

**Міністерство освіти і науки України
Дніпродзержинський державний технічний університет**

А.Я.Проскурня

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІНИ «ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНІ
ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ»
для студентів з напрямку 6.050601 - Теплоенергетика**

Затверджено редакційно-видавничою
секцією науково-методичної ради ДДТУ
_____2013р., протокол №

Дніпродзержинськ
2013

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпродзержинського державного технічного університету **заборонено**

Конспект лекцій з дисципліни “Високотемпературні тепло технологічні процеси і установки” для студентів спеціальності 6.050601 –Теплоенергетика / укл.: старший викладач Проскурня А.Я. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013р., стор.

Укладач: старший викладач Проскурня А.Я.
Відповідальний за випуск: проф., д-р техн.наук Горбунов О.Д.
Рецензент: доцент, канд.техн.наук Долгополов І.С.
Затверджено на засіданні кафедри
теплоенергетики
Протокол №18 від 19.06.2013р.

Конспект підготовлено як навчально-методичний посібник для вивчення дисципліни “Високотемпературні тепло технологічні процеси і установки” студентами спеціальності 6.050601-“Теплоенергетика”. Зміст конспекту тісно пов’язані з іншими дисциплінами, які викладаються для фахівців цієї спеціальності, зокрема “Гідрогазодинаміка”, “Спалюючі пристрої”, «Конструкційні та вогнестійкі матеріали». Особливий наголос зроблено на енергозберігаючі теплотехнології.

ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК (ВТТУ)	6
1.1. Устрій і призначення елементів конструкції ВТТУ	6
1.2. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних установок	8
1.3. Фізична сутність роботи високотемпературних установок	10
2. ОСНОВИ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ПЕЧЕЙ	12
2.1. Розвиток науки про печі	12
2.2. Поняття про теплові потужності печі, види потужностей	14
2.3. Тепловий дефіцит процесу	15
2.4. Види теплових втрат печі. Тепловий баланс	16
2.5. Показники теплової роботи печей	17
2.5.1. Продуктивність печі	17
2.5.2. Витрати теплоти на одиницю продукції	18
2.5.3. Засвоєна тепла потужність і ККД печі	20
2.6. Укладання теплових балансів печей, особливості запису для печей безперервної і періодичної дії	21
2.7. Заміна в печі одного палива іншим	21
3. АЕРОДИНАМІКА ТА ЗОВНІШНІЙ ТЕПЛООБМІН У ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ	23
3.1. Особливості руху газів в печах	23
3.2. Теоретичні основи тяги димової труби	26
3.3. Вибір висоти димової труби	28
3.4. Теплообмін випромінюванням між продуктами згоряння палива й обмежуючою їх поверхнею	29

3.4.1. Особливості випромінювання в напівпрозорих середовищах	29
3.4.2. Променистий теплообмін між газом і оболонкою	32
3.4.3. Радіаційний режим теплообміну в робочому просторі печей з напівпрозорою атмосферою, (у системі газ – кладка – матеріал)	33
3.4.4. Температура печі і її зв'язок з температурами газів і кладки	36
3.5. Керування нагріванням металу	38
3.6. Параметри керування зовнішнім теплообміном	40
3.7. Підвищення температурного потенціалу палива	42
4. ВНУТРІШНІЙ ТЕПЛООБМІН У ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ	49
4.1. Нагрів тонких тіл сталим тепловим потоком	49
4.1.1. Метод теплової діаграми (І.Д. Семикін)	50
4.1.2. Аналітичний метод	50
4.2. Нагрів тіла в печі зі сталою температурою ($t_{\text{печі}} = \text{const}$)	51
4.2.1. Розрахунок тривалості нагріву по тепловій діаграмі	51
4.2.2. Розрахунок тривалості теплової обробки матеріалу шляхом вирішення диференціального процесу	51
4.3. Вплив форми тіла на тривалість нагріву	52
4.4. Методи рішення задач нагріву масивних тіл	53
5 ПЛАВИЛЬНІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ	56
5.1. Технологічна й енергетична характеристики доменного процесу	56
5.2. Теплові режими й теплообмін у доменній печі	58
5.3. Енергетика доменного процесу	66
5.4. Основи технології процесів виробництва сталі	72
5.4.1. Шлаки сталеплавильних процесів	76
5.4.2. Матеріальний і тепловий баланси сталеплавильного процесу	78

5.4.3. Тепло- і масообмін у конвертерній ванні. Характеристика конвертерних процесів і загальна схема теплообміну в конвертерній ванні	81
5.4.4. Шляхи збільшення частки металобрухту в конвертерному процесі	82
6. ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ	87
6.1. Призначення та параметри нагрівання сталі. Якість нагріву, види браку	87
6.2. Фізико-хімічні особливості процесів нагріву сталі	88
6.2.1. Окислювання сталі при нагріванні	88
6.2.2. Зневуглецювання сталі при нагріванні	92
6.2.3. Термонапруження, що виникають у сталі при нагріванні	96
6.3. Теплові і температурні режими нагрівання металу	98
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	103

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК (ВТТУ)

1.1. Устрій і призначення елементів конструкції ВТТУ

Теплотехнологічна установка (піч-агрегат) являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію.

Пічна установка, незалежно від технологічного призначення включає наступні основні елементи:

- 1) робочий простір (реактор);
- 2) огороження;
- 3) систему підведення джерела теплоти;
- 4) систему відводу відпрацьованих газів;
- 5) систему утилізації теплоти газів, що відходять;
- 6) систему контролю й автоматичного управління.

Робочий простір являє собою камеру, обгороджену вогнетривкою кладкою. В її об'ємі здійснюються процеси генерації тепла, руху газів і матеріалів, тепломасообміну, фізико-хімічного перетворення сировини в продукт необхідної якості.

Форма робочого простору залежить від виду і способу транспортування оброблюваного матеріалу, умов теплообміну й інших чинників. Так, нагрівання у щільному шарі матеріалу здійснюється у вертикальних шахтних печах з камерою круглого перетину або трубчастих печах з нахиленим реактором. Для нагрівання заготовок перед прокаткою застосовуються горизонтальні витягнуті в довжину або кільцеві камери з прямокутним поперечним перетином.

Для зниження втрат теплоти робочий простір відокремлюється від навколишнього середовища *огороженням*. Неодмінною частиною огороження є вогнетривкий шар, що працює при високих температурах.

Верхня частина огороження реактора називається *склепінням*. Їх класифікують за формою на циліндричні, купольні й плоскі; за способом кріплення - на розпірні, розпірно-підвісні та підвісні. Воно може бути рухомим або нерухомим. Рухоме склепіння необхідне для завантаження і вивантаження матеріалу. У цьому випадку верхню частину огороження називають кришкою.

Проліт розпірних склепінь обмежений припустимими напругами і для більшості вогнетривів не перевищує трьох метрів. У розпірно-підвісних склепіннях частина ваги передається через підвіски на каркас, і напруги у вогнетриві знижуються до припустимих значень. Підвісні склепіння цілком передають вагу на каркас за допомогою підвіски штучних виробів і можуть перекривати проліт до 10-12 метрів.

Конструктивний елемент, що обгороджує робочий простір з боків і торців, називається *стіною*. У стінах використовують огороження всіх типів - вогнетривку кладку, монолітну і примусово-охолоджувальну футеровки.

Вогнетривка кладка, як правило, багатошарова. Функції її шарів поділені так: футеровка (внутрішній шар кладки) протистоїть руйнівним впливам високих температур, теплова ізоляція знижує тепловий потік через огороження, ущільнюючий шар його герметизують. При виконанні багатошарової кладки окремі шари по товщині стіни перев'язуються між собою для підвищення стійкості конструкції. Висота стін обмежена деформацією вогнетриву під навантаженням за високих температур. Механічна міцність і стійкість стіни забезпечується, якщо відношення висоти стіни до її товщини складає менше 20. Отвори і прорізи в стінах перекриваються натесом, напуском або аркою. Стіни спираються безпосередньо на каркас або під установки, що лежить на нижній рамі каркаса.

Нижня частина огороження, на якій розміщується оброблюваний матеріал, називається *подом*. Подам робочих камер установок для переробки твердих технологічних матеріалів мають бути притаманні висока вогнетривкість, механічна міцність, хімічна й ерозійна стійкість, а подам плавильних установок - шлакостійкість і висока щільність.

Під печі буває рухомий і нерухомий. У техніці зустрічаються наступні види рухомого пода: висувний (для відпалу або нормалізації великих поковок і виливків), викочувальний (для великотоннажних виробів), обертовий (для нагрівання круглих зливків або заготовок), крокуючий (для нагрівання заготовок прямокутного і квадратного перетину), роликовий (для нагрівання труб або листа).

Система підведення джерела тепла включає мережу газо- і повітропроводів, пристрої для спалювання палива і дуттьове устаткування (вентилятори або компресори). Основне призначення пристроїв для спалювання палива - організація процесу змішання палива з окислювачем. У залежності від організації процесу змішання газу з окислювачем розрізняють пальники з повним попереднім перемішуванням, з частковим і без попереднього перемішування.

Система відводу відпрацьованих газів включає мережу димових лежаків (боровів) і пристрої для створення необхідного розрядження в робочому просторі (димові труби і димососи). Лежаками (борами) називаються футеровані канали для транспортування газового середовища, що відходить з печі, до викидних труб.

Система утилізації теплоти димових газів включає теплообмінники (рекуператори і регенератори), призначені для підігрівання газу і повітря, а також котли-утилізатори, призначені для одержання гарячої води і пари. У рекуператорі теплота від теплоносія, що охолоджується, (диму) безперервно передається теплоносієві, що нагрівається (повітрю або газу) через стінку, яка їх поділяє. Рекуператори бувають металеві, керамічні і металокерамічні. Розрізняють радіаційні, конвективні та радіаційно-конвективні теплообмінники.

