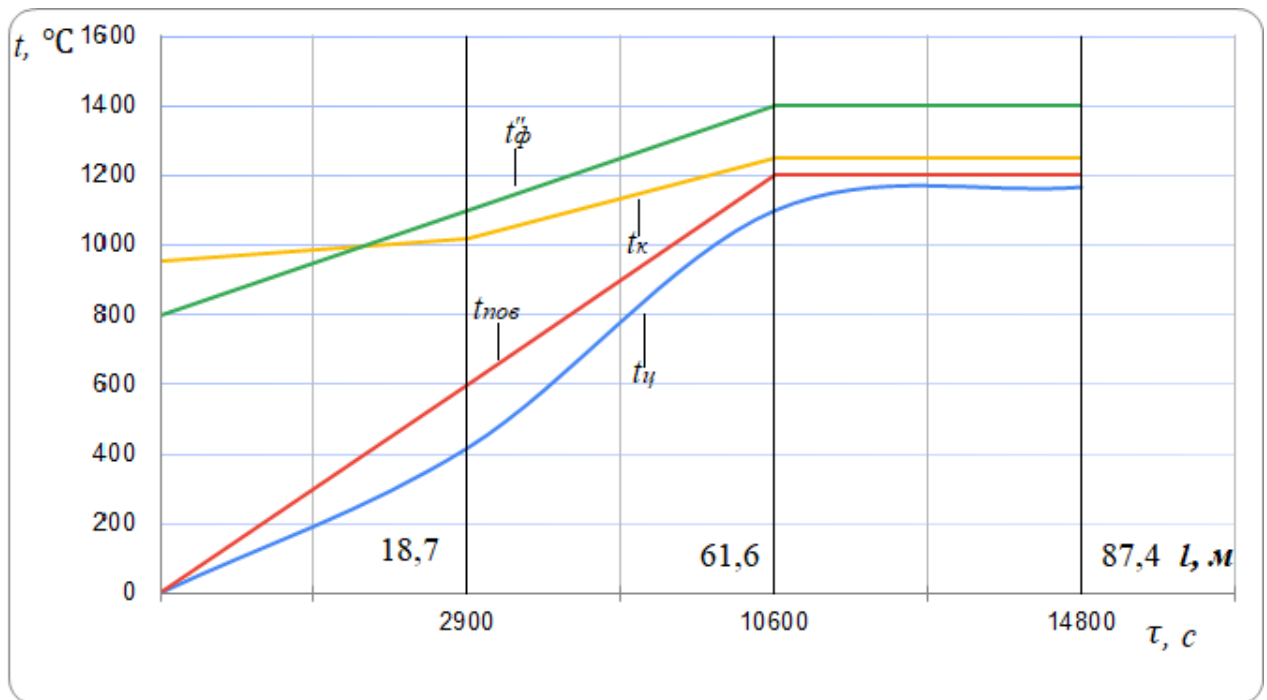


Рисунок 2.4 – Розподіл температур по довжині печі з крокуючим подом

2.6 Математична модель радіаційного теплообміну в системі газ - кладка – метал

З метою оцінки впливу ступеня чорноти кладки на показники нагріву металу розроблена математична модель, що передбачає рішення задачі зовнішнього теплообміну в системі газ-кладка-метал з використанням зонального методу. При цьому прийняті наступні допущення:

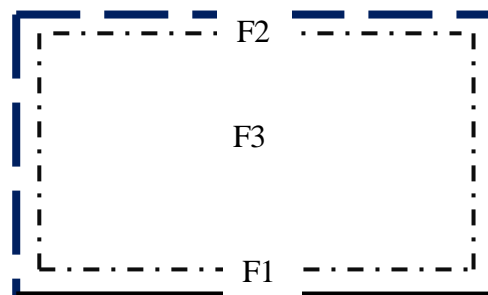
а) температура металу, кладки і продуктів згоряння постійні по довжині печі (з урахуванням цього припущення розрахунок теплообміну виконаний на одиницю довжини печі);

б) кладку вважаємо адіабатною, тобто щільність результуючого потоку через футеровку печі дорівнює нулю;

в) поверхні металу і кладки є сірими, дифузно випромінюючими і дифузно відбивають;

г) спектр поглинання продуктів згоряння, що заповнюють газовий об'єм, представлений у вигляді окремих смуг постійної ширини. У межах кожної смуги спектральна поглинальна здатність газового об'єму і його спектральний ступінь чорноти не залежать від довжини хвилі.

Розрахункова схема зональної моделі зовнішнього теплообміну в робочій камері нагрівальної печі, представленої у вигляді системи газ-кладка-метал, зображена на рисунку 2.5.



F1 – поверхнева зона металу, F2 – поверхнева зона кладки, F3 – об'ємна газова зона.

Рисунок 2.5 - Схема зональної моделі зовнішнього теплообміну в робочій камері нагрівальної печі

Задано наступні величини:

а) T_1 і T_3 - температури металу і газу, К;

б) F_1 і F_2 - площі поверхонь зон металу і кладки, m^2 ;

в) кладку вважаємо адіабатною, тобто результуючий променистий потік крізь кладку $Q_2^p = 0$.

Потрібно визначити:

а) Q_1^p - потік результуючого випромінювання на поверхні металу, Вт;

б) T_2 - температуру кладки, К;

в) інтегральні поглинаючі здатності та ступені чорноти металу A_1 і ε_1 , кладки A_2 і ε_2 і газу A_3 і ε_3 .

При чисельному рішенні поставленої задачі виділяємо кінцевий розрахунковий інтервал довжин хвиль (λ_1 і λ_2) і розбиваємо його на n елементарних інтервалів шириною $\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)/n$. Величина $\Delta\lambda$ повинна бути досить малою для того, щоб у межах кожного елементарного інтервалу можна було б вважати постійними значення спектрального ступеня чорноти всіх тіл, що беруть участь у теплообміні.

Введемо наступні позначення:

а) $\varepsilon_1^{(j)}$ - спектральна ступінь чорноти металу в межах j -того елементарного інтервалу;

б) $Q_1^{(j)}$, $Q_1^{nad(j)}$, $Q_1^p(j)$ - потоки власного, падаючого і результуючого випромінювання на поверхні металу, що приходять на j -тий елементарний інтервал, Вт;

в) $Q_1^{0(j)}$ - потік власного випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі металу, що припадає на j -тий елементарний інтервал, Вт

$$Q_1^{0(j)} = \int_{\lambda_1 + (j-1) \cdot \Delta\lambda}^{\lambda_1 + j \Delta\lambda} Q_\lambda^0(T_1) d\lambda. \quad (2.9)$$

Аналогічним чином позначимо спектральні характеристики та елементарні потоки випромінювання для поверхонь кладки і газового об'єму.

Поверхні металу і кладки вважаємо сірими.

Для наближеного завдання радіаційних характеристик газового об'єму використовуємо селективно-сіру апроксимацію, в рамках якої спектр поглинання газу представляється у вигляді окремих смуг, які мають фіксовану ширину, причому в межах кожної смуги спектральна поглинаюча здатність газового об'єму і його спектральна ступінь чорноти $\varepsilon_{3\lambda} = A_{3\lambda}$ вважаються незалежними від довжини хвилі.

Виходячи з цих припущень, радіаційні властивості тіл, що беруть участь у теплообміні, задані наступним чином:

а) спектральну ступінь чорноти металу і кладки взяли постійною у всьому діапазоні довжин хвиль. Для металу її значення дорівнює 0,8, для кладки від 0,5 до 1,0;

б) спектральна поглинаюча здатність газового об'єму і його ступінь чорноти для кожної зі смуг спектра поглинання розраховані по рівнянню

$$\varepsilon_{3\lambda} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{k_{CO_2}}{T_3} \cdot p_{CO_2} + \frac{k_{H_2O}}{T_3} \cdot p_{H_2O} \right) \cdot s^{\varepsilon\phi} \right] \quad (2.10)$$

де $s^{\varepsilon\phi}$ - ефективна довжина променя, м;

p_{H_2O} , p_{CO_2} - парціальний тиск випромінюючих газів у продуктах згоряння, Па;

k_{CO_2} , k_{H_2O} - наведені коефіцієнти поглинання - визначені в таблиці 2.1.

Ефективна довжина променя, м, розраховується за формулою

$$s^{\varepsilon\phi} = \frac{3,6 \cdot V_3}{F_3},$$

де V_3 , м³; F_3 , м² - обсяг і площа об'ємної газової зони.

Таблиця 2.1 – Наведені коефіцієнти поглинання продуктів згоряння

Інтервал довжини хвиль, мкм	$k_{CO_2} \cdot 10^2, \text{ К/(Па}\cdot\text{м)}$	$k_{H_2O} \cdot 10^2, \text{ К/(Па}\cdot\text{м)}$
1,5-1,75	0	0,6
2,5-3	3,3	5,8
4-4,8	198,5	0
4,8-8	0	6,4

Оскільки інтегральні потоки випромінювання визначаються простим підсумовуванням введених елементарних потоків по j від 1 до n , задача зводиться до розрахунку радіаційного теплообміну в межах кожного елементарного інтервалу.

Застосовуючи зональний метод рішення задачі зовнішнього теплообміну, робочий простір печі розбили на розрахункові зони згідно зі схемою, наведеною на рисунку 2.5.

У межах кожного елементарного інтервалу довжин хвиль виконаний розрахунок дозвільних кутових коефіцієнтів.

Розрахунок виконали в три етапи:

1. Геометричні кутові коефіцієнти випромінювання φ_{ki} між поверхневими зонами металу, кладки і об'ємною газовою зоною розраховали по формулі

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \frac{F_1}{F_2} & \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right) & 1 \\ \frac{F_1}{F_1+F_2} & \frac{F_k}{F_1+F_2} & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

2. Розрахунок узагальнених кутових коефіцієнтів випромінювання Φ_{ki}

$$\Phi_{k,i}^{(j)} = \varphi_{k,i} \cdot D_{3\lambda}, \quad k, i = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, n, \quad (2.12)$$

де $D_{3\lambda}$ – пропускна здатність газової об'ємної зони для j -го елементарного інтервалу. Пропускна здатність газової об'ємної зони для j -го елементарного інтервалу

$$D_{3\lambda} = \exp \left[- \left(\frac{k_{CO_2}}{T_3} \cdot p_{CO_2} + \frac{k_{H_2O}}{T_3} \cdot p_{H_2O} \right) \cdot s^{\varepsilon\phi} \right], \quad (2.13)$$

де T_3 - температура об'ємної газової зони, К;

p_{H_2O} , p_{CO_2} - парціальний тиск випромінюючих газів у продуктах згоряння, Па;

n – число розрахункових зон.

3. Після знаходження узагальнених кутових коефіцієнтів величини дозволяючих узагальнених коефіцієнтів випромінювання Ψ_{ki} визначили шляхом рішення системи рівнянь

$$\Psi_{k,i}^{(j)} = \Phi_{k,i}^{(j)} + \sum_{p=1}^{n-1} \Phi_{k,p}^{(j)} \cdot R_p \cdot \Psi_{p,i}^{(j)}, \quad i, k = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.14)$$

Зональні рівняння для j – го елементарного інтервалу:

а) інтегральний результуючий тепловий потік для кладки

$$Q_2^p = \sum_{j=1}^n Q_2^{p(j)} = 0, \quad (2.15)$$

де $Q_2^{p(j)}$ - елементарний результуючий тепловий потік для кладки

$$Q_2^{p(j)} = \varepsilon_2^{(j)} \cdot (Q_1^{(j)} \cdot \Psi_{1,2}^{(j)} + Q_2^{(j)} \cdot \Psi_{2,2}^{(j)} + Q_3^{(j)} \cdot \Psi_{3,2}^{(j)}) - Q_2^{(j)}, \quad j = 1, \dots, n; \quad (2.16)$$

б) елементарні падаючі теплові потоки для розрахункових зон металу, кладки і газу

$$Q_i^{nad(j)} = Q_1^{(j)} \cdot \Psi_{1i}^{(j)} + Q_2^{(j)} \cdot \Psi_{2i}^{(j)} + Q_3^{(j)} \cdot \Psi_{3i}^{(j)} \quad i = 1, \dots, 3, \quad j = 1, \dots, n; \quad (2.17)$$

в) елементарний результуючий тепловий потік для зони металу

$$Q_i^{p(j)} = \varepsilon_1^{(j)} \cdot Q_1^{nad(j)} - Q_1^{(j)}, \quad (2.18)$$

де $Q_i^{(j)}$, Q_i^p , $Q_i^{nad(j)}$ - елементарні потоки власного, результуючого і падаючого випромінювання.

2.7 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка-метал

З урахуванням умови адіабатності кладки (2.15) методом послідовних наближень вирішили систему зональних рівнянь для кладки (2.16) і визначили її температуру T_2 .

Рішення даної задачі виконали методом послідовних наближень, на кожному кроці якого температура кладки вважалася відомою величиною. Після знаходження $Q_2^{p(j)}$ в межах кожного елементарного інтервалу при заданому значенні T_2 була виконана перевірка умови (2.15). Якщо ця умова не виконувалася, змінювали значення T_2 і повторювали розрахунок.

Алгоритм розв'язання задачі, побудовано таким чином, щоб послідовність значень T_2 сходилася до дійсного значення температури кладки, що відповідає умові адіабатності (2.15). Алгоритм визначення температури кладки засновано на використанні методу половинного ділення, що забезпечує послідовне зближення кордонів інтервалу температур $T_2' < T_2 < T_2''$, що містить шукане значення T_2 . На початку розрахунку прийняли $T_2' = T_1$ і $T_2'' = T_3$. На кожному кроці методу половинного ділення виконали рішення задачі при температурі кладки $T_2 = (T_2' + T_2'')/2$, що

відповідає середині інтервалу (T_2', T_2'') . Якщо в результаті розрахунку виходило позитивне значення Q_2^p ($Q_2^{ногл} > Q_2$), то це означало, що температура кладки була занижена. У такому випадку на наступному кроці знайдене значення T_2 використовували в якості нижньої межі інтервалу (T_2', T_2'') , тобто приймали $T_2' = T_2$. Якщо ж температурі T_2 відповідало від'ємне значення Q_2^p ($Q_2^{ногл} < Q_2$), то величину T_2 , зменшували, поклавши на черговому кроці $T_2'' = T_2$. Описана процедура повторювалась до тих пір, поки довжина інтервалу невизначеності $(T_2'' - T_2')$ не стала достатньо малою, тобто $(T_2'' - T_2') < \Delta$, де Δ - задана за умовою похибка визначення температури кладки.

Після знаходження температури кладки T_2 , що відповідає умові адіабатності (2.15), з рівнянь (2.17), (2.18) визначаються всі інші елементарні потоки ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, n$).

Отримані елементарні потоки використовували для розрахунку інтегральних характеристик:

а) інтегрального результуючого потоку випромінювання на метал

$$Q_1^p = \sum_{j=1}^n Q_1^{p(j)}; \quad (2.19)$$

б) інтегрального ступеня чорноти тіл, що беруть участь у теплообміні ($i = 1, 2, 3$)

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_i^{(j)} \cdot Q_i^{0(j)}}{\sum_{j=1}^n Q_i^{0(j)}}; \quad (2.20)$$

в) інтегральної поглинальної здатності тіл, що беруть участь у теплообміні ($i = 1, 2, 3$)

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_i^{(j)} \cdot Q_i^{nad(j)}}{\sum_{j=1}^n Q_i^{nad(j)}}. \quad (2.21)$$

Структурна схема алгоритму розрахунку радіаційного теплообміну представлено на рисунку 2.6.

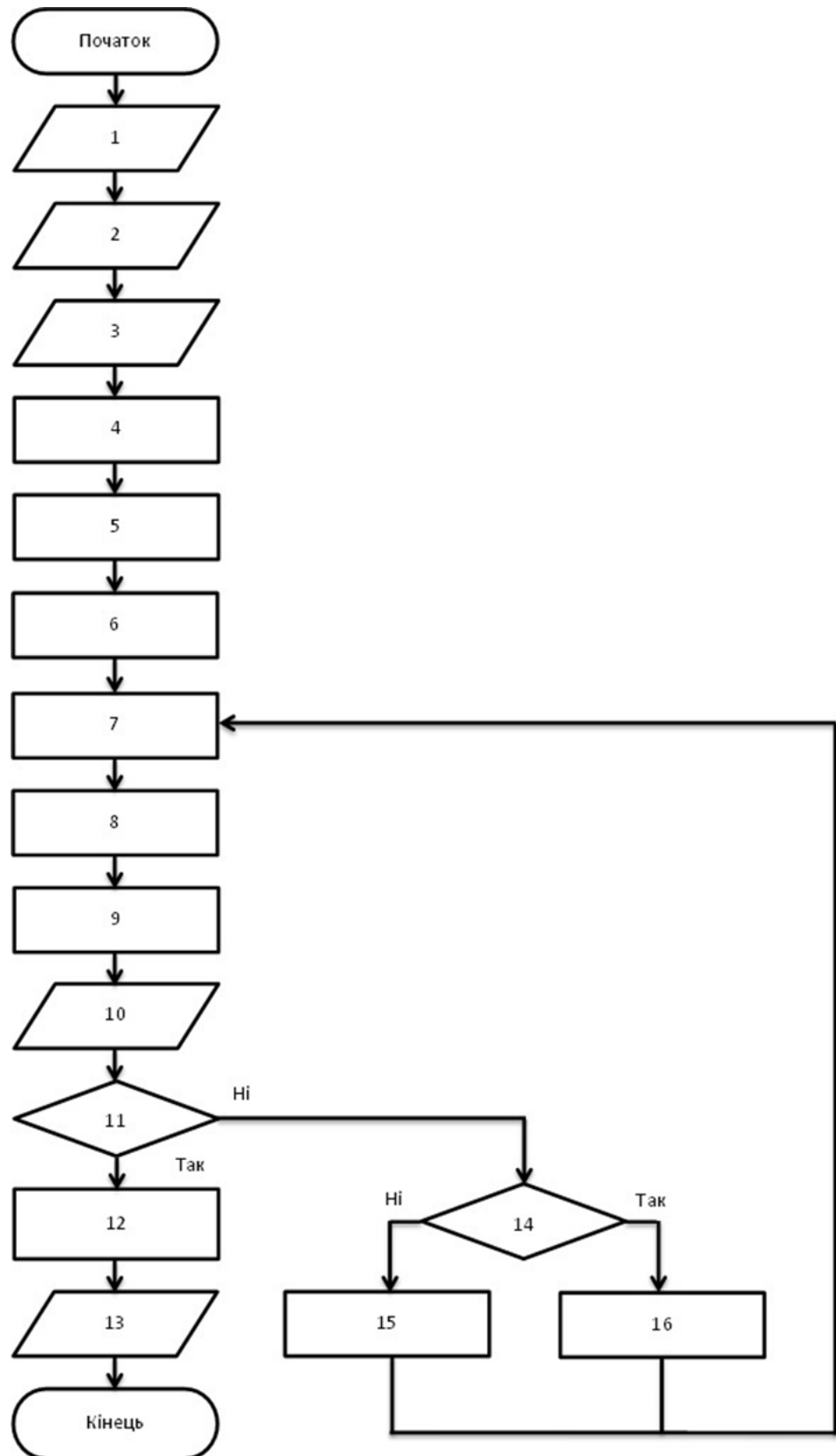


Рисунок 2.6 - Структурна схема алгоритму розрахунку радіаційного теплообміну у системі газ-кладка-метал

На рисунку 2.6 прийняти такі позначення:

1 – введення вихідних даних ($T_1, T_3, F_1, F_2, \Delta$); 2 – введення значень λ_1 і λ_2 , що визначають кордони розрахункового інтервалу довжини хвиль і число розбиття розрахункового інтервалу n ; 3 – введення параметрів, що визначають залежність спектральних ступенів чорноти металу, кладки і газу від довжини хвиль; 4 – обчислення $\varepsilon_1^{(j)}, \varepsilon_2^{(j)}, \varepsilon_3^{(j)}$ при $j=1, 2, \dots, n$; 5 – обчислення $Q_1^{0(j)}$ і $Q_3^{0(j)}$ ($j=1, \dots, n$); 6 – присвоєння $T_2' = T_1, T_2'' = T_3$; 7 – обчислення $T_2 = (T_2' + T_2'')/2$; 8 – обчислення $Q_2^{0(j)}$ і $Q_2^{p(j)}$ ($j=1, \dots, n$); 9 – обчислення Q_2^p ; 10 – виведення проміжних значень T_2 і Q_2^p ; 11 – перевірка нерівності $T_2'' = T_2' < \Delta$; 12 – обчислення Q_2^p і ε_i, A_i ($i=1, 2, 3$); 13 – виведення знайдених значень Q_1^p і ε_i, A_i ($i=1, 2, 3$); 14 – перевірка нерівності $Q_2^p > 0$; 15 – присвоєння $T_2'' = T_2$; 16 – присвоєння $T_2' = T_1$.

При введенні вихідних даних (блок 3 на рис. 2.6) слід задати значення $s^{\text{эф}}, p_{\text{CO}_2}$ і $p_{\text{H}_2\text{O}}$, а при розрахунку спектральних значень $\varepsilon_3^{(j)}$ використовувати формулу (2.13).

2.7.1 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка-метал для сірої кладки

Результати розрахунків дозволили встановити залежність температури кладки T_2 і величини щільності потоку результуючого випромінювання на поверхню металу q_1^p від:

- а) ступеня чорноти кладки ε_2 ;
- б) температури продуктів згоряння T_3 ;
- в) температури металу T_1 ;
- г) щільності результуючого теплового потоку через кладку q_2^p .

На рисунках (рис. 2.7, рис. 2.8, рис. 2.9, рис. 2.10, рис. 2.11, рис. 2.12, рис. 2.13, рис. 2.14, рис. 2.15, рис. 2.16) показані результати розв'язання задачі розрахунку радіаційного теплообміну у системі газ-кладка-метал.

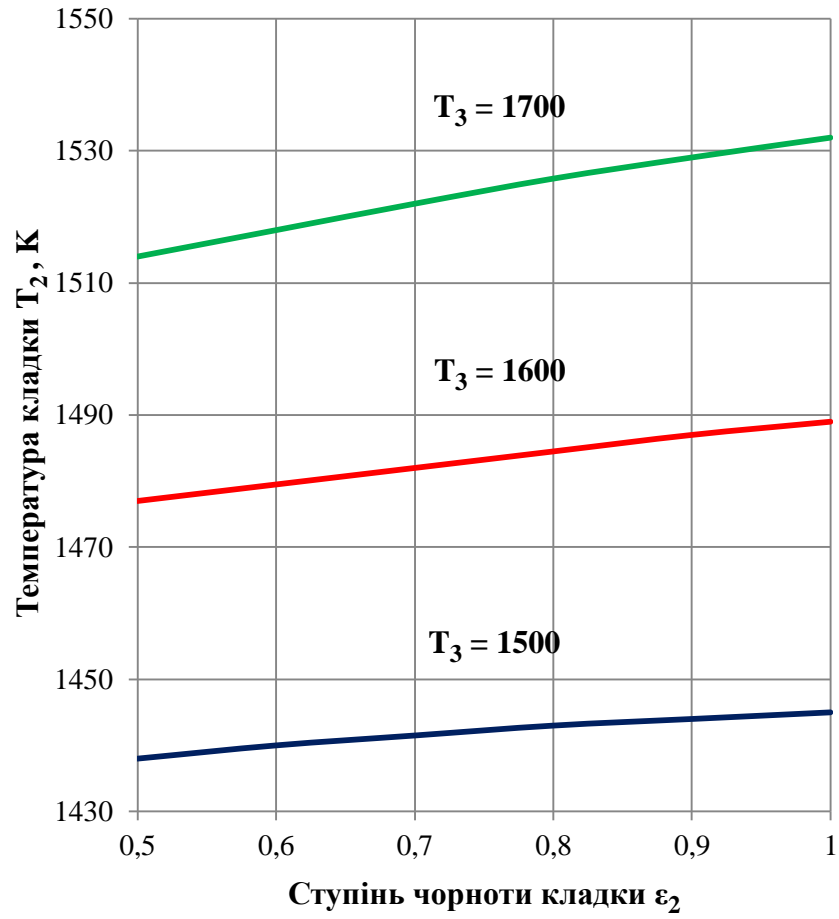


Рисунок 2.7 - Залежність температури кладки T_2 від ступеню її чорноти ϵ_2 при $T_1 = 1400$ К