У регенеративному теплообміннику обидва теплоносії - що охолоджується та нагрівається, поперемінно омивають одну й ту ж саму поверхню теплообміну, утворену вогнетривкою або металевою насадкою в камері теплообмінника.

Система контролю й автоматичного управління включає безперервний контроль температури і тиску в робочому просторі печі; вимірювання витрат, тиску і температури газу і повітря, що йдуть на горіння; вимірювання температур диму до і після теплообмінника; вимірювання розрядження в димовому лежку і контроль

якості спалювання палива за вмістом кисню в продуктах його згоряння. Крім контролю системою передбачено автоматичне підтримання в робочому просторі печі температури і тиску, а також регулювання співвідношення «газ-повітря».

1.2. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних установок

У сучасному металургійному виробництві використовується найрізноманітніші теплотехнологічні установки. Для полегшення його вивчення вводиться класифікація, зроблена на основі врахування загальних ознак, що виділяють групу об'єктів із множини. Класифікація печей металургійного виробництва виглядає таким чином:

1. За технологічним призначенням

За цією ознакою всі печі поділяються на *випалювальні, плавильні, нагрівальні і термічні*.

До випалювальних печей відносяться установки, в яких тепловій обробці піддається попередньо подрібнений матеріал з метою одержання щільного конгломерату.

Теплова обробка матеріалів у плавильних печах здійснюється з метою відновлення речовин і видалення шкідливих домішок. Характерною рисою таких установок є зміна агрегатного стану матеріалу. Прикладами плавильних печей є доменні, мартенівські, електродугові печі, а також конвертори, вагранки, індукційні й інші подібні агрегати.

У нагрівальних печах тепла обробка матеріалів здійснюється з метою додавання їм пластичних властивостей (колодязі, методичні і кільцеві печі, печі з крокуючими балками і подом).

У термічних печах регламентоване нагрівання здійснюється для додавання матеріалові необхідних технологічних властивостей. Приклади: роликові, секційні, ковпакові печі.

2. За видом енергії, яка використовується

За цією ознакою печі поділяються на *паливні й електричні*.

У паливних печах як джерело тепла використовується паливо (тверде, газоподібне або рідке), а електричних - електроенергія. Прикладами паливних установок є доменні печі, нагрівальні колодязі, печі з крокуючим подом і балками.

Електродугові, індукційні й печі опору відносяться до електричних агрегатів.

Особливістю цієї групи печей є те, що незалежно від виду енергії, що використовується, вона перетворюється в теплову, яка і здійснює необхідну роботу.

3. За способом застосування джерела тепла

За цією ознакою розрізняють *печі-теплообмінники і печі-теплогенератори*.

В установках першого типу матеріал нагрівається в результаті передачі енергії до поверхні оброблюваного матеріалу з наступним поширенням її по масі. В установках другого типу зовнішній теплообмін відсутній, тому що генерація теплоти відбувається в об'ємі виробу. Прикладами печей-теплообмінників є паливні печі й електричні печі непрямої дії, а печей-теплогенераторів - електричні нагрівачі прямої дії, індукційні печі й автогенні установки (кисневий конвертер).

4. За родом дії

Розрізняють печі *періодичної* і *безперервної дії*.

В установках періодичної дії завантаження і вивантаження оброблюваного матеріалу здійснюється циклічно (мартенівські печі, колодязі, ковпакові печі), а в агрегатах безперервної дії - стаціонарно в часі (доменні, методичні, кільцеві печі).

5. За характером відносного руху нагрівальних газів і матеріалу

За цією ознакою розрізняють *прямоточні*, *протиточні* і *прямо-протиточні* установки.

При збігові напрямків руху газів і матеріалу, печі називаються прямоточними, а при зустрічному їхньому русі - протиточними. У прямо-протиточних печах на довжині робочого простору мають місце обидва вищевказані відносні рухи.

6. За типом пристроїв підігрівання повітря і газу

За цією ознакою виділяють *рекуперативні* і *регенеративні* печі.

У рекуперативних установках гарячі гази віддають частину свого тепла повітрю, що нагрівається, безперервно через стінку, що їх поділяє.

У регенеративних печах продукти віддають своє тепло насадці з вогнетривкого матеріалу в одній камері, у той час як повітря, що рухається у піч, сприймає тепло від іншої насадки вже попередньо нагрітої.

7. За типом пристрою для переміщення оброблюваного матеріалу

За цією ознакою розрізняють печі *штовхальні*, з *крокуючим подом і балками*, з *обертотом і роликотом подом*, з *колісним ролюганом*.

8. За видом теплообміну в робочотм просторі печі

Розрізняють печі з *радіаційним*, *конвективним* і *радіаційно-конвективним теплообміном*.

«Чистий» радіаційний теплообмін зустрічається у вакуумних електричних печах, а конвективний - у низькотемпературних установках з температурою в робочотм просторі, що не перевищує 600⁰С У всіх інших випадках у печах має місце радіаційно-конвективний режим теплообміну.

9. За спрямованістю теплообміну

За цією ознакою розрізняють печі з *прямим спрямованим*, *непрямим спрямованим* і *рівномірно розподіленим* режимом теплообміну.

В агрегатах із прямим спрямованим режимом теплообміну тепловий потік, що падає на матеріал, більший, ніж той, що падає на кладку. Прикладом таких печей є мартенівська піч зі струйно-факельними пальниками, спрямованими на метал.

До непрямого спрямованого режиму теплообміну відносять реактори, у яких тепловий потік, що падає на кладку, є більшим від того, що падає на матеріал. Такий режим реалізується в печах із плоскополуменовими пальниками, встановленими на склепінні.

У печах з рівномірно розподіленим режимом теплообміну тепловий потік на матеріал і кладку однаковий.

1.3. Фізична сутність роботи високотемпературних установок

Фізичну сутність роботи печі розглянемо на прикладі рекуперативного нагрівального колодязя з опаленням одним верхнім пальником (рис. 1.1).

Основним джерелом тепла в розглянутій печі є хімічна енергія горіння палива. Факельне спалювання палива здійснюється у вільному об'ємі, тобто У верхній частині робочого простору печі. Причому пальниковий пристрій і параметри газу та повітря мають підбиратися такими, щоб довжина факела обмежувалися довжиною робочою простору печі. Під довжиною факела слід розуміти шлях, де відбувається повне вигорання палих компонентів палива.

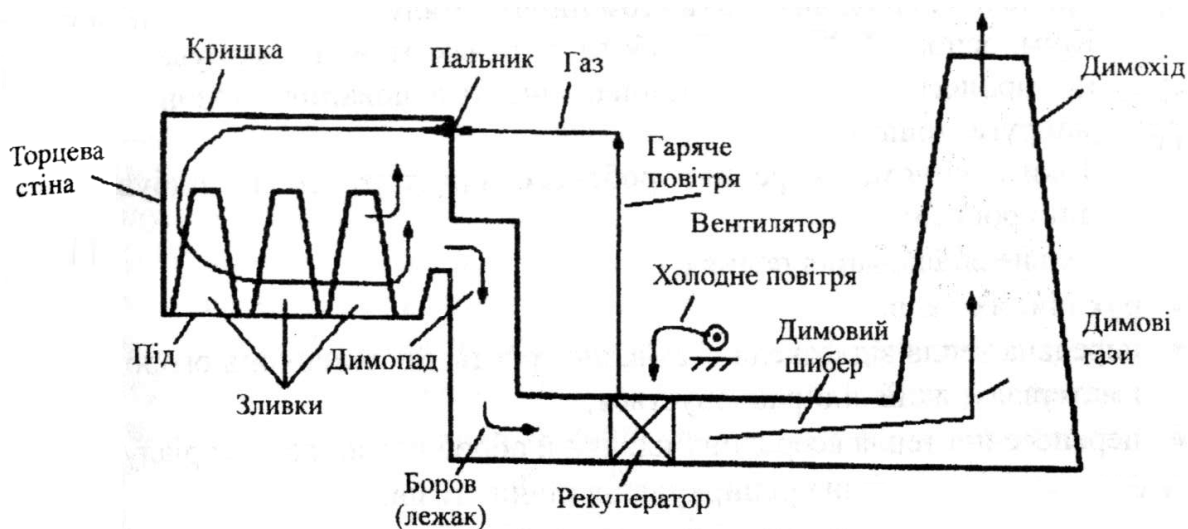


Рис. 1.1 Схема рекуперативного нагрівального колодязя

У результаті спалювання палива утворюються продукти повного згоряння палива (димові гази). Дим, рухаючись всередині робочого простору печі, передає своє тепло шляхом конвекції і випромінювання металу і огорожу вальним поверхням кладки. Доставлене до поверхонь тепло передається всередину стінок і металу теплопровідністю, у результаті чого вони нагріваються.

Основна частина димових газів, віддавши своє тепло, залишає робочий простір печі через спеціальний проріз, розташований у нижній його частині, де димові гази мають найнижчу температуру.

Залишивши робочий простір, відпрацьовані гази системою димопадів і лежаків проходять через теплообмінники (рекуператори або регенератори) і котли-утилізатори, де відбувається утилізація тепла, димових газів у вигляді підігрівання газу, повітря і води. Віддавши практично усе своє фізичне тепло, дим з лежачка потрапляє до димової труби, а звідти до навколишньої атмосфери. Дим, що залишає димову трубу, повинен мати температуру вищу від точки роси для запобігання утворенню кислотних дощів.

Незначна частина димових газів, не залишаючи робочий простір, повертається всередину. Процес повернення газів, що не залишають робочий простір, називається

внутрішньою рециркуляцією. Як правило, внутрішню рециркуляцію застосовують для підвищення рівномірності температур у робочому просторі печі.

Крім внутрішньої рециркуляції розрізняють зовнішню рециркуляцію. Під *зовнішньою* рециркуляцією варто розуміти процес повернення димових газів ззовні робочого простору печі до його об'єму. Такий процес організують для підвищення об'єму диму в робочому просторі печі в період витримки (томління) металу.