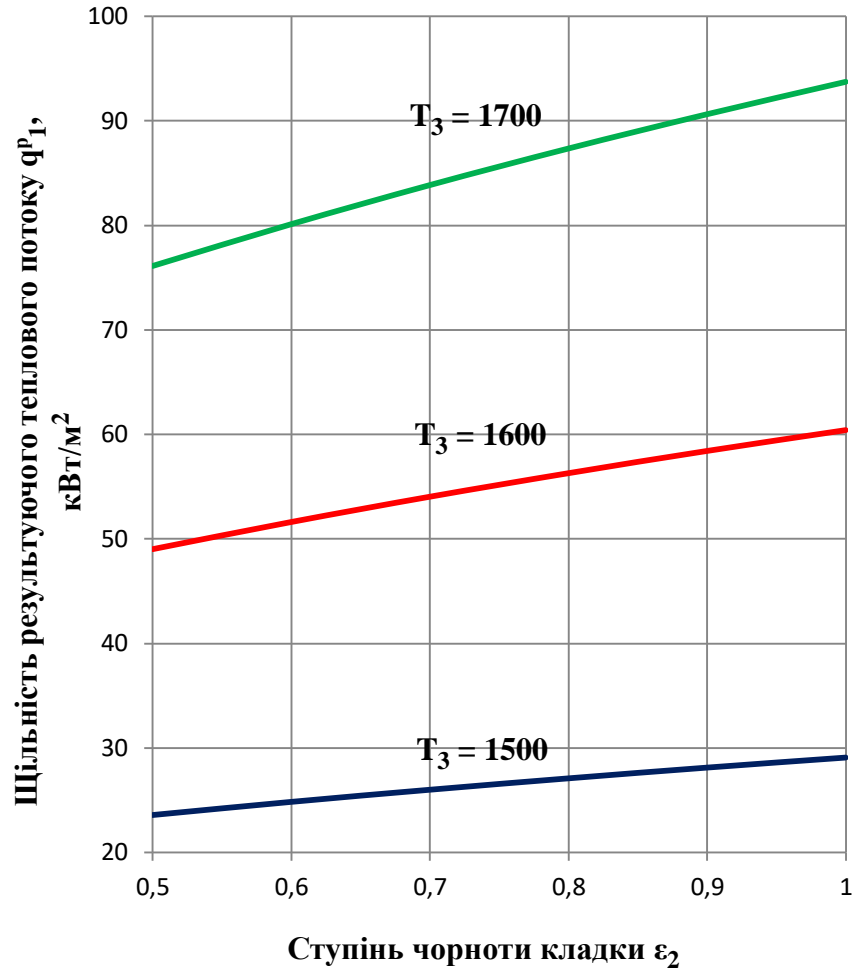


Рисунок 2.8 - Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від ступеня чорноти кладки ϵ_2 при $T_1 = 1400$ К

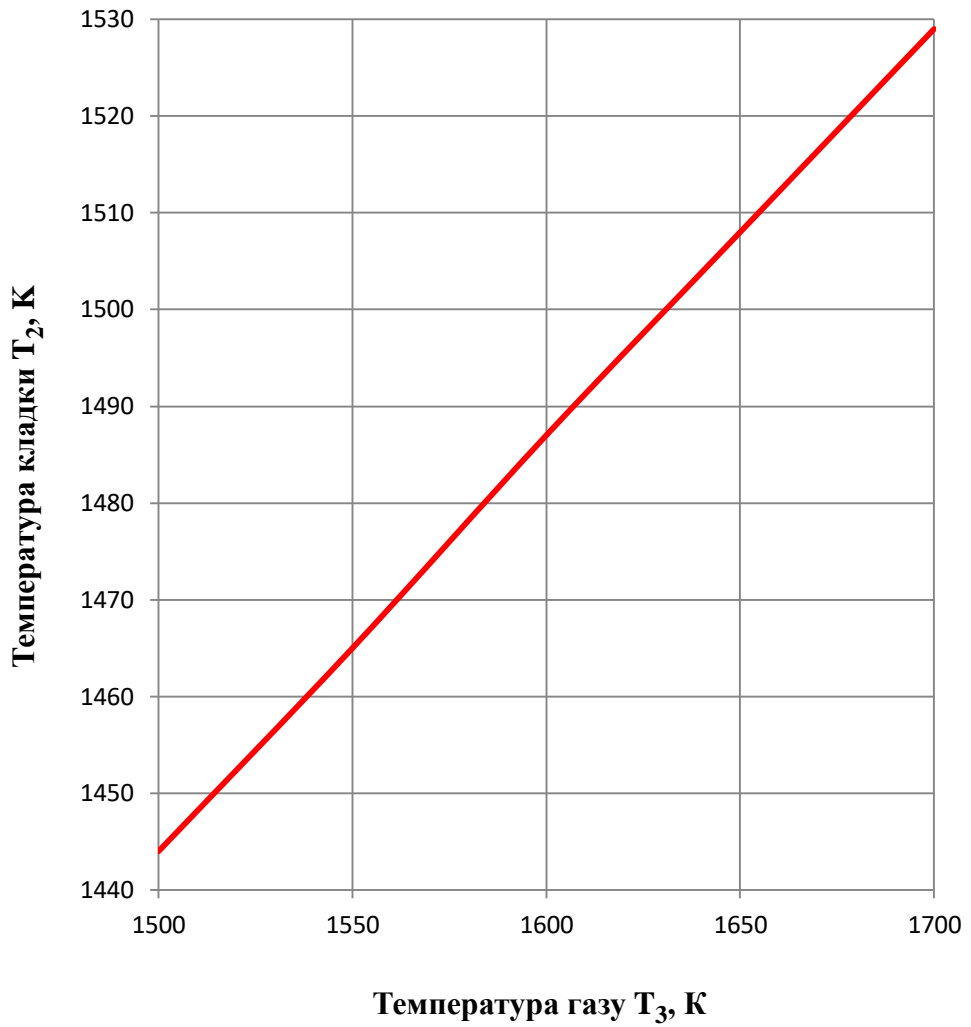


Рисунок 2.9 – Залежність температури кладки T_2 від температури газу T_3

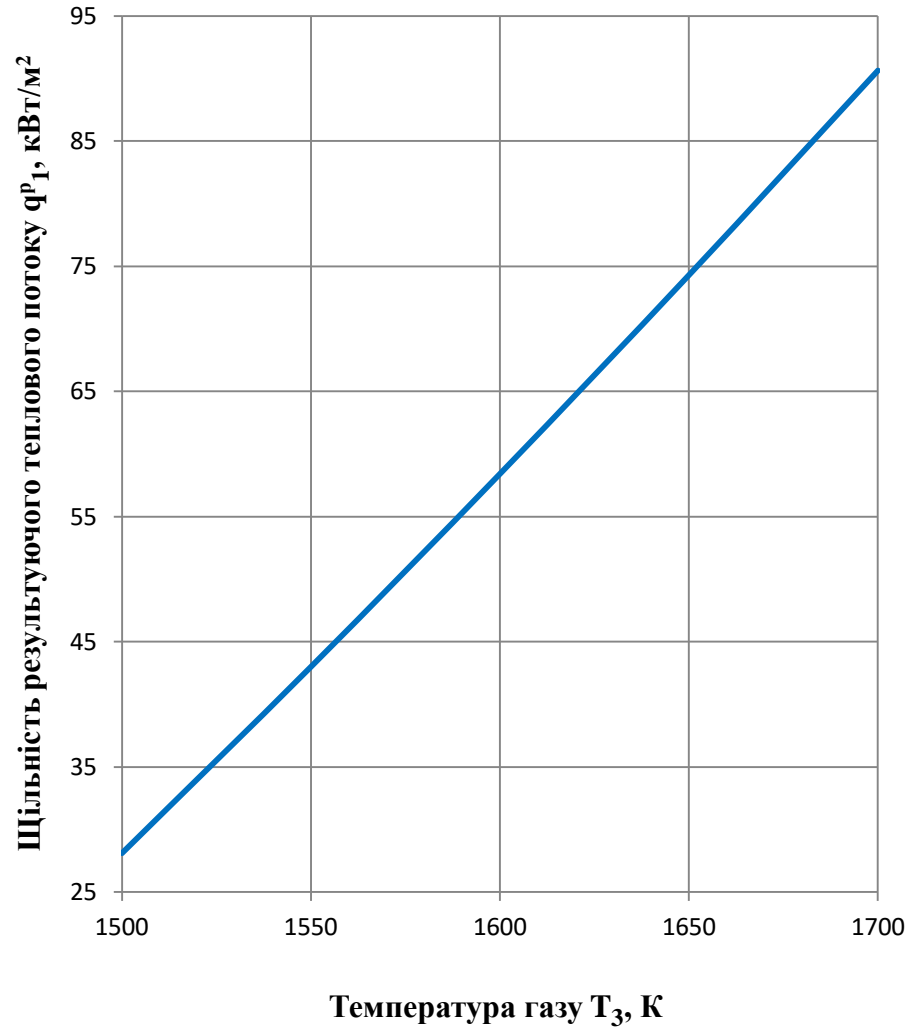


Рисунок 2.10 – Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від температури газу T_3

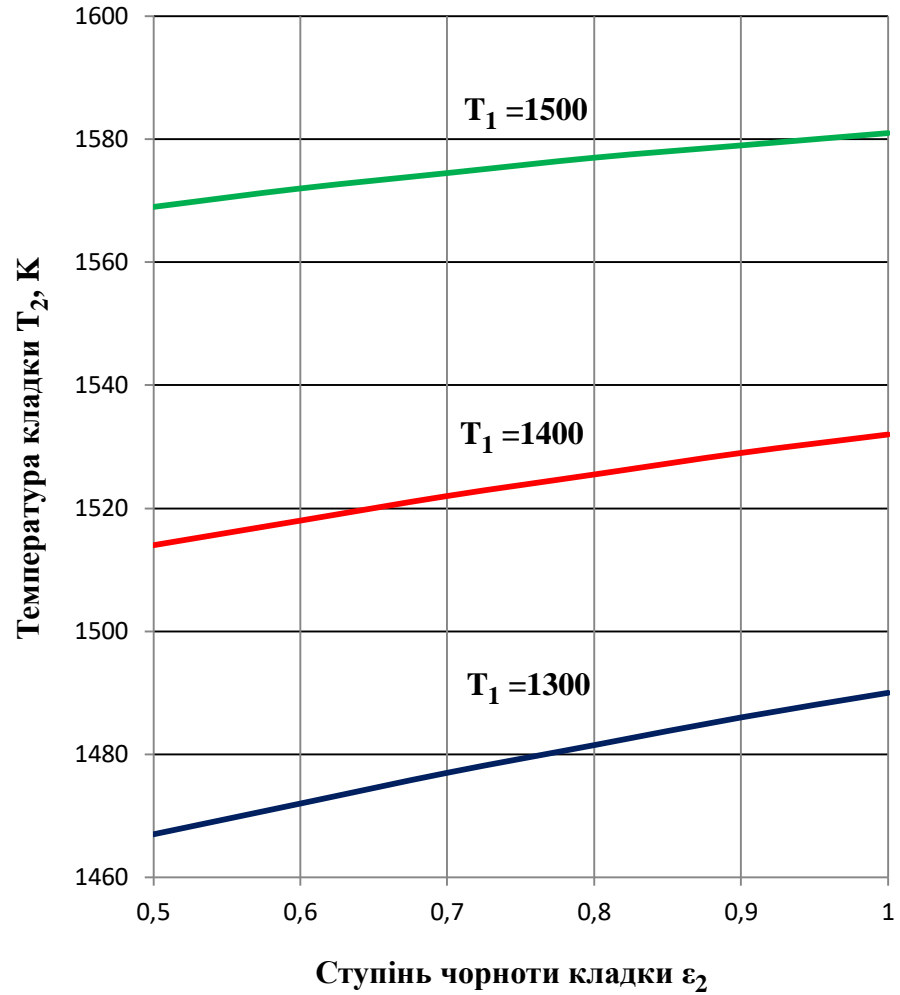


Рисунок 2.11 – Залежність температури кладки T_2 від ступеня її чорноти ε_2 при $T_3 = 1700$ К