Крім основної теплової роботи в печах можуть відбуватися такі супутні процеси, як окислювання, знеуглецювання, газонасичення, термонапруга тощо.

Таким чином, всередині робочого простору печі, відбуваються наступні процеси:

- факельне спалювання палива;
- рух пічних газів;
- передача тепла від факела і газів, що гріють, до поверхонь огороження і матеріалу, який відпрацьовується;
- перенесення тепла всередину кладки й оброблюваного матеріалу;
- зовнішня і внутрішня рециркуляція пічних газів;
- супутні нагріванню матеріалів процеси (окислення, знеуглецювання, газонасичення, термічні напруги тощо).

2. ОСНОВИ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ПЕЧЕЙ

2.1. Розвиток науки про печі

Однією з перших теорій, яка об'єднувала уявлення про промислові полум'яні печі, була гідравлічна теорія полум'яних печей Михайла Васильовича Ломоносова, розвинена професором Володимиром Юхимовичем Грум-Гржимайло в 1909-1910рр.. в гідравлічній теорії розрахунку полум'яних печей на основі застосування законів гідравліки до руху пічних газів. У ті часи печі працювали на твердому і іноді на рідкому та газоподібному паливі. Переважним рухом димових газів був природний рух під дією тяги димової труби. Топка відокремлювалася від робочого простору печі полум'яним вікном. Вентиляторів зазвичай не було. Тому повітря надходило в топку під дією природної тяги. Печі, що працюють на такому принципі, називалися самодувними.

Основні положення гідравлічної теорії розрахунку полум'яних печей (у лапках виділені формулювання з книги Грум-Гржимайло В.Є. "Полум'яні печі", 1932р.):

1. Головний фактор успішної роботи печі - організація руху продуктів згоряння в робочому просторі печі. Це положення актуальне і зараз.

2. "Рух полум'я в печах підпорядковується законам руху легкої рідини у важкій (полум'я в зовнішньому повітрі)". Таким чином, пічні гази рухаються в робочому просторі, притискаючись до склепіння. "Будь-який рух кожної рідини є результат витрати напору", тобто рух газів відбувається за рахунок тяги димової труби.

3. Для успішної роботи печі димові вікна для видалення диму з робочого простору печі повинні розташовуватися на рівні подини або в подині." Відпрацьовані пічні гази повинні направлятися найкоротшим шляхом в димову трубу. Підина повинна бути ретельно каналізована. Необхідно уникати застою холодних газів на поду".

4. "Підсклепінний простір є ідеальна спалююча камера; в інтересах правильності протікання реакції горіння, правильності та рівномірності нагріву предметів, розташованих на поду, рекомендується робити печі з високим склепінням". Щоб гази встигли охолонути в межах робочого простору печі, тобто встигли передати якомога більше теплоти нагріваємым матеріалам, час перебування газів в робочому просторі печі - $\tau_{\text{переб}}$ - повинно бути тривалим, а швидкість газів - W_d - мінімальна

$$\tau_{\text{переб}} = L_{\text{печи}} / W_d \text{ и } W_d = V_d / F_{\text{пер}}, \quad (2.1)$$

де $L_{\text{печи}}$ - довжина печі [м]; V_d - витрата диму [м³ / с]; $F_{\text{пер}}$ - площа перерізу печі для проходу диму [м²].

Гідравлічна теорія пропонувала таку методику розрахунку печей: вводилося поняття швидкості падіння температури полум'я (димових газів) від калориметричної температури $t_{\text{кал}}$ до температури відхідних з печі газів $t_{\text{відх}}$ за час перебування газів в робочому просторі печі $\tau_{\text{переб}}$

$$C_{\text{пад}} = (t_{\text{кал}} - t_{\text{відх}}) / \tau_{\text{пероб}} \quad (2.2)$$

Виходячи з відомої швидкості падіння температури завжди можна знайти температуру відхідних газів і розрахувати тепловий баланс печі.

Принципово новою явилася, так звана, загальна теорія печей академіка Миколи Миколайовича Доброхотова, розроблена в 1923-27 роках. Він вперше показав, що рух газів у печах має турбулентний, а не ламінарний характер, у зв'язку з чим процеси змішування газів і горіння палива протікають за законами турбулентного, а не ламінарного потоку. Основні положення теорії полягають у наступному:

1. Для поліпшення теплопередачі конвекцією і випромінюванням газу повинні рухатися в робочому просторі печі якомога ближче до поверхні нагріваємих матеріалів з можливо більшою швидкістю. Для цього печі потрібно будувати з невеликим поперечним перерізом робочого простору;

2. Горіння палива при високих температурах визначається умовами змішування його з киснем повітря. Хімічна реакція горіння протікає дуже швидко і не лімітує швидкість процесу спалювання палива;

3. Довжина турбулентного факела пропорційна діаметру паливного струменя і не зростає із збільшенням теплового навантаження при сталому співвідношенні палива і повітря;

4. Геометричний напір газів у печах малий у порівнянні з кінетичної енергією газів. Впливом геометричного напору можна знехтувати, при цьому можна враховувати тільки сили інерції і кінетичну енергію газових потоків;

5. Теплову потужність печі необхідно визначати кількістю не тільки подається в неї палива, але і кисню, споживаного піччю для спалювання палива. Нестача кисню для повного згоряння палива не дозволяє використовувати всю потужність;

6. Дуже важливе значення має вибір системи транспортування теплооброблюваних в печі матеріалів, яка визначає тип печі і є головною її особливістю.

Ця теорія відкрила нові напрямки в конструюванні компактних печей з примусовим рухом газів. Печі стали працювати на рідкому і газоподібному паливі, з'явилися вентилятори, зникли окремо розташовані топки. Ця теорія використовувалася в період індустріалізації країни, коли головною вимогою промисловості була висока продуктивність печей незважаючи на підвищену витрату палива. Більшість положень загальної теорії М.М. Доброхотова дійсні і по сьогоднішній день.

У роботу з розвитку загальної теорії печей включилося багато науковців, сприяючи своїми дослідженнями появі нових розділів, пов'язаних з моделюванням роботи печей, створенням нових методів розрахунку промислових печей для різних технологічних процесів.

Серед робіт, що відображають розвиток теорії печей в 30-х роках, слід назвати праці професора Йосипа Даниловича Семикіна, який, спираючись на дослідження, виконані на початку 1910-х років інженером Миколою Євгеновичем Скарєдовим, висунув в 1930р. гасло "Успіх вирішує велика тепла потужність". При цьому слід відзначити, що наукова заслуга Н.Е. Скарєдова полягає в тому, що він показав і довів наступне: відмінність у роботі однакових мартенівських печей визначається їх

різною тепловою потужністю. Ним вперше встановлено, що тепла потужність є найголовнішим чинником, що визначає роботу кожної печі.

У 1934р. свої погляди на теплову роботу печей І.Д. Семікін назвав енергетичної теорією печей на противагу гідравлічної теорії В.Е. Грум-Гржімайло. Основні положення енергетичної теорії:

1. Необхідно проектувати і будувати печі із збільшеною тепловою потужністю. Це основна умова високої продуктивності роботи печі.

2. Для досягнення високої теплової потужності необхідно збільшувати тягу печі за рахунок будівництва високих димових труб і збільшення потужності димососів, збільшувати поверхні теплообміну теплоутілізуючих пристроїв для підвищення температури нагрівання повітря та ін.

Реалізація на практиці положень енергетичної теорії печей, як раніше гідравлічної теорії, показала недостатність одностороннього підходу до вирішення проблем, що існують в металургійних печах, головними з яких є скорочення питомої витрати палива та підвищення питомої продуктивності.

Професор Марк Олексійович Глинков, використавши досягнення сучасної науки і техніки, врахувавши помилки і недоліки гідравлічної та енергетичної теорій печей, створив у 1959-1962 роках свою, нову загальну теорію печей. Основою цієї теорії став основний принцип: предметом теорії печей повинно бути комплексне дослідження трьох пов'язаних між собою процесів, що відбуваються в печах:

1. Спалювання палива.
2. Рух пічних газів.
3. Теплопередача від газів до нагріваємих матеріалів.

2.2. Поняття про теплові потужності печі, види потужностей

Як кожна енергетична установка піч характеризується потужністю.

Тепловою потужністю печі називають кількість теплоти, що виділяється в печі в одиницю часу при повному згорянні палива або за рахунок витрати електричної енергії.

Одиницею виміру потужності є Вт=Дж/с. Частина потужності, споживаної піччю, витрачається на здійснення корисної роботи - нагрів матеріалів. Вона поглинається матеріалами і тому називається засвоєною потужністю $M_{засв}$, інша частина вимушено втрачається в навколишнє середовище – $M_{вт}$. Тому прийнято називати теплову потужність печі загальною потужністю

$$M_{заг} = M_{засв} + M_{вт} \quad (2.3)$$

Загальна потужність паливної печі виражається через витрати палива, вимірюваний витратоміром в м³/ч (м³/с) - для газоподібного палива або в кг/год (кг/с) - для рідкого палива.