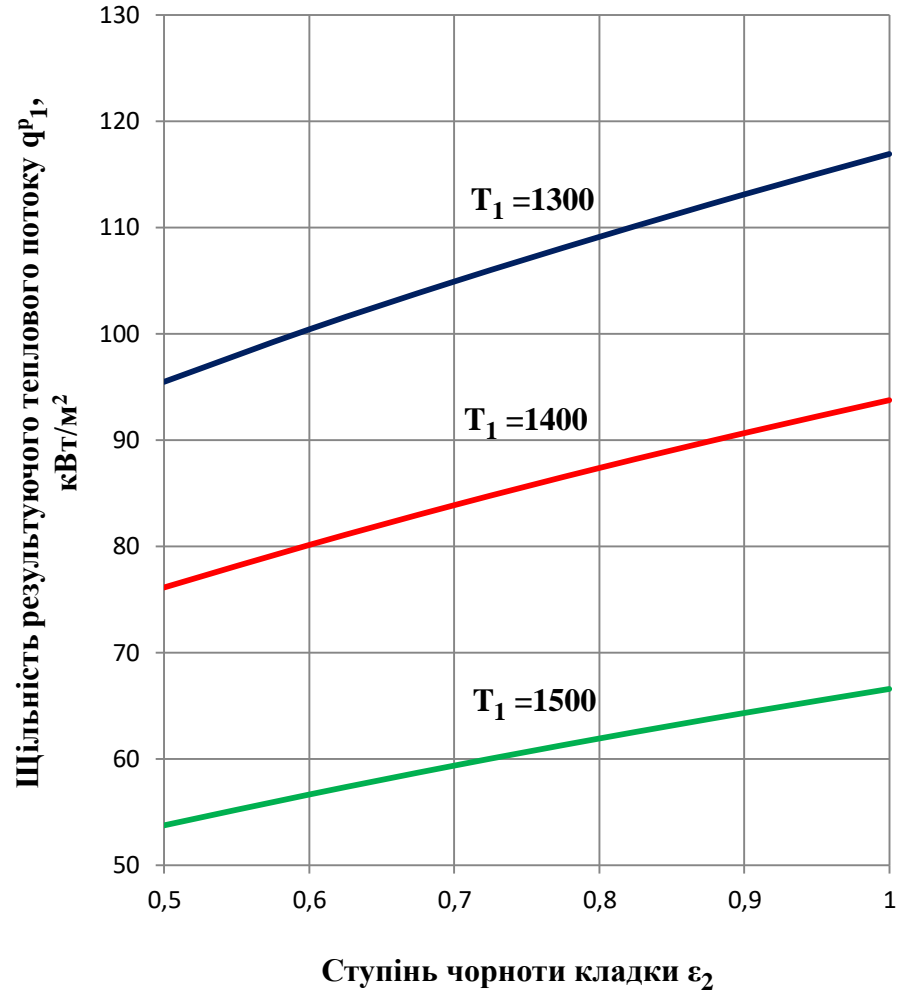


Рисунок 2.12 - Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від ступеня чорноти кладки ε_2 при $T_3 = 1700$ К

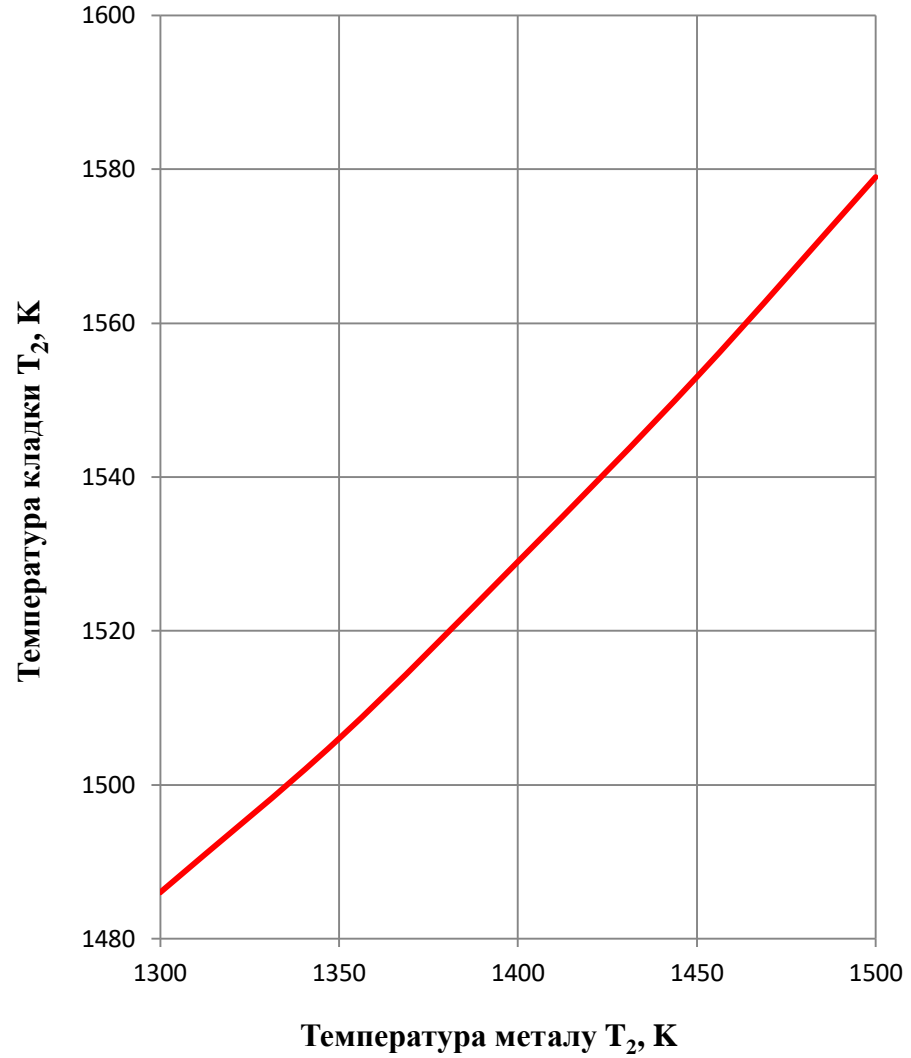


Рисунок 2.13 – Залежність температури кладки T_2 від температури металу T_1

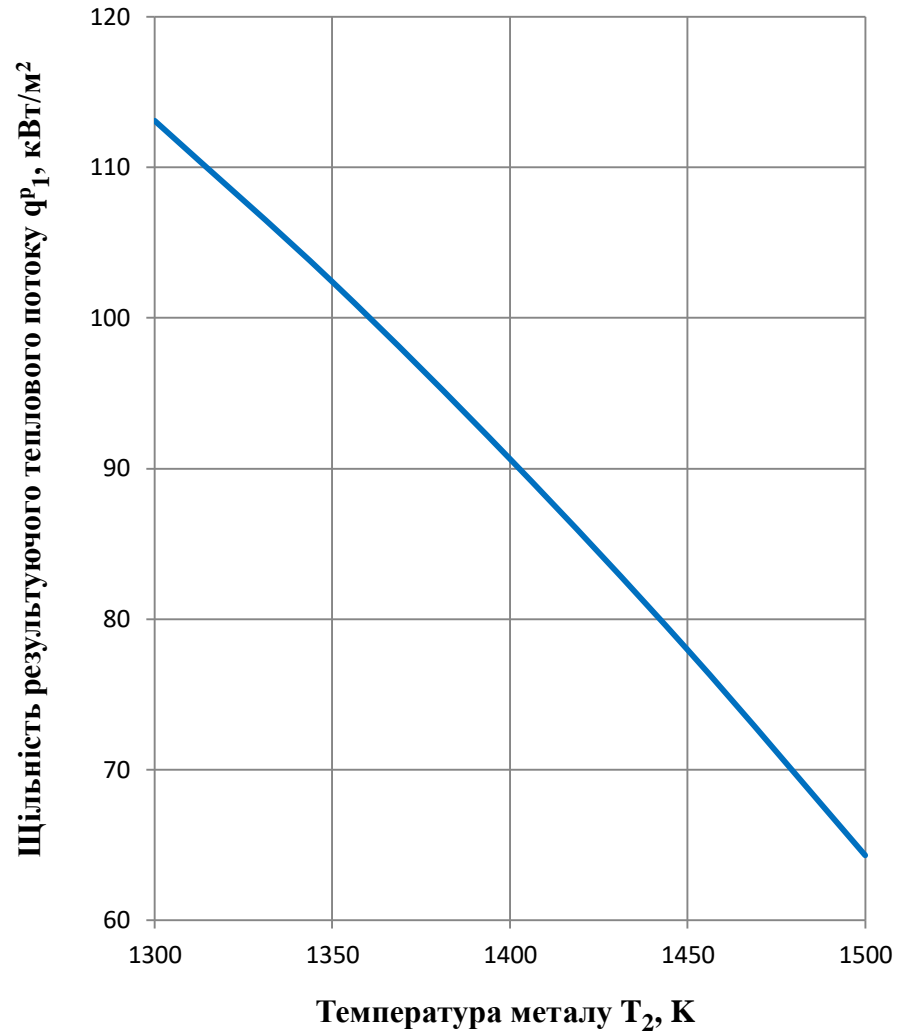


Рисунок 2.14 – Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від температури металу T_1

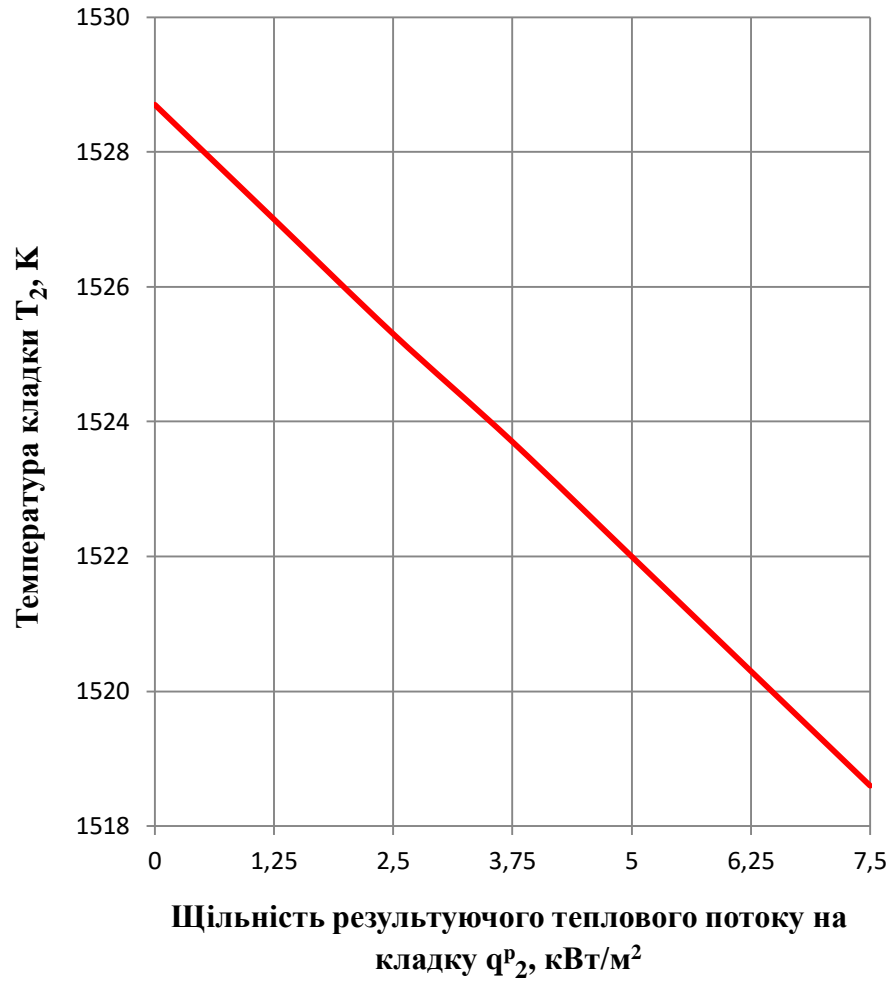


Рисунок 2.15 – Залежність температури кладки T_2 від щільності результуючого теплового потоку на кладку q_2^p

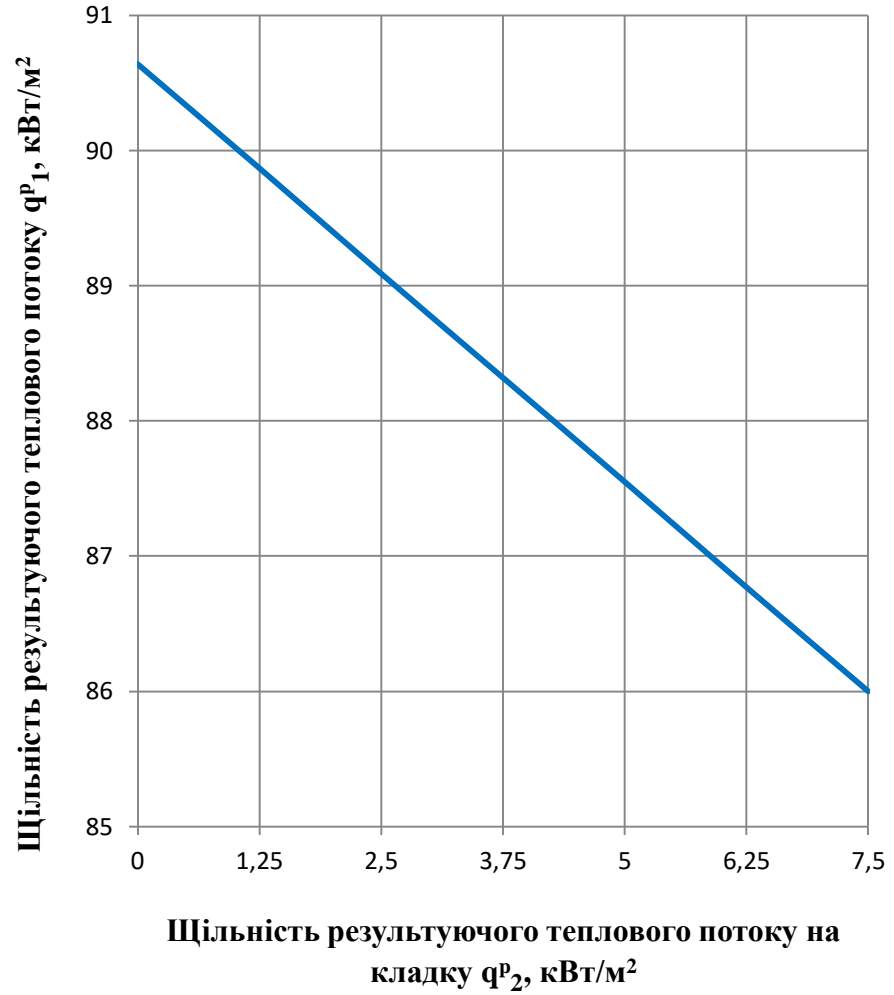


Рисунок 2.16 – Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від щільності результуючого теплового потоку на кладку q_2^p

Розрахунки виконано при значеннях вхідних параметрів, що відповідають умовам радіаційного теплообміну в робочому просторі високотемпературної нагрівальної печі: $s^{\text{эф}} = 2 \text{ м}$; $p_{\text{CO}_2} = 10 \text{ кПа}$, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 15 \text{ кПа}$, $F_1 = 40 \text{ м}^2$, $F_2 = 80 \text{ м}^2$, $T_3 = 1700 \text{ К}$, $T_1 = 1400 \text{ К}$, $\varepsilon_1 = 0,8$, $\varepsilon_2 = 0,6$.

Аналіз представлених результатів показав:

1. Збільшення ступеня чорноти кладки ε_2 сприяє підвищенню температури кладки T_2 і збільшенню щільності теплового потоку, що сприймається металом q_1^p . Так, при температурі газу $T_3 = 1700 \text{ К}$ зміна ступеня чорноти ε_2 від 0,6 до 0,9 сприяє росту температури кладки T_2 на 11 К і збільшенню щільності теплового потоку q_1^p , на 13 %, (см. рис. 2.7, 2.8).

2. Збільшення температури продуктів згоряння T_3 збільшує T_2 і сприяє росту q_1^p , (см. рис. 2.9, рис. 2.10).

3. Збільшення температури металу T_1 збільшує T_2 і сприяє зниженню q_1^p , (см. рис. 2.11 - рис. 2.14).

4. Збільшення втрат тепла через кладку q_2^p зменшує T_2 і знижує величину q_1^p , (см. рис. 2.15, рис. 2.16).

2.7.2 Розрахунок радіаційного теплообміну в системі газ-кладка-метал з урахуванням селективності радіаційних властивостей кладки

З метою врахування впливу селективності радіаційних властивостей кладки вирішена задача зовнішнього теплообміну в системі газ-кладка-метал при наступних допущеннях:

а) температура металу, кладки і продуктів згоряння постійні по довжині печі (з урахуванням цього припущення розрахунок теплообміну виконаний на одиницю довжини печі);

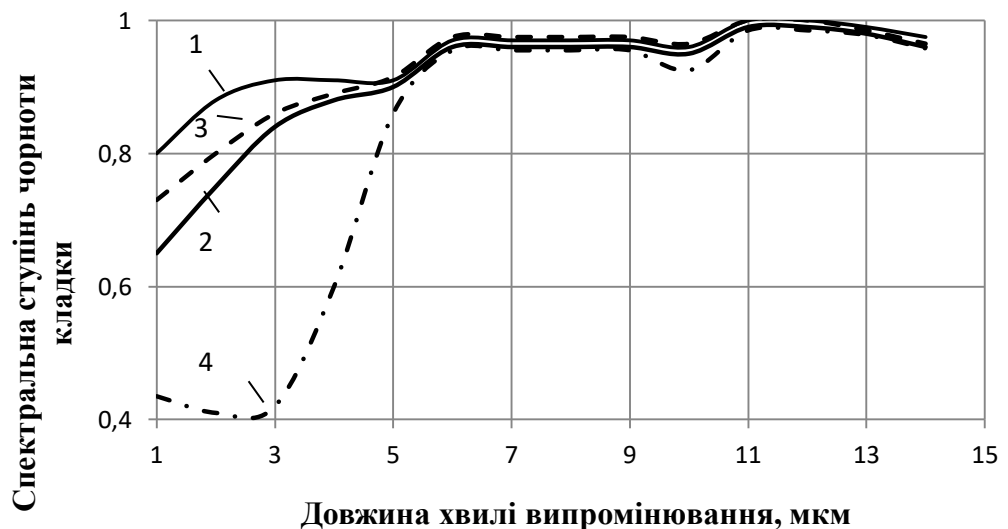
б) кладку вважаємо адіабатною;

в) поверхня кладки дифузне випромінює і дифузне відбиває при цьому її спектральні характеристики суттєво залежать від довжини хвилі випромінювання;

г) поверхня металу є сірою, дифузне випромінюючою і дифузне відбиваючою;

д) спектр поглинання продуктів згоряння, що заповнюють газовий об'єм, представлений у вигляді окремих смуг постійної ширини. У межах кожної смуги спектральна поглинальна здатність газового об'єму і його спектральний ступінь чорноти не залежать від довжини хвилі.

Розрахунки виконано для порівнянних значень вхідних параметрів, радіаційного теплообміну в робочому просторі високотемпературної нагрівальної печі (див. пункт 2.7.1): $s^{\text{эф}} = 2 \text{ м}$; $p_{\text{CO}_2} = 10 \text{ кПа}$, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 15 \text{ кПа}$, $F_1 = 40 \text{ м}^2$, $F_2 = 80 \text{ м}^2$, $T_3 = 1700 \text{ К}$, $T_1 = 1400 \text{ К}$, $\varepsilon_1 = 0,8$. При цьому спектральну ступінь чорноти кладки $\varepsilon_{\lambda 1}$ прийняли у відповідності з даними, які представлено на рисунку 2.17.



1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

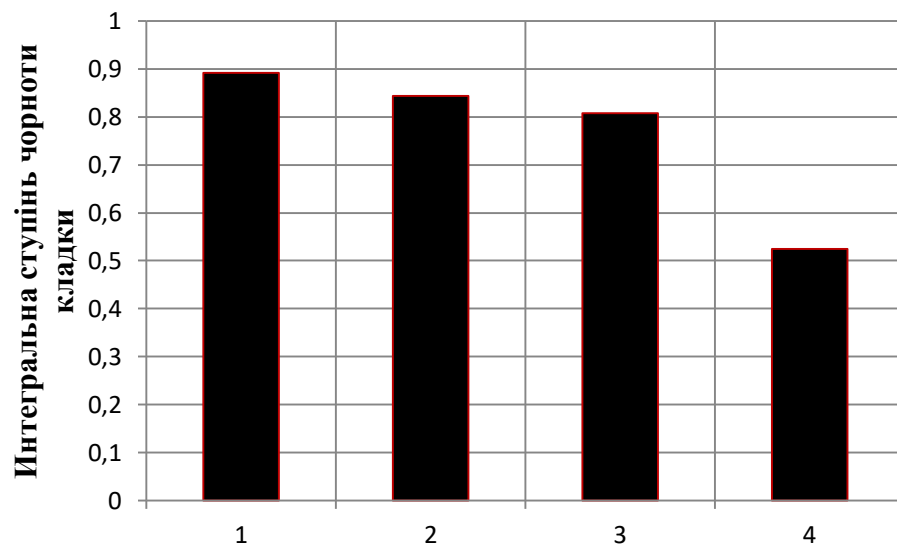
Рисунок 2.17 - Залежність спектральної ступені чорноти промислових вогнетривів від довжини хвилі теплового випромінювання

Результати розрахунків представлено в таблиці 2.2, а також на рисунках 2.18 - 2.20.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку радіаційного теплообміну з урахуванням спектральних властивостей кладки

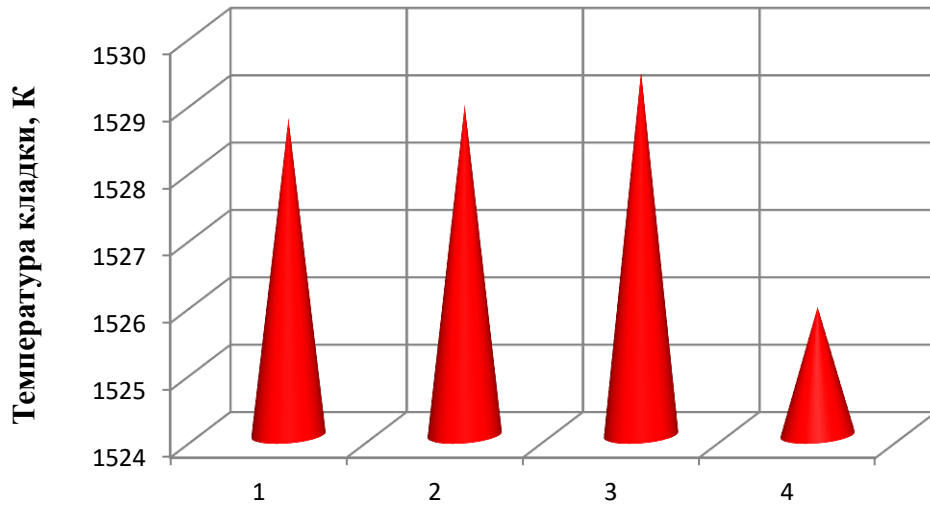
Показник	Номер вогнетриву (відповідає номерам кривих на рисунку 2.17)			
	1	2	3	4
Інтегральна ступень чорноти кладки ε_2	0,8 92	0, 843	0, 808	0, 525
Інтегральна поглинальна здатність кладки A_2	0,8 96	0, 85	0, 818	0, 542
Інтегральна ступень чорноти газу ε_3	0,2 5	0, 25	0, 25	0, 25
Інтегральна поглинальна здатність газу A_3	0,2 99	0, 302	0, 303	0, 324
Інтегральна ступень чорноти металу ε_1	0,8	0, 8	0, 8	0, 8
Інтегральна поглинальна здатність металу A_1	0,8	0, 8	0, 8	0, 8
Температура кладки T_2 , К	15 28,7	1 528,9	1 529,4	1 525,9
Щільність результуючого теплового потоку на метал q_1^p , кВт/м ²	89, 9	8 8,6	8, 77	7, 72

Результати розрахунків дозволили встановити залежність температури кладки T_2 і величини щільності потоку результуючого випромінювання на поверхню металу q_1^p від інтегрального ступеня чорноти кладки ε_2 .