Якщо позначити витрати палива B , то

$$M_{заг} = B \cdot Q_n^p, \text{ Вт.} \quad (2.4)$$

Загальна теплова потужність складається з технологічної потужності $M_{техн}$ і потужності холостого ходу $M_{хх}$

$$M_{заг} = M_{техн} + M_{хх} \quad (2.5)$$

Під технологічною потужністю розуміють кількість тепла, що необхідно подати в піч з паливом за одиницю часу для забезпечення процесу теплової обробки матеріалів (нагрівання, плавлення, випалу і т.ін. без урахування втрат тепла). Отже

$$M_{техн} = \frac{Q_{техн}}{\eta_{квт}} = \frac{P \cdot \Delta i}{\eta_{квт}} = \frac{q \cdot F}{\eta_{квт}} \quad (2.6)$$

Потужність холостого ходу – це кількість тепла, що необхідно внести з паливом за одиницю часу для покриття теплових втрат в камері печі $Q_{вт}$. З тих же міркувань $M_{хх}$ дорівнює

$$M_{хх} = \frac{Q_{вт}}{\eta_{квт}} \quad (2.7)$$

2.3. Тепловий дефіцит процесу

Тепловий дефіцит - це кількість теплоти, яку потрібно передати вихідним матеріалам, щоб перетворити їх на 1кг (або 1т) кінцевого продукту. В умовах сталого тиску середовища ця кількість теплоти дорівнює збільшенню питомої ентальпії $\Delta i = i_k - i_{ноч}$, Дж/кг, де i_k - ентальпія кінцевого продукту на виході з печі, Дж/кг; $i_{ноч}$ - ентальпія матеріалу при завантаженні в піч, Дж/кг.

Чим більш Δi , тим більша наступна теплова робота печі, тим тривалішим буде час теплової обробки $\tau_{тепл}$, тим нижча продуктивність печі.

Наприклад, при нагріванні холодних зливоків і заготовок перед обробкою тиском $\Delta i = 800 - 900$ кДж/кг (МДж/т), в мартенівської або дугової сталеплавильної печі $\Delta i = 1500 - 1900$ кДж/кг (МДж/т) рідкої сталі, в доменної печі $\Delta i = 10500 - 12500$ кДж/кг (МДж/т) рідкого чавуну.

Щоб зменшити витрату палива або електроенергії, потрібно прагнути до зменшення теплового дефіциту шляхом збереження ентальпії, отриманої матеріалом у попередньому металургійної переділі: рідкий чавун при виплавці сталі, гарячі зливки з рідкою серцевиною при нагріванні їх перед прокаткою і т.ін.

2.4. Види теплових втрат печі. Тепловий баланс

У пічної системі є два види втрат тепла: 1) втрати в робочому просторі печі - $M_{втрп}$ і 2) теплота, що виноситься з печі відхідними димовими газами $M_{відх}$.

Теплота в робочому просторі втрачається, по-перше, на нагрів футеровки, інакше кажучи акумулюється футеровкою, вона позначається $M_{ак.ф.}$; по-друге, проходить крізь футеровку завдяки теплопровідності, і втрачається в оточуюче середовище випромінюванням і конвекцією від розігрітої зовнішньої поверхні футеровки - $M_{вт.ф.}$; по-третє, теплота втрачається випромінюванням через відкриті вікна печі - $M_{вікн}$; по-четверте, витрачається на нагрів води, що охолоджує металеві елементи конструкції печі, які працюють при високій температурі - $M_{охл.в.}$. В цілому

$$M_{втрп} = M_{ак.ф.} + M_{вт.ф.} + M_{вікн} + M_{охл.в.} \quad (2.8)$$

У електропечах є один вид втрат - втрати в робочому просторі печі, тому для електропечей у формулі 2.3 $M_{вт} = M_{втрп}$.

Паливна піч, поряд з втратами в робочому просторі печі, має і другий вид втрат – з продуктами згоряння палива, що відходять з робочого простору - $M_{відх}$. Ці втрати складаються з фізичної теплоти гарячих газів $M_{відх.ф.}$ і можуть включати невикористану хімічну енергію палива внаслідок його недопалу в печі - $M_{хн}$.

Таким чином, для паливних печей $M_{вт} = M_{втрп} + M_{відх}$.

Тепловий баланс паливної печі буде таким

$$M_{заг} = M_{засв} + M_{втрп} + M_{відх} \quad (2.9)$$

Електричні печі в порівнянні з паливними повинні бути більш економічні за витратами теплової енергії, оскільки в них відсутні втрати тепла з відхідними газами. Однак не слід забувати, що при виробництві електроенергії на теплових електростанціях були свої теплові втрати, в тому числі з відхідними газами.

Теплота відхідних газів необов'язково повністю втрачається в атмосферу. У сучасних паливних печах частину теплоти димових газів використовують для підігріву повітря, а іноді і газоподібного палива, які направляються в пальники печі, тобто теплота димових газів частково повертається в робочий простір печі у вигляді фізичної теплоти повітря - $M_{ф.пов.}$ і палива - $M_{ф.пал.т.}$. Цей процес передачі теплоти диму повітрю або паливу відбувається в спеціальних пристроях (рекуператорах або регенераторах), які встановлюють в димових каналах між робочим простором печі і димовою трубою. Втрати теплоти з газами, що йдуть в атмосферу - $M_{відх.ат.}$, будуть меншими у порівнянні з втратами на виході з робочого простору $M_{відх}$, а саме

$$M_{відх.ат.} = M_{відх} - M_{ф.пов.} - M_{ф.пал.т.}$$

Тепловий баланс паливної печі остаточно буде мати вигляд

$$M_{\text{заг}} = M_{\text{засв}} + M_{\text{втрп}} + M_{\text{відх}} - M_{\text{ф.пов.}} - M_{\text{ф.пал.}} \quad (2.10)$$

У деяких печах, наприклад, в мартенівських і двованних, теплоту відхідних газів використовують для отримання водяної пари, для чого за печами встановлюють котли-утилізатори.

Втрати теплоти в робочому просторі печі також прагнуть зменшити насамперед шляхом застосування футеровки з кращими теплофізичними властивостями - з меншою теплоємністю і теплопровідністю.

Існують проекти так званих безінерційних печей, огороження яких відбиває назад в піч падаюче на нього з печі теплове випромінювання, тобто має властивість теплового дзеркала. Існують печі з випарним охолодженням, в яких вода у водоохолоджуючих елементах печі перетворюється на пару, що використовується в системах опалення приміщень. Запропоновані також схеми печей, в яких теплота, що пройшла через футеровку, передається повітрю, яке також може бути корисно використане.

Потоки теплоти в паливній печі схематично зображені на рис. 2.1

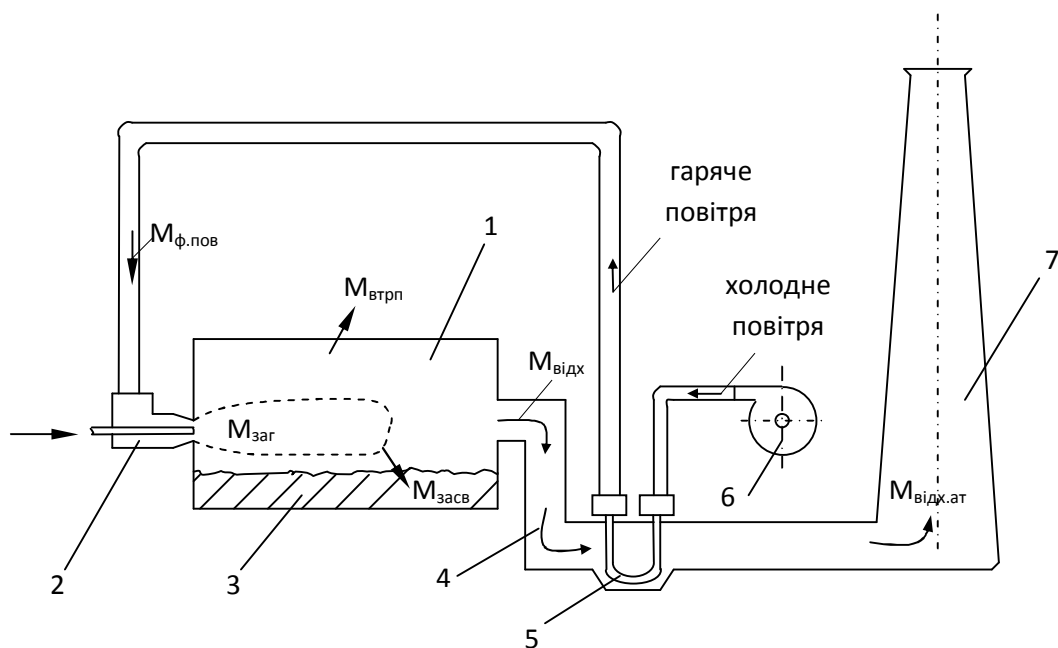


Рис. 2.1 - Потоки теплоти в паливній печі: 1 - робочий простір печі; 2 - пальник; 3 - нагріваний матеріал; 4 - димовий канал; 5 - утилізатор теплоти відхідних газів (рекуператор); 6 - вентилятор; 7 - димова труба

2.5. Показники теплової роботи печей

2.5.1. Продуктивність печі

Маса готової продукції, що видається з печі за одиницю часу, називається продуктивністю печі P (т/год, т/добу, т/рік, кг/с). Якщо ємність печі, тобто маса

матеріалів, що знаходяться в робочому просторі, дорівнює E (кг), а тривалість обробки матеріалів в печі (тривалість плавки або нагрівання металу) дорівнює τ (с), тоді

$$P = \frac{E}{\tau}. \quad (2.11)$$

Тривалість обробки матеріалів в печі τ включає в себе час теплотехнічного процесу печі $\tau_{\text{тепл}}$, необхідний для нагріву або плавлення, а також час технологічних операцій $\tau_{\text{техн}}$, якщо ці операції проводяться в робочому просторі печі, тобто $\tau = \tau_{\text{тепл}} + \tau_{\text{техн}}$. Якщо ж технологічний процес відбувається за межами печі (позапічна обробка рідкого металу в ковші, прокатка, кування, штампування), то $\tau = \tau_{\text{техн}}$.

Питома продуктивність печі показує, скільки продукції (кг) виходить з одиниці площі пода або з одиниці об'єму робочого простору за одиницю часу (кг/м²год); т/м³доба). Такий термін, як «напруженість поду» показує також питому продуктивність печі. Іноді, наприклад, при виплавці чавуну в доменній печі користуються зворотним показником - КВКО (коефіцієнт використання корисного об'єму), який показує, який корисний об'єм печі потрібний для виплавки 1 т чавуну на добу.