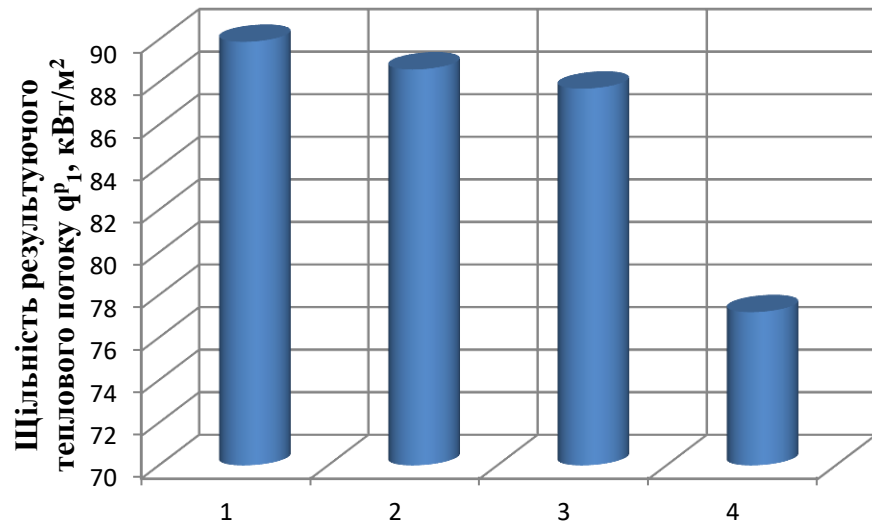
1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

Рисунок 2.18 –Інтегральна ступінь чорноти промислових вогнетривів в залежності від терміна їх теплової роботи



1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

Рисунок 2.19 – Характер зміни температури кладки печі в залежності від терміна теплової роботи промислових вогнетривів



1,2 – високо глиноземний вогнетрив після 2,5 років служби та після 8 місяців відповідно; 3 – шамотний вогнетрив після 1 року служби; 4 - новий вогнетрив

Рисунок 2.20 – Залежність щільності результуючого теплового потоку на метал q_1^p від терміна теплової роботи промислових вогнетривів

Аналіз результатів розрахунку і даних, які представлено на рисунку 2.17 показав:

1. Зі збільшенням терміну служби в нагрівальних печах спектральна ступінь чорноти вогнетривів зростає в діапазоні довжин хвиль (1...5) мкм. Після 2,5 років служби вогнетриви мають приблизно однаковий ступінь чорноти у всьому хвильовому діапазоні і наближаються за своїми радіаційними властивостями до "сірих" тіл.

2. Діапазон довжин хвиль (1...5) мкм є найбільш важливим в енергетичному відношенні для теплового випромінювання в печах. Тому збільшення спектральної ступені чорноти вогнетривів в зазначеному діапазоні повинно помітно позначитися, як на величині інтегральної ступені чорноти кладки ε_2 , так і на величині результуючого теплового потоку q_1^p :

- інтегральна ступінь чорноти кладки ε_2 зростає:

1) для високо глиноземистого вогнетриву після 8 місяців і 2,5 років служби на 60 % і на 70 % відповідно;

2) для шамотного вогнетриву після 1 року служби на 54 %;

- збільшення ε_2 сприяє підвищенню:

1) температури кладки T_2 в середньому для всіх вогнетривів на (4...5) °С;

2) результуючого теплового потоку q_1^p в середньому для всіх вогнетривів на (14...17) %.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

3.1 Небезпечні і шкідливі чинники прокатного виробництва

Прокатний цех є зоною підвищеної небезпеки. До небезпечних чинників прокатного виробництва відносять: наявність розжарених матеріалів, рухомих машин і механізмів, рухомих деталей устаткування і так далі. Тут виконуються такі роботи, які включені в список робіт з підвищеною небезпекою [30]: обслуговування нагрівальних печей, що працюють на газоподібному паливі, обладнання прокатних станів та інші.

Нагрівальні печі опалюються природно-доменною сумішшю. При попаданні в повітря газоподібного палива утворюється вибухонебезпечна суміш.

Не можна виключити попадання оксиду вуглецю в повітря робочої зони при неповному згоранні палива і надмірному тиску в печі. Це загрожує гострим отруєнням персоналу.

Основними чинниками небезпеки безпосередньо при прокатки металу є порушення режиму прокатки, що викликаються полонками або несправністю прокатних станів, затискних пристроїв і ін. Додатковими чинниками небезпеки є температура металу, швидкість його охолодження при зміні геометричних розмірів під час прокатки і так далі.

При різанні металу на ножицях небезпечними є локальні зони рухомих частин механізму, що обертаються. Площа небезпечної зони різко збільшується при різанні металу дисковими пилами.

Наявність і інтенсивність тих або інших шкідливих виробничих чинників в прокатному цеху залежить від ділянки. На ділянці нагрівальних печей основними шкідливими чинниками є інфрачервоне випромінювання і висока температура повітря. У теплий період року температура повітря в робочій зоні досягає 35 °С.

Потенційно небезпечні виробничі чинники устаткування прокатного цеху зведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Потенційно небезпечні виробничі чинники устаткування прокатного цеху

Устаткування	Небезпечні чинники	Можливі події	Заходи захисту
Нагрівальні печі	Висока температура повітря	Тепловий удар	Вентиляція, тепло- ізоляція
	Загазованість	Гостре отруєння	Дотримання режиму горіння
	Нагріті заготовки в зоні вивантаження	Опіки, механіч. травми	Автоматизація, огорожі
Подаючий рольганг	Рухомі ролики	Механічні травми	Огорожі
Прокатний стан	Вали, що обертаються,	Опіки, механ. травми	Огорожі
	Рухомі заготовки	Механіч. травми	Огорожі, борти
	Висока температура повітря, інфрачервоне випромінювання	Тепловий удар	Теплоізол. кабін оператора, вентиляція або кондиціонування
	Електричний струм	Електричний удар, місцеві електротравми	Електроізоляція, занулення.
Відвідний рольганг	Рухомі ролики Гаряча вода	Механіч. травми Опік	Огорожі
Дискова пила	Відлітаючі іскри, частинки металу	Механіч. травми	Автоматизація, огорожі
Кантувальник	Рухомі частини	Механіч. травми	Механізація, огорожі
Мостовий кран	Переміщувані маси металу	Механіч. травми	Дотримання правил транспортування вантажів краном

Інтенсивність теплового випромінювання максимальна в періоди посадки і видачі злитків і досягає 3500 Вт/м². У разі неправильної організації

горіння палива в робочу зону може потрапляти продукт неповного згорання - оксид вуглецю CO. Потрапляючи в організм людини, CO реагує з гемоглобіном, утворюючи карбоксигемоглобін. При цьому різко знижується здатність крові переносити кисень до тканин, може наступити кисневе голодування. Симптоми отруєння: сонливість, головний біль, у важких випадках - втрата свідомості [31]. ГДК оксиду вуглецю для повітря робочої зони - 20мг/м^3 [32].

У повітря робочої зони у відділення нагрівальних печей потрапляють також оксиди азоту, які утворюються при окисленні азоту повітря в зонах високих температур. Потрапляючи в організм, оксиди азоту викликають роздратування і опік слизових оболонок. З'єднуючись з гемоглобіном крові, оксид азоту NO утворює метгемоглобін, перешкоджаючи перенесенню кисню кров'ю. У потерпілих наголошується кашель, задуха, задишка, головні болі, серцева недостатність. У важких випадках може розвинути набряк легенів. ГДК оксидів азоту - 5мг/м^3 [32].

Пил, що виділяється в повітря робочої зони при завантаженні і вивантаженні металу, а також що заноситься з інших ділянок і цехів, складається в основному з оксидів заліза і інших металів. Тривала дія підвищеної запиленої зони, може привести до розвитку захворювань органів дихання - пневмоконіозів, фіброзів, хронічних бронхітів, а також до шкірних захворювань. ГДК пилу - 4мг/м^3 [32].

На ділянці прокатки шкідливими чинниками є шум, вібрація, висока температура повітря, інфрачервоне випромінювання. Оцінка чинників виробничого середовища і трудового процесу дана в таблиці 3.2.

Джерелами шуму є кантувальник, ножиці, роторні пили. Рівень звукового тиску на робочому місці досягає 105 дБА, що значно перевищує норму (80 дБА) [33].

Таблиця 3.2 - Оцінка чинників виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці вальцівника

Чинники виробничого середовища і трудового процесу	Нормативні значення	Фактичні значення	III клас - шкідливі умови праці			Час дії чинника, %
			I ст.	II ст.	III ст.	
1	2	3	4	5	6	7
1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : 3-4 клас небезпеки - масло мінеральне - вуглецю оксид - азоту оксиди - азоту діоксид	5 20 5 2	7 25 6 2,5	1,4 1,25 1,2 1,25			90
2. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м ³	4	4,6	1,5			90
3. Вібрація загальна, дБ	92	94	2			90
4. Шум, дБА	80	105			25	90
5. Мікроклімат в приміщенні - температура повітря, °С - відносна вологість, % - швидкість руху повітря, м/с - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	16-27 60 0,5 140	26-32 50 0,3 2000		5 1860		90
6. Тяжкість праці	Середній тяжкості					
7. Напруженість праці	Напружений					

Висновок: на підприємстві необхідно дотримуватися заходів безпеки, організації повноцінного відпочинку та харчування працівників під час робочих перерв, забезпечення їх необхідним спецодягом і гігієнічними засобами.

Шум поділяють на механічний, широкосмуговий, середньочастотний, переривистий. Робота в умовах підвищеного шуму може викликати головний біль, зниження рівня уваги, безсоння, надалі - неврози. На підставі останніх розвивається гіпертонічна хвороба, виразка шлунку, серцеві захворювання. Тривала робота при дії сильного шуму веде до зниження гостроти слуху [31]. Сильний шум підвищує вірогідність нещасного випадку, оскільки працівник в таких умовах може не розчутити застережливий сигнал або іншу звукову інформацію, застережну про можливу небезпеку.

Вібрацію викликають ті ж технологічні агрегати, які є джерелами шуму. Постійна дія вібрації викликає спазми судин, у важких випадках - вібраційну хворобу. Патологічна дія вібрації виявляється в загальних порушеннях вегетативної нервової системи - пітливість, тремтіння пальців, оніміння, підвищена чутливість до холоду. З'являються болі в суглобах, наступають зміни в серцево-судинній системі. Вібрація в прокатному відділенні відноситься до загальної, технологічної, категорії 3а (виробничі приміщення з джерелами вібрації) [34]. Рівень віброшвидкості на робочому місці вальцівника досягає 94 дБ при нормі для частотних діапазонів 16.63 Гц 92 Дб [34]. Тобто, спостерігається невелике перевищення допустимих значень.

Джерелом інфрачервоного випромінювання і конвективного тепла при прокатки є нагрітий до 1250 °С метал. Інтенсивність випромінювання досягає 2000 Вт/ м², що в 14,3 разів перевищує норму (140 Вт/м²) [32].

3.2 Заходи для поліпшення умов праці

Конструктивні особливості нагрівальних печей з достатнім ступенем надійності, виключають вірогідність вибуху газу в їх робочому просторі. Проте, передбачається автоматичне відключення подачі палива при згасанні факела або падінні тиску повітря нижче певної межі.

Для запобігання отруєнню персоналу оксидом вуглецю передбачається автоматична система регулювання співвідношення газ-повітря і підтримка розрідження в робочому просторі печі.

При обслуговуванні прокатних станів найчастіше зустрічаються механічні травми. Щоб уникнути травмування робочих механізмами, що обертаються, всі сполучні шпинделі, муфти і корінні вали прокатних станів захищають з боків щитами або кожухами. Оскільки може виникнути небезпека розриву сполучних муфт, запобіжні кожухи мають бути дуже міцними. Шпинделі станів захищають міцним бар'єром і влаштовують майданчики з поручнями для обслуговування.

На останніх клітях велику небезпеку представляє гуркіт. Тому на відвідних рольгангах встановлюють борти належної висоти. Над рольгангами встановлюють перехідні містки.

Не дивлячись на те, що останніми роками у нас в країні і за кордоном проведено велике число науково-дослідних робіт по зниженню шуму в прокатному виробництві, проблема ця ще повністю не вирішена.

Для зменшення рівня виробничих шумів застосовують звукоізоляцію і звукопоглинання. Наприклад, могутнє джерело шуму (вентилятор, насос) закривають кожухом, а між корпусом і кожухом закладають повстяні прокладки або прокладки з ультратонкого скловолокна. Звукоізольовують окремі приміщення - пости управління, кімнати відпочинку. Експаустери, вентилятори розташовують в ізольованих приміщеннях або в окремих будівлях. Для зниження аеродинамічного шуму на вихлопні і всмоктуючі отвори машин встановлюють глушники, в місцях зміни перетину або напряму потоку роблять плавні переходи.

Оскільки звукоізолювати прокатний стан, ножиці, роторні пили не представляється можливим, обмежують до мінімуму час перебування в зонах, де рівень шуму перевищує допустимий. При знаходженні в зоні, де рівень звукового тиску перевищує 80 дБА, використовують засоби індивідуального захисту: «беруші» груп А і Б [35].

Джерела вібрації встановлюють на віброізольовані фундаменти. При роботі з джерелами локальної вібрації використовують подвійні рукавиці.