2.5.2. Витрати теплоти на одиницю продукції

Сутність енергозберігаючих заходів при експлуатації печей полягає в скороченні витрати енергії на одиницю продукції, який ми називаємо питомою витратою енергії "b". Щоб вирахувати "b" в печі безперервної дії, потрібно $M_{\text{заг}}$ розділити на продуктивність

$$b = \frac{M_{\text{заг}}}{P}, \text{ Дж/кг}. \quad (2.12)$$

Для печей циклічної дії

$$b = \frac{Q_{\text{заг}}}{E} = \frac{\overline{M}_{\text{заг}} \cdot \tau}{E} = \frac{\overline{M}_{\text{заг}}}{P}, \text{ оскільки } \frac{E}{\tau} = P,$$

де E - садка печі, тобто маса металу що знаходиться на подині печі; $Q_{\text{заг}}$ - кількість енергії, що витрачається на теплову обробку садки печі; $\overline{M}_{\text{заг}}$ - середня теплова потужність печі за час теплової обробки садки; τ - тривалість теплової обробки садки (час повного циклу обробки садки).

Нам відомо, що

$$M_{\text{заг}} = \frac{M_{\text{засв}}}{\eta_{\text{квт}}} + \frac{M_{\text{впрп}}}{\eta_{\text{квт}}} = \frac{P \cdot \Delta i}{\eta_{\text{квт}}} + \frac{M_{\text{впрп}}}{\eta_{\text{квт}}},$$

тому

$$b = \frac{M_{\text{заг}}}{P} = \frac{P \cdot \Delta i}{P \cdot \eta_{\text{квт}}} + \frac{M_{\text{впрп}}}{P \cdot \eta_{\text{квт}}} = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{квт}}} + \frac{M_{\text{впрп}}}{P}. \quad (2.13)$$

Отримана формула дає можливість проаналізувати шляхи зменшення питомої витрати енергії. Для печей циклічної дії формула для "b" запишеться аналогічно (8.2)

$$b = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{квт}}} + \frac{\overline{M}_{\text{хх}}}{P},$$

де $\overline{\eta}_{\text{квт}} = \frac{Q_n^p + L_n \cdot \bar{i}_{\text{пов}} + \bar{i}_{\text{пал}} - V_d \cdot \bar{i}_{\text{відх}} - q_{\text{нед}}}{Q_n^p}$ - КВТ, усереднений за час теплової обробки

садки; $\bar{i}_{\text{пов}}$, $\bar{i}_{\text{пал}}$, $\bar{i}_{\text{відх}}$ – усереднені значення питомої ентальпії підігрітого повітря, палива і газів за час теплової обробки садки; $\overline{M}_{\text{хх}}$ - тепла потужність холостого ходу печі, усереднена за час теплової обробки садки.

Формула 2.13 показує, що питома витрата енергії залежить від двох складових, що являють собою "прямі витрати енергії" на технологічний процес і "накладні витрати" на утримання печі в робочому стані.

Перша складова $\frac{\Delta i}{\eta_{\text{квт}}}$ являє собою прямі витрати енергії. Вони не залежать від продуктивності печі і цілком визначаються тепловим дефіцитом: чим менше теплової дефіцит, тим менше енергії потрібно на нагрівання матеріалів. Можливості зменшення Δi дуже великі: використання рідкого чавуну при виплавці сталі, гарячий посад зливків, ливарно-прокатні комплекси, "транзитна" прокатка, збагачення руд для отримання металу, зменшення кількості шлаку, попередній випал флюсів.

Друга складова $\frac{M_{\text{хх}}}{P}$ – "накладні витрати енергії" - залежить від продуктивності печі. Під час простою печі, коли $P = 0$, а $M_{\text{хх}} \neq 0$, питома витрата енергії прагне до нескінченності ($b \rightarrow \infty$). Чим більша продуктивність печі, тим менші "накладні витрати", якщо зростання P досягається зменшенням простоїв печі на холостому ході. Якщо ж зростання продуктивності відбувається за рахунок збільшення загальної теплової потужності, то питома витрата палива скорочується до тих пір, поки в дробу $b = \frac{M_{\text{заг}}}{P}$ продуктивність (знаменник) зростає швидше, ніж потужність (чисельник).

Однак при збільшенні $M_{\text{заг}}$ зростання продуктивності поступово згасає (див. рис. 2.2), тому що з підвищенням потужності збільшується температура пічних газів і, отже, зростають втрати $M_{\text{втрп}}$, які пропорційні температурі пічних газів і зменшується $\eta_{\text{квт}}$. Це означає, що при деякій критичній (оптимальній) продуктивності зростання потужності холостого ходу $M_{\text{хх}} = \frac{M_{\text{втрп}}}{\eta_{\text{квт}}}$ перевищує приріст продуктивності печі і відбувається збільшення питомої витрати енергії. Щоб мінімізувати "b", потрібно експлуатувати піч при оптимальній продуктивності і відповідній оптимальній тепловій потужності.

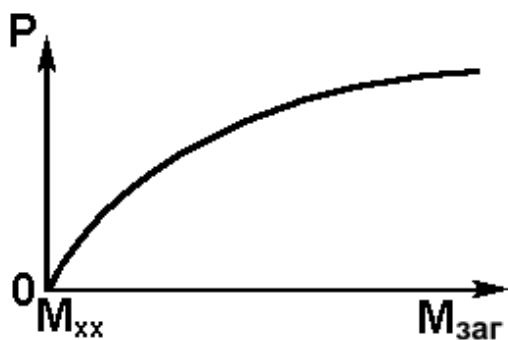


Рис. 2.2 - Залежність продуктивності печі від її теплової потужності

Формула 2.13 показує також, що скорочення $M_{втрп}$ і підвищення $\eta_{квт}$ однозначно призводять до зниження питомої витрати енергії. Зниження втрат теплоти в робочому просторі досягається шляхом виготовлення теплової ізоляції з сучасних волокнистих виробів. Поверхні водоохолоджуючих балок і труб ізолюються легкими волокнистими мулітокремнеземними виробами з оболонкою з вогнетривкого бетону.

Особливо ефективним є застосування шамотних волокнистих плит для футерування термічних печей циклічної дії, оскільки при регулярно повторюючомуся розігріві печі на початку кожного циклу зменшуються втрати теплоти, яку поглинає (акумулює) футеровка. Так, заміна шамотної футеровки на волокнисту в гартівній печі з викатним подом площею 14 м^2 зменшує витрату природного газу, яким опалюється ця піч, на 43%.

У паливних печах істотну економію енергії можна отримати шляхом підвищення коефіцієнта використання теплоти КВТ.

2.5.3. Засвоєна тепла потужність і ККД печі

Знаючи продуктивність печі P і теплової дефіцит Δi , можна знайти засвоєну потужність, тобто кількість теплоти, поглиненої матеріалами в печі за одиницю часу $M_{засв} = P \cdot \Delta i$, Вт.

Відношення засвоєної теплової потужності $M_{засв}$ до загальної потужності, споживаної піччю $M_{заг}$, називають коефіцієнтом корисної дії печі (ККД) $\eta_{ккд} = \frac{M_{засв}}{M_{заг}}$.

При цьому не враховуються витрати електроенергії на привід механізмів, що обслуговують піч: вентиляторів, димососів, завантажувальних і транспортувальних пристроїв. Тому $\eta_{ккд}$ показує тільки ступінь корисного використання енергії в робочому просторі агрегату. При економічній оцінці різних печей необхідно враховувати всі витрати енергії на їх експлуатацію.

Величина ККД коливається в широких межах. Найбільш низький цей показник в печах, в яких доводиться витримувати нагрітий чи розплавлений метал для здійснення технологічних процесів протягом тривалого часу. Наприклад, в

термічних печах ККД може бути на рівні 8-10%, а в сучасних нагрівальних печах він може становити 50-85%.

2.6. Укладання теплових балансів печей, особливості запису для печей безперервної і періодичної дії

Суть теплового балансу печі полягає у зіставленні статей приходу теплоти в піч зі статтями витрат. За законом збереження енергії прихід теплоти повинен бути дорівнює витраті. Можлива деяка нев'язка в балансі (~1 %), зобов'язана неточності арифметичних розрахунків. В печах з безперервною видачею продукції тепловий баланс печі складають за одиницю часу. У печах з циклічною роботою баланс відносять до тривалості циклу.

Після визначення статей теплового балансу сума прибуткових статей вираховується із суми видаткових. Встановлюється нев'язка в балансі, яка служить перевіркою точності укладання балансу. Всі статті приходу і витрат виражаються як в одиницях енергії (Дж), так і у відсотках від суми. Часто всі статті балансу розраховують на одиницю продукції (Дж/кг), що дає можливість порівнювати між собою абсолютні величини статей балансу в печах різної продуктивності.

2.7. Заміна в печі одного палива іншим

Перехід від одного палива до іншого вимагає перевірного розрахунку: необхідно з'ясувати, чи може нове паливо розвинути в печі необхідну робочу температуру і забезпечити існуючу продуктивність і що треба зробити для цього. Якщо продуктивність печі – P (кг/с), то теплота, засвоєна технологічним процесом за одиницю часу, буде $M_{засв} = P \cdot \Delta i$ (Вт), де Δi (Дж/кг) – питомий тепловий дефіцит на одиницю продукції.