3.3 Виробнича санітарія

Мірою захисту від конвективного тепла, виділень пилу і шкідливих речовин є виробнича вентиляція. У прокатному цеху як загальна вентиляція, використовується аерація. На постах управління встановлюються кондиціонери для створення метеоумов, близьких до оптимальних.

З метою захисту від інфрачервоного випромінювання пости управління обладнані теплозахисними екранами. Розрізняють екрани віддзеркалення і екрани поглинання. Екрани віддзеркалення роблять з матеріалів з малим ступенем чорноти в інфрачервоному діапазоні і відповідно з великим коефіцієнтом віддзеркалення - алюмінієва фольга, полірований алюміній, латунь, мідь. Екрани віддзеркалення можна робити переносними, встановлювати і прибирати в міру необхідності.

Екрани поглинання повинні мати високий ступінь чорноти (малий коефіцієнт віддзеркалення). Такі екрани виконуються порожнистими, з підведенням проточної технічної води.. Вода, яка нагрівається в порожнині екрану, здійснює функцію тепловідводу. Екрани поглинання роблять стаціонарними. Пости управління в прокатному цеху обладнані екранами поглинання.

Оскільки надлишки теплової енергії є значними, (близько 100 Вт/м^3), системи опалювання в цеху не передбачається. Тепло, що виділяється від гарячого металу і інших джерел, достатньо для підтримки допустимої температури повітря робочої зони в холодний період року.

У прокатному цеху застосовується природне і штучне освітлення. Розряд зорових робіт - VII - робота з матеріалами, що світяться, в гарячих цехах [36].

У цеху застосовується бічне і верхнє природне освітлення. Коефіцієнт природної освітленості для 3-го світлового поясу $e''' = 1,8 \%$ [36].

Нормоване значення коефіцієнта природної освітленості [36], %

$$e_n = e''' \cdot m \cdot C,$$

де $m = 0,9$ - коефіцієнт світлового клімату для району м. Запоріжжя;

$C = 0,7$ - коефіцієнт сонячності клімату [36].

$$e_n = 1,8 \cdot 0,9 \cdot 0,7 \approx 1,1.$$

Значення e_n слід округляти до десятих долей відсотка.

Освітленість від штучних джерел світла має бути не менше 200 лк для газорозрядних ламп і 150 лк для ламп розжарювання [37].

Джерелами світла в цеху служать лампи розжарювання Г220-750, які розраховані на напругу 220 В, споживана потужність 750 Вт [38]. Світильники - УПД, закриті, пило-газо-непроникні.

Для забезпечення питного режиму у виробничих приміщеннях влаштовують сатураторні установки для приготування питної підсоленої газованої води (0,5 % розчин NaCl). Кількість води – 4 - 5 л на людину в зміну. Температура води повинна бути в межах (8...20) °С. Відстань від робочих місць до питних установок не повинна перевищувати 75 м. Одна сатураторна установка організовується на 100 чоловік тих, що працюють в найбільш численній зміні.

3.4 Електробезпека

Прокатний цех є крупним споживачем електроенергії і має розвинене електрогосподарство. Велика кількість електроенергії йде на привід різних

агрегатів: прокатних станів, рольгангів, ножиць для різання металу, роторних пил, поворотної платформи, верстатів абразивної зачистки, правильної машини, мостових кранів, вентиляторів системи аспірації, вентиляторів, що подають повітря на пальники нагрівальних колодязів і методичних печей, димососів.

Могутній привід прокатних станів з'єднаний з напругою в мережі 6000 В. Для цього використовуються двигуни серії АО, ДАЗО.

До споживачів змінного струму напругою 380/220 В відносяться електродвигуни верстатів, пил, ножиць серії АИР, АОЗ, 4А, СД.

До споживачів постійного струму напругою 220 В відносяться електродвигуни серії П, а також електродвигуни трансферкар ЭД-118А. Для живлення мережі постійного струму використовуються перетворювачі КВПП-2000, для електрифікованого цехового транспорту - перетворювачі УВКП-1.

Змінний струм напругою 220 В споживають освітлювальні прилади.

Змінний струм напругою 42 В і 12 В використовується для живлення ручного електроінструменту і світильників переносного і ремонтного освітлення.

Блюмінг 1050-950 складається з двох клітей – обтисковою і заготовчою. Кожна кліть має по два двигуни потужністю 3500 кВт кожен. Загальна потужність двигунів блюмінга - 14000 кВт.

Дрібносортний стан 325 має загальну потужність двигунів 2050 кВт, дрібносортний стан (280...2330) кВт.

До приміщень без підвищеної небезпеки поразки струмом відносяться в цеху приміщення пультів управління, кімнати майстрів.

До приміщень з підвищеною небезпекою відносяться приміщення майстерень (чинник підвищеної небезпеки - струмопровідні підлоги).

До особливо небезпечним відносяться приміщення блюмінга, середньо- і дрібносортових станів, нагрівальних колодязів і методичних печей (висока

температура повітря і металеві струмопровідні підлоги), травильне відділення (хімічно активне середовище і висока температура повітря) [39].

Для живлення виробничого устаткування 380/220 В. В цеху застосовують чотири дротяну мережу трифазного струму з глухозаземленою нейтраллю. Для живлення електродвигунів потужністю більше 200 кВт використовується напруга 6000 В і трипровідна мережа з ізольованою нейтраллю.

Для захисту від дотику до корпусів електроустановок, що випадково опинилися під напругою, в мережі 380/220 В служить захисне занулення, а в мережі 6 кВ - захисне заземлення.

Для захисту у разі дотику до струмопровідної частини, що знаходиться під напругою, ефективно використовується пристрій автоматичного відключення, що реагує на струм нульової послідовності. Такий пристрій забезпечує відключення також і у разі дотику до заземленого (зануленого) корпусу при замиканні на нього фази.

3.5 Пожежна безпека

У прокатних цехах пожежі можуть виникати з наступних причин:

- несправність або неправильна експлуатація електроустаткування;
- зіткнення розжарених або нагрітих предметів з горючими матеріалами;
- вибухи горючих газів і пари легкозаймистих рідин.

У прокатному цеху використовуються наступні речовини, які небезпечні в пожежному відношенні [40, 41]:

- а) природний газ (область займання (5...17) %, температура самозаймання 530 °С) - використовується як паливо в нагрівальних колодязях і методичних печах.

б) доменний газ (область займання (46...68) %, температура самозаймання (500...600) °С) - використовується як паливо в нагрівальних колодязях і методичних печах в суміші з коксовим і природним газами.

в) коксовий газ (область займання (4,4...34) %, температура самозаймання 640°С) - використовується як паливо в нагрівальних колодязях і методичних печах в суміші з доменним і природним газами.

г) мінеральні масла (температура спалаху (150...180) °С) - використовуються в системах гідроприводу, мастила, а також у складі рідин, що змащує-охолоджує, при прокатки.

е) ацетилен (область займання (3,5...82) %, температура самозаймання 335 °С) - використовується при газовій зварці і різанні металів.

ж) електрична ізоляція - гумова, бавовняна, пластикова.

У прокатному цеху до категорії А відносяться газорозподільні і газорегуляторні пункти, в яких можливе утворення газоповітряної вибухонебезпечної суміші.

До категорії Б (вибухонебезпечна) відносяться майстрові ревізії підшипників, в яких використовуються газ і змащувальні масла.

До категорії В відносяться в прокатному цеху склади змащувальних рідин, приміщення масляних трансформаторів, маслотунелі гідравлічних систем, електрокабельні приміщення, насосно-акумуляторні станції.

До категорії Г відносяться відділення нагрівальних колодязів і методичних печей, блюмінга 1050-950, середньосортового стану 550, дрібносортових станів 325 і 280.

До категорії Д відносяться відділення приміщення щитів управління, механічні і електроремонтні майстерні [42].

Пожежонебезпечні ділянки в цеху в основному розташовані нижче за нульову відмітку, що пред'являє до них підвищені вимоги по забезпеченню пожежної безпеки.

Ступінь вогнестійкості будівлі цеху – II. Межа вогнестійкості стін - 2 години, решти будівельних конструкцій - від 0,25 годин до 2 годин [42].

Протипожежні заходи можна розділити на організаційних і технічних. До організаційних заходів відносяться: організація добровільної пожежної дружини, створення пожежно-технічної комісії, організація евакуації на випадок пожежі, проведення протипожежного інструктажу, навчання персоналу прийомам гасіння пожеж.

До технічних заходів відноситься дотримання необхідного ступеня вогнестійкості (II) - всі конструкції будівлі цеху складаються з матеріалів, що не згорають.

Біля методичних печей і нагрівальних колодязів не можна складати які-небудь горючі матеріали, відходи виробництва.

Майстрові ревізії підшипників необхідно розташовувати на першому поверсі, переважно в торцях будівлі. Зовнішні конструкції, що захищають, необхідно виконувати легкоруйнівними. Майстрові ревізії підшипників повинні відділятися від інших приміщень і коридорів протипожежними перегородками. У дверних отворах необхідно передбачати тамбури-шлюзи. У приміщеннях майстерень електричне устаткування, прилади, світильники встановлюються у вибухозахищеному виконанні.

Щоб уникнути пожежі на газових комунікаціях забороняється: користуватися факелом для відігрівання газопроводу і запірної арматури, а також для визначення місця витoku газу; застосовувати дерев'яні пробки для закриття штуцерів і отворів на газопроводах; витрачати газ у разі падіння його тиску в газопроводі до значення < 500 Па; складати поблизу газопроводу горючі матеріали; підпалювати газ, що випускається при продуванні газопроводу.

Електрокабельне господарство має бути надійно захищене від контакту з розжареними поверхнями і від механічного пошкодження.

Для одноповерхових будівель категорії Г, ступені вогнестійкості II площа поверху в межах пожежного відсіку не обмежується [42], тобто в протипожежних стінах немає необхідності.

Противопожежні розриви між будівлею цеху і довколишніми будівлями і спорудами складають: для будівель і споруд I, II і III а ступеня вогнестійкості, категорій А, Б, В – 9 м, категорій Г і Д - не нормується; III ступені вогнестійкості - 9 м для всіх категорій, для останніх – 12 м [42].

З урахуванням великих площ прокатних цехів особлива увага при проектуванні повинна приділятися заходам щодо забезпечення безпечної евакуації людей на випадок пожежі.

Кількість евакуаційних виходів з будівель, приміщень і з кожного поверху будівель приймається не менше два, за деякими виключеннями. Евакуаційні виходи розташовуються розосереджено.

Двері на шляхах евакуації повинні відкриватися по напрямленню виходу з будівлі. Висота дверей в світлу на шляхах евакуації має бути не менше 2 м. Зовнішні евакуаційні двері будівель не повинні мати замків, які не можуть бути відкриті зсередини без ключа.

Вибір засобу гасіння пожежі і вогнегасної речовини диктується, перш за все, класом пожежі, тобто які речовини і матеріали можуть горіти в даному приміщенні.

У приміщеннях прокатного цеху можуть горіти тверді речовини - пластик, електроізоляція (пожежі класу А), рідини - мінеральні масла, змащувальні емульсії, газ (пожежі класу В), горючі гази - природний, доменний і їх суміші (пожежі класу З) і електроустановки під напругою (пожежі класу Е).

При пожежах класу А найчастіше застосовується вода у вигляді компактних, розпорошених і тонкораспиленних струменів.

Витрата води на зовнішнє пожежогасіння складає для будівлі прокатного цеху 35 л/с [42]. Зовнішнє пожежогасіння здійснюється від пожежних гідрантів. Розстановка гідрантів повинна забезпечувати гасіння пожежі в будівлі цеху не менше ніж від двох гідрантів.

Для гасіння пожеж класів А і В застосовують також легко-механічну і хімічну піни. Легко-механічна піна утворюється в піногенераторах або легкопінних вогнегасниках (ОВП-10).

Для гасіння електроустановок під напругою використовуються інертні гази, вуглекислота. Ефективно застосовувати вуглекислотні вогнегасники (ОУ-5, ОУ-8).

У виробничих приміщеннях обладнанні протипожежні куточки, які забезпечені ящиками з піском, ємностями з водою і пожежним щитом з набором інвентарю: лопат, крюків, сокир, багрів, відер.

3.6 Розрахунок температури на зовнішній поверхні печі

Температуру на зовнішній поверхні обгороджування печі розраховуємо методом послідовних наближень.

Два шари ізоляції:

- шамотна цегла;
- пенокдіатомитова цегла.