Якщо теплові втрати робочої камери були $M_{втрп}$ (Вт), то загальна кількість робочої теплоти, що залишається в печі першим паливом буде $M_{засв} + M_{втрп} = P \cdot \Delta i + M_{втрп}$. При будь-якому іншому паливі бажано виконати цю роботу печі за одиницю часу, тобто зберегти продуктивність печі. При першому паливі, КВТ якого $\eta_{квт1}$ потрібно розвинути загальну теплову потужність печі $M_{общ1}$.

$$M_{заг1} = \frac{M_{засв} + M_{втрп}}{\eta_{квт1}} = \frac{P \cdot \Delta i + M_{втрп}}{\eta_{квт1}}$$

При другому паливі

$$M_{заг2} = \frac{M_{засв} + M_{втрп}}{\eta_{квт2}} = \frac{P \cdot \Delta i + M_{втрп}}{\eta_{квт2}}$$

Оскільки $P \cdot \Delta i + M_{втрн} = \text{const}$, то $M_{заг1} \cdot \eta_{квм1} = M_{заг2} \cdot \eta_{квм2}$. Таким чином, якщо відома загальна теплова потужність печі і КВТ для першого палива, то необхідна теплова потужність печі для другого палива визначається просто:

$$M_{заг2} = \frac{M_{заг1} \cdot \eta_{квм1}}{\eta_{квм2}} = \frac{B_1 \cdot Q_{н1}^p \cdot \eta_{квм1}}{\eta_{квм2}} = B_2 \cdot Q_{н2}^p$$

де: $M_{заг1} \cdot \eta_{квм1}$ – робоча теплота, що залишається в печі першим паливом; $Q_{н1}^p$ – теплота згоряння першого палива, Дж/м³ (Дж/кг); B_1 – витрата першого палива, м³/с (кг/с); $Q_{н2}^p$, B_2 – те ж саме для другого палива.

Слід особливо відзначити, що при переході від одного палива до іншого змінюється не тільки теплота згоряння палива Q_n^p , але також умови горіння і теплопередачі, тобто характеристика факела, який може подовжуватися або скорочуватися, робитися прозорим або світитися, змінюється склад продуктів горіння (CO₂, H₂O), а, отже, і ступінь їх чорноти – $\epsilon_{газ}$. Все це викличе зміну кінцевої температури продуктів горіння, які покидають робочий простір в печі, тобто $t_{д1} \neq t_{д2}$. Ця обставина позначиться на величині КВТ – $\eta_{квм2}$, а через нього і на загальній тепловій потужності $M_{заг2}$.

Якщо ми хочемо зберегти значення кінцевої температури диму $t_{д1} = t_{д2} = \text{const}$, то внаслідок зміни ступеня чорноти газів ($\epsilon_{газ}$) зміниться інтенсивність теплопередачі (величина теплового потоку) до нагріваємих матеріалів, тобто зміниться продуктивність печі $M_{засв} = q_2 \cdot F_n = P_2 \cdot \Delta i$.

При заміні одного палива іншим можна поставити більш складні вимоги: а) зберегти продуктивність печі без зміни: $P = \text{const}$; б) зберегти $t_d = \text{const}$. Щоб виконати обидві ці умови, необхідно змінити поверхню нагріву матеріалів F_n і змінити ємність печі E . Це означає, що піч підлягає реконструкції. Заміна палива викликає також змінювання аеродинаміки печі, внаслідок зміни витрат газу, повітря і виходу продуктів горіння.

3. АЕРОДИНАМІКА ТА ЗОВНІШНІЙ ТЕПЛООБМІН У ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ.

3.1. Особливості руху газів в печах

Сучасні печі являють собою складні конструкції, причому у певних частинах печей можливі різні газодинамічні режими. Механіка газів має особливе значення в робочих камерах печей, тому що вона суттєво впливає на протікання процесів згоряння та теплообміну.

Рух газів може бути вимушеним, обумовлений дією вентиляторів, струминних апаратів і природним – за рахунок різниці об'ємної густини.

Існує декілька різновидів руху газів у робочому просторі печей: каналний, струминний, фільтраційний та циклонний.

Канальний рух в робочому просторі має місце в печах з витягнутим робочим простором, коли гази рухаються суцільними потоками і швидкість їх в різних точках однаково спрямована. В робочому просторі сучасних печей цей вид руху зустрічається рідко.

Струминний рух. У більшості сучасних полум'яних печей рух газів відбувається під динамічним впливом струменів-факелів, що створюються пальниковими пристроями. Гази рухаються струменями в середовищі менш рухомих і застійних газів. Тому в робочому об'ємі печі знаходиться одна або декілька проточних зон і циркуляційні зони.

В різних місцях об'єму такої камери швидкості W різні по величині і навіть можуть бути різно направлені. Статичний тиск газів у різних місцях об'єму камери також різний і утворюється із 3-х складових:

$$P(x, y, z) = P_V + P_T + P_C,$$

де P_V — тиск, що утворюється зовнішніми факторами, наприклад, пристроями для видалення продуктів згоряння (димова труба, димосос), зовнішньою атмосферою і т.п. По закону Паскаля P_V однаково поширює свій вплив на всі точки об'єму робочого простору печі і тому називається «рівнем тиску».

P_T — тиск, що утворюється геометричним напором і залежить в основному від температури t , а також від фізичних властивостей газів. $P_T = f(x, y, z, t)$. Якщо t і фізичні властивості середовища, що заповнює робочий простір печі, не відрізняються від атмосферних, то $P_T = 0$.

P_C — тиск, що утворюється внаслідок динаміки газів. Залежить в основному від розподілу швидкостей W газів в робочому просторі:

$$P_C = f(x, y, z, W).$$

Таким чином, на статичний тиск у робочому просторі печі впливає величина тяги, ступінь відкриття робочих вікон, присутність щілин і тріщин у кладці, а також розташування факелів.

Нульовою називають поверхню, що розподіляє області позитивного (+) і від'ємного (–) манометричних тисків. Нульова поверхня повинна бути на подині.

Що ж стосується тиску на стіни, то в основному він буде позитивним (+): пічні гази будуть проникати крізь шви і тріщини в атмосферу. Тому ущільнення стін і склепіння печі має дуже велике значення.

При рухові струменя вздовж стіни зменшується поверхня стикання струменя з оточуючим середовищем. Це веде до зменшення приєднуємої маси струменя і її гальмуючої дії. Збільшення дальності струменя при її русі вздовж стінки названо Грум-Гржимайлом «настильність» струменя.

Частина робочого простору, яка прилягає до початкової частини струменя при цьому знаходиться під ежектуючим впливом струменя і може виявитися під розрідженням. Стінки, що прилягають до подальших ділянок, можуть виявитись під позитивним (+) тиском. Якщо струмінь рухається паралельно стіні, то розподіл тисків по ній такий же, як в струмені; якщо струмінь б'є в стінку, то в місці удару його динамічний тиск переходить в статичний і може бути досить значним. В містах повороту потоку під дією відцентрованих сил тиск P в кутах кладки стін також збільшується.

Нерівномірність температур у робочому просторі печі можливо значно зменшити, якщо забезпечити в печі рециркуляцію газів. Чим більше до гарячих газів підмішується відхідних газів з робочої камери, тим більш рівномірною температура в цій камері.

Фільтраційний рух має місце в так званих шарових та шахтних печах. Гази проходять крізь відносно нерухомий шар кускового і зернистого сипучого матеріалу, віддаючи йому тепло або нагріваючись. Рівномірність розподілу газів по шару залежить від опору окремих його ділянок і тим краща, чим більш рівномірні за розмірами куски (зерна) сипучого матеріалу.

При збільшенні швидкості W газів до певної межі щільний шар починає втрачати свою стійкість. При цьому найбільш дрібні складові матеріалу шару починають викидатись (видуватись) із нього. Межа стійкості шару може бути визначена на основі наступних міркувань.

У момент відриву частинки необхідна сила F повинна дорівнювати сумі відносної ваги і сили інерції частинки.

$$F = (m_M - m_\Gamma)g + m_M \frac{d^2 H}{d\tau^2},$$

де m_M і m_Γ — відповідно маса частинки матеріалу і газу в об'ємі частинки;

dH — елементарне переміщення частинки за час $d\tau$.

Сила опору частинки буде дорівнювати:

$$F = k \frac{W_\Gamma^2 \rho_\Gamma}{2} \cdot F_M,$$

де F_M — міделевий переріз частинки, м^2 .

Порівнюючи обидва ці вирази і враховуючи, що для межі стійкості $\frac{d^2 H}{d\tau^2} = 0$,

здобудемо рівняння для гранично допустимої швидкості W_Γ газу в шарі:

$$W_{\Gamma} = \sqrt{\frac{2g(m_M - m_{\Gamma})}{k \cdot \rho_{\Gamma} \cdot F_M}} \text{ (м/сек).}$$

При збільшенні W_{Γ} зверх гранично допустимої настає становище при якому усі частинки шару втрачають стійкість, відстань між ними збільшується в об'ємі, а частинки в ньому енергійно перемішуються. Внаслідок неправильності геометричної форми окремих кусочків і нерівномірності поля швидкостей аеродинамічний тиск, що діє на них, нерівномірний. Це забезпечує при прямоточному продуванні шару потоком газів складний обертально-пульсуючий рух частинок, який і викликає враження киплячої рідини.

Різновидом киплячого шару є фонтануючий шар. Його отримують в конічних і конічно-циліндричних апаратах з достатньо великим кутом у вершині корпусу.

Газ зосередженим струменем подається лише в центральну частину конуса. Швидкість струменя висока і він захоплює з собою знизу вверху тверді частинки, які фонтаном піднімаються у розширену частину апарата. Внаслідок розширення струменя його швидкість знижується, частинки відкидаються до периферії. В периферійній зоні швидкість потоку газу мала, тому тут тверді частинки опускаються вниз і в нижній вузькій частині апарата знову попадають у центральний фонтан.

При подальшому збільшенні швидкості газу W_{Γ} всі частинки шару переходять у завислий стан і рух газів проходить по законам руху двофазних середовищ.

Циклонний рух. У циклонах, маючих циліндричну форму, газам, які несуть завись подрібненого матеріалу, надається обертальний рух з метою використання відцентрового ефекту для сепарації частинок, а також інтенсифікації тепло- і масообміну між гарячими газами і зависсю. Обертання потоку забезпечується тангенціальним вводом газів з великою швидкістю.

Висока інтенсивність тепло- і масообміну робить застосування циклонного принципу перспективним не тільки в енергетиці, а і в технологічних апаратах, особливо призначених для плавки металів і випалювання матеріалів.

3.2. Теоретичні основи тяги димової труби

Під тягою димової труби розуміють різницю тисків усередині і зовні у основи димової труби.

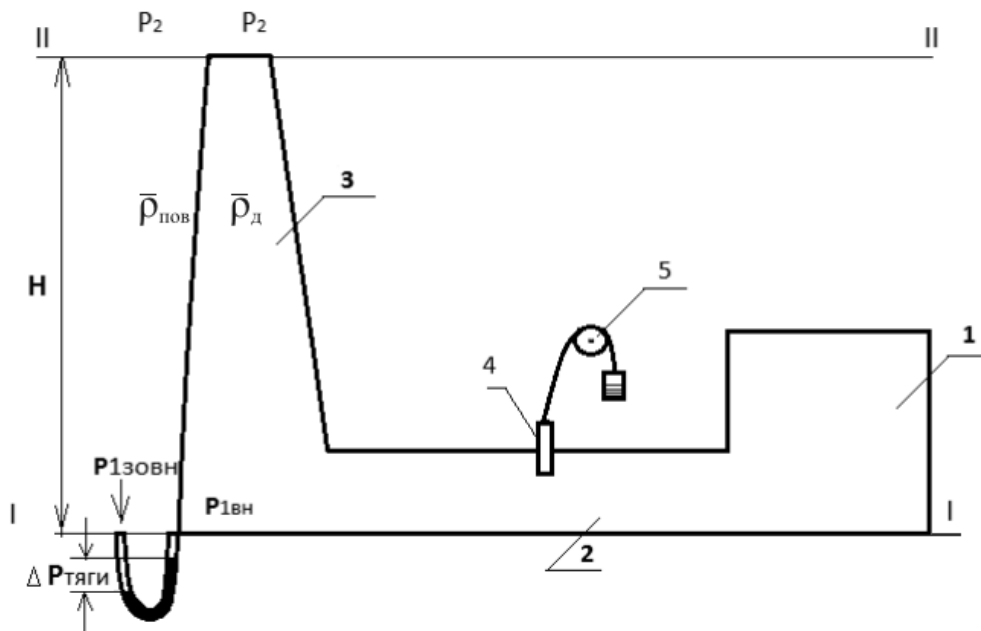


Рис 3.1 - Схема димового тракту печі

1 – піч, 2 – лежак; 3 – димова труба; 4 – димовий шибер;
5 – блок з контрвагою (противагою)

Припустимо, що шибер миттєво закрили і рух газів в трубі припинився. Знаючи, що $\rho_{\text{пов}} > \rho_{\text{д}}$ та нехтуючи впливом тиску на густину повітря та диму, розглядатимемо повітря та димові гази як нестисливу рідину. Тоді статичні тиски усередині і зовні димової труби у її основи (переріз I-I) визначатимуться рівняннями:

$$P_{1\text{вн}} = P_2 + H \bar{\rho}_{\text{д}} g, \text{ (Па)} \quad (3.1)$$

$$P_{1\text{зовн}} = P_2 + H \bar{\rho}_{\text{пов}} g, \text{ (Па)} \quad (3.2)$$

де P_2 – тиск димових газів і повітря в перерізі II-II, який дорівнює атмосферному тиску на рівні гирла димової труби ($P_{2\text{пов}} = P_{2\text{д}}$, сполучені судини), Па;
 $\bar{\rho}_{\text{д}}$ – густина димових газів при середній температурі диму в димовій трубі $\bar{t}_{\text{д}}$, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

$$\text{Відповідно } \Delta P_{\text{тяги}} = P_{1\text{зовн}} - P_{1\text{вн}} = Hg(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_{\text{д}}) \quad (3.3)$$

Вираз (1) показує теоретичну тягу димової труби $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{теор}}$, тобто максимальне розрідження, що утворюється у основи димової труби в статиці (при відсутності руху газів).

Якщо ввести поправку на барометричний тиск, рівняння (1) можна переписати так :

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{теор}} = Hg(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_d) \frac{B}{101,32}, \text{ Па} \quad (3.4)$$

де B – барометричний тиск, мінімальний для даної місцевості, кПа
 $101,32 \text{ кПа} = 760 \text{ мм рт. ст.}$

Згідно з законом Гей-Люссака

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t}, \text{ кг/м}^3$$

де ρ_0 – густина газу за нормальних умов ($P = 760 \text{ мм рт.ст.}; t = 0^\circ\text{C}$), кг/м^3 ;

t – температура газових середовищ, $^\circ\text{C}$;

$\alpha = 1/273$ – коефіцієнт теплового розширення газу, $1/^\circ\text{C}$.

З урахування закону Гей-Люссака рівняння (2) приймає вигляд:

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{теор}} = Hg \left(\frac{\rho_{0 \text{ пов}}}{1 + \alpha \bar{t}_{\text{пов}}} - \frac{\rho_{0 \text{ д}}}{1 + \alpha \bar{t}_d} \right) \frac{B}{101,32} \quad (3.5)$$

Тобто $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{теор}}$ залежить в основному від висоти труби H , та температури відпрацьованих газів і навколишнього повітря.

Розглянемо роботу димової труби в динаміці, тобто при відкритому димовому шибері. Для цього запишемо рівняння Бернуллі для перерізів I-I і II-II

$$P_{1\text{вн}} + \frac{W_1^2 \cdot \rho_{д1}}{2} = P_2 + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{д2}}{2} + H\bar{\rho}_d g + \Delta P_{\text{вт}}, \text{ Па} \quad (3.6)$$

де $\Delta P_{\text{вт}}$ – втрати на подолання опорів в самій трубі, Па.

$$\text{Звідки } P_{1\text{вн}} = P_2 + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{д2}}{2} - \frac{W_1^2 \cdot \rho_{д1}}{2} + H\bar{\rho}_d g + \Delta P_{\text{вт}}$$

Тоді дійсне розрідження створене трубою

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}} = P_{1\text{зовн}} - P_{1\text{вн}} = P_2 + H\bar{\rho}_{\text{пов}} g - P_2 + \frac{W_1^2 \cdot \rho_{д1}}{2} - \frac{W_2^2 \cdot \rho_{д2}}{2} - H\bar{\rho}_d g - \Delta P_{\text{вт}} = Hg(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_d) - \left(\frac{W_2^2 \cdot \rho_{д2}}{2} - \frac{W_1^2 \cdot \rho_{д1}}{2} \right) - \Delta P_{\text{вт}}, \text{ Па} \quad (3.7)$$

Звичайно $W_2 > W_1$. Ця складова являє собою втрати тиску на звужування потоку (на приріст динамічного тиску в гирлі труби $\Delta P_{\text{дин}}$ витрачається певна частка тяги димової труби);

$\Delta P_{\text{вт}}$ – являє собою втрати тиску на тертя в трубі, що визначається за формулою:

$$\Delta P_{\text{вт тертя}} = \lambda \cdot \frac{H}{d} \cdot \bar{P}_{\text{дин}} = \lambda \frac{H}{d} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{W_1^2 \cdot \rho_{д1}}{2} + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{д2}}{2} \right), \text{ Па} \quad (3.8)$$

де λ – гідравлічний коефіцієнт тертя газів в трубі;

d – середній діаметр труби, м;

$\bar{P}_{\text{дин}}$ – середнє значення динамічного тиску в трубі, Па.

Таким чином ефективна тяга димової труби $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}}$ менша теоретичної $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{теор}}$ на величину втрат тиску на подолання опорів в самій димовій трубі і з урахуванням поправки на барометричний тиск визначається за рівнянням, Па :

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}} = Hg(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_{\text{д}}) \frac{B}{101.32} - \left(\frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} - \frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} \right) - \lambda \frac{H}{2\bar{d}} \left(\frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} \right) \quad (3.9)$$

Якщо ж дійсні густину і швидкості газів виразити через приведені до нормальних умов, вираз (4) у розгорнутому вигляді буде таким :

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}} = Hg \left(\frac{\rho_{0\text{пов}}}{1+\alpha \bar{t}_{\text{пов}}} - \frac{\rho_{0\text{д}}}{1+\alpha \bar{t}_{\text{д}}} \right) \frac{B}{101.32} - \rho_{0\text{д}} \left[\frac{W_{02}^2}{2} \cdot (1 + \alpha t_{\text{д2}}) - \frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д1}}) \right] - \lambda \frac{H}{2\bar{d}} \cdot \rho_{0\text{д}} \left[\frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д1}}) + \frac{W_{02}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д2}}) \right], \text{ Па} \quad (3.10)$$

де $t_{\text{д1}}$ і $t_{\text{д2}}$ – відповідно температура димових газів у основі і гирлі димової труби, °C;

W_{01} і W_{02} – відповідно приведена швидкість димових газів у основі і гирлі димової труби, м/с.

3.3. Вибір висоти димової труби

Для більшості конструкцій полумених печей ефективна тяга димової труби $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}}$ витрачається на подолання аеродинамічних опорів на ділянці «піч – труба», тобто

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}} = \Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}}$$

Вважається, що в межах робочого простору печі димові гази рухаються за рахунок кінетичної енергії факелів газових пальників або форсунок.