Температура зовнішнього повітря $t_o = 20$ °С.

Температура внутрішнього шару футеровки печі $t_v = 1270$ °С.

Товщина першого шару $\delta_1 = 0,462$ м.

Товщина другого шару $\delta_2 = 0,464$ м.

Розрахунок перший.

Приймаємо:

- температура в площині з'єднання шарів $t_{sr} = 920$ °С.
- температура на зовнішній поверхні печі $t_n = 45$ °С.

Середня температура двох шарів, °С:

$$t_1 = \frac{t_v + t_{sr}}{2},$$

$$t_1 = \frac{1270 + 920}{2} = 1095.$$

$$t_2 = \frac{t_{sr} + t_n}{2},$$

$$t_2 = \frac{920 + 45}{2} = 482,5.$$

Розрахунок коефіцієнта теплопровідності шамотного шару, Вт/м · °С

$$\lambda_1 = 0,7 + 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot t_1 ,$$

$$\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot 1225 = 1,4008.$$

Розрахунок коефіцієнта теплопровідності пенодіатомового шару,
Вт/м · °С

$$\lambda_2 = 0,08 + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot t_2,$$

$$\lambda_2 = 0,08 + 0,00019 \cdot 472,5 = 0,1717.$$

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі в довкілля, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{°С}$

$$\alpha = 2,56 \cdot (t_n - t_o)^{0,25} + 4,56 \cdot \frac{\left[\left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_n - t_o},$$

$$\alpha = 2,56 \cdot (45 - 20)^{0,25} + 4,56 \cdot \frac{\left[\left(\frac{45 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right]}{45 - 20} = 10,933.$$

Щільність теплового потоку через обгороджування печі, Вт/м²

$$q = \frac{t_v - t_o}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}},$$

$$q = \frac{1270 - 20}{\frac{0,462}{1,4008} + \frac{0,464}{0,1717} + \frac{1}{10,933}} = 400,12.$$

Розрахунок значення температури в площині зіткнення, °С

$$t_{sr} = t_v - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1},$$
$$t_{sr} = 1270 - \frac{400,12 \cdot 0,462}{1,4008} = 1138,04.$$

Розрахунок значення температури на зовнішній поверхні, °С

$$t_n = t_{sr} - \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2},$$
$$t_n = 1138,04 - \frac{400,12 \cdot 0,464}{0,1717} = 56,6.$$

Висновок: в ході виконаних розрахунків було отримано, що температура зовнішньої стінки обгороджування печі складає $56,6 \text{ } ^\circ\text{C} > 45 \text{ } ^\circ\text{C}$, тому треба збільшити товщину другого шару ізоляції.

ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд методів енергозбереження в техніці нагріву і термічної обробки металу. Встановлено, що одним з ефективних способів енергозбереження є зниження втрат теплоти в робочому просторі пічного агрегату. Насамперед вони пов'язані з відхідними димовими газами, з тепловими втратами теплопровідністю в навколишнє середовище і витратами теплоти на акумуляцію кладки. До енергозберігаючих заходів також можна віднести вирішення завдань, пов'язаних зі зниженням загального часу теплової обробки і, як наслідок, зниження питомої витрати палива на одиницю нагрітого металу. В умовах нагрівальної печі зниження загального часу нагріву можливо за рахунок інтенсифікації променистого теплообміну в робочому просторі при збільшенні ступеня чорноти кладки.

2. Виконано розрахункові дослідження радіаційного теплообміну в робочому просторі високотемпературної нагрівальної печі. Аналіз результатів цього дослідження показав:

- збільшення ступеня чорноти кладки сприяє підвищенню температури кладки, що в свою чергу призводить до збільшення щільності теплового потоку, сприйманого металом, що нагрівається;

- збільшення температури продуктів згоряння в робочій камері печі підвищує температуру кладки і сприяє зростанню щільності теплового потоку, що сприймається металом;

- збільшення температури металу підвищує температуру кладки і сприяє зниженню щільності теплового потоку, що сприймається металом;

- збільшення втрат тепла через кладку знижує температуру кладки і знижує величину щільності теплового потоку, що сприймається металом.

3. Зі збільшенням терміну служби в нагрівальних печах спектральна ступінь чорноти вогнетривів зростає в діапазоні довжин хвиль (1...5) мкм. Після 2,5 років служби вогнетриви мають приблизно однаковий ступінь

чорноти у всьому хвильовому діапазоні і наближаються за своїми радіаційними властивостями до "сірих" тіл.

4. Зростання спектральної ступені чорноти вогнетривів в зазначеному діапазоні збільшує інтегральну ступінь чорноти кладки ε_2 :

- для високо глиноземистого вогнетриву після 8 місяців і 2,5 років служби на 60 % і на 70 % відповідно;

- для шамотного вогнетриву після 1 року служби на 54 %.

5. Збільшення ε_2 сприяє підвищенню:

- температури кладки T_2 в середньому для всіх вогнетривів на (4...5) °С;

- результуючого теплового потоку q_1^p в середньому для всіх вогнетривів на (14...17) %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ

1. Энциклопедический словарь по металлургии. URL: <https://metallurgicheskiy.academic.ru/4355> (дата звернення: 26.05.2020).
2. Бровкин Л. А. Тепло-массообмен в промышленных установках : учеб. / Л. А. Бровкин, Б. Г. Коптев. – Иваново, издательство Ивановского энергетического института, 1972. – с.143–149.
- 3 Латышев Л. Н. Излучательные свойства твердых тел : учеб. / Л. Н. Латышев, В. А. Петров, В. Я. Чеховской, Е. Н. Шестаков, М. : Энергия, 1974. 472с.
4. Исследование излучательной способности материалов, применяемых в энерготехнологических агрегатах. URL: <http://fizmathim.com/issledovanie-izluchatelnoy-sposobnosti-materialov-v-energotehnologicheskikh-agregatah> (дата звернення: 26.05.2020).
5. Продукты горения. URL: http://koi.tspu.ru/koi_books/arhipov/1str6.htm (дата звернення: 26.05.2020).
6. Об использовании покрытий с высокой степенью черноты для интенсификации лучистого теплообмена тепловых агрегатов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-ispolzovanii-pokrytiy-s-vysokoy-stepenyu-chernoty-dlya-intensifikatsii-luchistogo-teploobmena-teplovyyh-agregatov> (дата звернення: 26.05.2020).
7. Заболотный А. Р. Использование радиационных покрытий для улучшения работы нагревательных печей / А. Р. Заболотный, Н. П. Кузнецова, В. А. Кривандин, В. В. Серов, Д. А. Тищенко.-Л: Сталь. – 1983. - № 9. – с.90 – 91.
8. Чернов В. В. Об использовании покрытий с высокой степенью черноты для интенсификации лучистого теплообмена тепловых агрегатов / В. В. Чернов, О. В. Кленина // Современные материалы, техника и технологии.– 2015. - № 1. – С. 221 – 225.

9. Великодный В. А. Влияния радиационных характеристик поверхностей на теплообмен / В. А. Великодный, В. С. Пикашов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2014. – С. 63 – 69.

10. Кривандин В. А. Разработка радиационных покрытий для огнеупорной футеровки печей / В. А. Кривандин, Н. П. Кузнецова, Р. И. Меньшиков, В. В. Серов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1985. - № 9. – С. 137 – 142.

11. Соболев В. М. Совершенствование теплового режима работы агрегата непрерывного отжига / В. М. Соболев, А. М.Беленький, В. Ф. Бердышев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1984. - № 9. – С. 154 – 155.

12. Заболотный А. Р. Радиационные характеристики сталей для начального периода нагрева в промышленных печах / А. Р. Заболотный, Н. П. Кузнецова, С. А. Кривошеин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1988. - № 7. – С. 107 – 108.

13. Кривандин В. А. Энергосбережение как результат непрерывного совершенствования тепловой работы и конструкции нагревательных устройств // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. -№ 7. – С. 48 – 51.

14. Колченко Г. И. Спектральная степень черноты окалины / Г. И. Колченко, Н. П. Кузнецова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1984. - № 9. – С. 155.

15. Абрамович Б. Г. Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытий : учеб. / Б. Г. Абрамович, В. Л. Гольдштейн; М. : Энергия, 1977. – 250с.

16. Серов В. В. Изменение радиационных характеристик огнеупоров в процессе эксплуатации в промышленных печах / В. В. Серов, Н. П. Кузнецова, В. А. Кривандин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1980. - № 7. – С. 111 – 112.

17. Запечников В. Н. Спектральные отражательные характеристики огнеупорных промышленных изделий. Сообщение 1 / В. Н. Запечников, В. Т. Пушкин, А. Г. Зеньковский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1985. - № 1. – С. 121 – 123.

18. Запечников В. Н. Спектральные отражательные характеристики огнеупорных промышленных изделий. Сообщение 2 / В. Н. Запечников, В. Т. Пушкин, А. Г. Зеньковский // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1986. - № 5. – С. 129.

19. Афифи А. Статический анализ. Подход с использованием ЭВМ. : учеб. / А. Афифи, С. Эйзен, – М., :«МИР», 1982. –488с.

20. Чернов В. В. Исследование и разработка способов интенсификации лучистого теплообмена в металлургических печах за счет повышения степени черноты поверхностей теплообмена [Текст] :автореф. дис. 16.05.02 / В. В. Чернов [Металлургия черных, цветных и редких металлов] , – 2004.

21. Конструкція методика штовхальних методичних печей. URL: https://ua-referat.com/конструкція_методика_штовхальних_методичних_печей (дата звернення: 26.05.2020).

22. Печи с шагающим подом и печи с шагающими балками для нагрева черных металлов. Удельный расход энергии. URL: <http://engenegr.ru/gost-27881-88> (дата звернення: 26.05.2020).

23. Нагревательные печи с шагающим подом и сводовым отоплением. URL: <http://www.mashprom.ru/competitions/metall/furnace/pechi-s-shagayushchim-podom> (дата звернення: 26.05.2020).

24. Печь с шагающим подом (ПШП). URL: <http://metallurgist.pro/pech-s-shagayushchim-podom-pshp> (дата звернення: 26.05.2020).

25. Нагревательные печи с шагающим подом / шагающими балками а так же проходные толкательные печи и печи с тележками. URL: <http://www.keratech.cz/ru/dl-iil-iai-oaiaricl/dl-c-ae-ir-lar-a-d-ierni-o-oloro/d-ioiai-l-ir-larnleui-l-dl-c> (дата звернення: 26.05.2020).

26. Теплотехнічні зони методичної печі. URL: <http://ukrefs.com.ua/page,3,90634-Avtomatizaciya-metodicheskoiy-pechi.html> (дата звернення: 26.05.2020).

27. Методические нагревательные печи. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/articles/plavka_i_rozliv/pechi_dla_nagreva_metalla/metodicheskie_nagrevatelnie_pechi/1 (дата звернення: 26.05.2020).

28. Тайц Н. Ю. Расчеты нагревательных печей / Н. Ю. Тайц, С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб. – К., : «Техника», 1969. – 540 с.

29. Мاستрюков Б. С. Расчеты металлургических печей / Б. С. Мاستрюков, В.А. Кривандин – К., : «Металлургия», 1986. – с.363–365.

30. Перелік робіт з підвищеною небезпекою. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 р., №15.

31. Злобинский Б.М. Охрана труда в металлургии / Б.М. Злобинский.- М.: Металлургия, 1980. - 462с.

32. ДСН 3.3.6.042-99 Санитарные нормы микроклимата производственных помещений.

33. ДСН 3.3.6.037-99 Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

34. ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

35. Каминский С. Л. Средства индивидуальной защиты / С. Л. Каминский, К. М. Смирнов, В. И. Жуков и др. – Л.: Химия, 1989. – 400с.

36. Долин П. А. Справочник по технике безопасности / П. А. Долин.- М.: Энергоиздат, 1982. - 800с.

37. СНиП 11-4-79. Искусственное освещение. Нормы проектирования. - М.: Стройиздат, 1982. -25с.

38. Кнорринг Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг.- Л.: Энергия, 1976. - 391с.

39. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-86.-М.: Энергоатомиздат, 1987. - 648с.

40. Баратов А. Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др.- М.: Химия, 1990. - 384с.

41. Баратов А. Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд. в двух книгах / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – 384с.

42. Рыжков В. Г. Охрана труда в отрасли. Методические указания к практическим занятиям для студентов ЗГИА специальности «Металлургия чёрных металлов». - Запорожье: ЗГИА, 2003. - 38с.