При проектуванні приймають, що $\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}}$ повинно бути більшим $\Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}}$ на величину коефіцієнта запису k_3 , тобто

$$\Delta P_{\text{тяги}}^{\text{еф}} = k_3 \Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}} \quad (3.11)$$

Коефіцієнт запасу по тязі k_3 повинен розраховуватись на відшкодування збільшення втрат тиску при заносах димових каналів пилом та шлаком, застосуванні форсованих теплових режимів з відповідним збільшенням теплової потужності, підсосах холодного повітря через нещільності димового тракту.

Таким чином

$$k_3 \Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}} = Hg(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_{\text{д}}) \frac{B}{101.32} - \left(\frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} - \frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} \right) - \lambda \frac{H}{2\bar{d}} \times \left(\frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} \right); \quad (3.12)$$

Звідки

$$H = \frac{k_3 \Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}} + \left(\frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} - \frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} \right)}{g(\bar{\rho}_{\text{пов}} - \bar{\rho}_{\text{д}}) \frac{B}{101.32} - \frac{\lambda}{2\bar{d}} \left(\frac{W_1^2 \cdot \rho_{\text{д1}}}{2} + \frac{W_2^2 \cdot \rho_{\text{д2}}}{2} \right)} = \frac{k_3 \Sigma \Delta P_{\text{піч-труба}}^{\text{вт}} + \rho_{0\text{д}} \left[\frac{W_{02}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д2}}) - \frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д1}}) \right]}{g \left(\frac{\rho_{0\text{пов}}}{1+\alpha \bar{t}_{\text{пов}}} - \frac{\rho_{0\text{д}}}{1+\alpha \bar{t}_{\text{д}}} \right) \frac{B}{101.32} - \frac{\lambda}{2\bar{d}} \cdot \rho_{0\text{д}} \left[\frac{W_{01}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д1}}) + \frac{W_{02}^2}{2} (1 + \alpha t_{\text{д2}}) \right]} \quad (3.13)$$

Н визначається методом ітерацій (через відсутність даних $t_{\text{пов}}$; $t_{\text{д}}$; d ; W_{O_2}).

Перший раз виходячи з величини потрібної тяги і температури відхідних газів у основи димової труби попередньо визначають орієнтовну висоту Н за допомогою графіків.

Потім уточнюють середню температуру повітря $\bar{t}_{\text{пов}}$ і диму $\bar{t}_{\text{д}}$ по висоті труби і уточнюють значення Н.

Середню температуру повітря $\bar{t}_{\text{пов}}$ по висоті труби визначають за емпіричною формулою

$$\bar{t}_{\text{пов}} = t'_{\text{пов}} - \frac{\sqrt{H}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

де $t'_{\text{пов}}$ – температура повітря у основи димової труби, $^\circ\text{C}$.

Середню температуру димових газів в трубі $\bar{t}_{\text{д}}$ визначають з урахуванням падіння температури 1-1,5 $^\circ\text{C}$ на 1 м висоти для цегляних і 3-4 $^\circ\text{C}$ для сталевих труб без футеровки.

Діаметр труби визначають, задаючись швидкістю при виході (в гирлі труби) W_{O_2} = 2-4 м/с, однак приймають не менш 800 мм (з конструктивних міркувань). Внутрішній діаметр у основи димової труби $d_{\text{осн}} = 1,5d_{\text{гирла}}$.

Після теплотехнічного розрахунку висоти димової труби для остаточного вибору Н необхідно враховувати наступні санітарні норми проектування промислових підприємств:

1. Висота заводських труб повинна бути більш 16м.
2. Якщо ж в радіусі 200 м від труби розташовані будівлі висотою більш 15 м, висота труби повинна бути не менш 45 м, незалежно від теплової потужності печі.
3. При розташуванні труб менш ніж за 100 м поблизу будівель Н її повинна бути вища від конька даху на 5-7 м.
4. Якщо продукти згоряння містять у збільшеній кількості шкідливі гази (SO_2 і ін.) висота труби повинна бути більш 100м.

Якщо одна труби обслуговує кілька печей, то її розраховують за найбільшим аеродинамічним опором, а не за сумою опорів димових трактів всіх печей. Кількість печей впливає на діаметр димової труби, оскільки в цьому разі збільшується об'єм продуктів згоряння, що проходять. Кількість агрегатів, що приєднується до однієї труби, визначається на основі аналізу вартості спорудження труб і лежаків (димових трактів).

3.4. Теплообмін випромінюванням між продуктами згоряння палива й обмежуючою їх поверхнею

3.4.1. Особливості випромінювання в напівпрозорих середовищах

Напівпрозорими вважаються середовища, здатні випускати, поглинати розсіювати електромагнітне випромінювання. Найбільше значення мають три їхні види - газові, запилені і світне полум'я.

Радіаційні властивості *газового середовища* визначають поглинальними характеристиками, що залежать від частоти випромінювання, стану газу і геометрії його об'єму. Промениста енергія тут зосереджена в декількох вузьких смугах частот електромагнітну коливань. Аналогічна картина спостерігається і при поглинанні газом зазначеної енергії. Тому таке випромінювання, як і поглинання, називають виборчим або селективним.

Число і положення смуг у спектрі обумовлюються природою газу, а ширина їх і розподіл інтенсивності випромінювання і поглинання за частотою в межах кожної з цих смуг залежать від температури і тиску газу, від довжини шляху променя в розглянутому середовищі.

Гази, що мають прості молекули (N_2 , H_2 і т.п.), а також одноатомні частки (наприклад, пари металів), поглинають променисту енергію в дуже невеликих інтервалах довжини хвилі, і в техніці вони вважаються променепрозорими.

При розрахунках металургійних печей і теплоенергетичних установок враховується тільки випромінювання деяких багатоатомних газів - вуглекислоти, водяної пари, аміаку, вуглеводнів та ін. Незапилені гази не мають здатність розсіювати і відбивати променистий потік.

Запилене, або *двохфазне*, - це середовище, де тверді або рідкі частки зважені в прозорому (випромінюючому) газі. їхні розміри набагато більше, ніж середня довжина хвиль теплового потоку. Прикладом тут можуть служити продукти згоряння твердого палива зі зваженими в них частками золи.

Світне полум'я — те ж напівпрозоре середовище, що являє собою потік випромінюючих газів із твердими частками сажі, що утворюються в процесі горіння і термічного розкладання вуглецевих палив. Характерною рисою такого середовища, як і запиленого, є здатність у значній мірі розсіювати минаючий через неї потік.

У результаті селективності випромінювання газами теплової енергії пропорційно його температурі в ступені, меншій, чим четверта, тобто воно слабкіше, ніж для сірих поверхонь. Застосування різних законів випромінювання для твердих і газоподібних тіл помітно ускладнює розрахунки. Тому в практиці прибігають також до закону Стефана - Больцмана, причому газ розглядається як сіре тіло зі ступенем чорноти ε_2 що характеризує його випромінювальну здатність

$$E_2 = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4 \quad (3.15)$$

яка (відповідно до закону Кірхгофа) пропорційна поглинальній здатності при термодинамічній рівновазі між газом і випромінюванням:

$$\varepsilon_2 = A(V) \quad (3.16)$$

Величину ступеня чорноти можна визначити, використовуючи рівняння для розрахунку енергії, поглиненої шаром газу (на підставі закону Бугера):

$$E_{\text{погл}} = E_n [1 - \exp(-K_2 S)] \quad (3.17)$$

де E_n - щільність початкової енергії потоку; K_z - коефіцієнт поглинання середовища; S - товщина шару газу.

З аналізу наведеного виразу випливає, що при $S = 0 \rightarrow E_{\text{погл}} = 0$, а при $S = \infty \rightarrow E_{\text{погл}} = E_n$, тобто випромінювання шару газу нескінченної товщини буде дорівнювати випромінюванню абсолютно чорного тіла. Тоді формула запишеться у вигляді

$$E_{\text{випр}} = E_0 [1 - \exp(-K_z S)] \quad (3.18)$$

Відношення $E_{\text{випр}}/E_0$ являє собою ступінь чорноти

$$\varepsilon_z = \frac{E_{\text{випр}}}{E_0} = [1 - \exp(-K_z S)] \quad (3.19)$$

Якщо обсяги мають довільну конфігурацію значення ε_z зростають або зменшуються при зміні напрямку, тому що підвищується або скорочується величина S . Тому їх прийнято розраховувати таким чином:

$$\varepsilon_z = 1 - \exp(-K_z l_{\text{еф}}) \quad (3.20)$$

Тут $l_{\text{еф}}$ - деяка ефективна довжина променя в газових об'ємах даної конфігурації, для розрахунку випромінювання яких (на всю оточуючу поверхню) вона з достатньою точністю виражається наближеним співвідношенням

$$l_{\text{еф}} = 3,6 \frac{V}{F} \quad (3.21)$$

де V - об'єм випромінюючої порожнини; F - поверхня, яка обмежує цю порожнину.

Величину коефіцієнта поглинання продуктів спалювання при повному перемішуванні газоподібних палива й окислювача можна відшукати за формулою

$$K_z = \left(\frac{0,78 + 1,6r_{H_2O}}{\sqrt{p_n l_{\text{еф}}}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_z}{1000} \right) r_n \quad (3.22)$$

Тут T_z - температура потоків, що ідуть із камери; $p_n = Pr_n$ - сумарний парціальний тиск трьохатомних газів $r_n = r_{H_2O} + r_{CO_2}$ об'ємна їхня частка.

При світлому полум'ї промені додатково послабляються часткам сажі, отже,

$$K_{св} = K_z + K_c = K_z + 0,03(2 - \alpha_T) \left(1,6 \frac{T_z}{1000} - 0,5 \right) \frac{C^P}{H^P} \quad (3.23)$$

а при запиленому - включеннями золи і коксу, тобто

$$K_{зан} = K_z + K_{зол} + K_{кокс} = K_z + \frac{4300 \rho_z \mu_{зол}}{\sqrt[3]{T_z^2 d_{зол}^2}} + K_{кокс}, \quad (3.24)$$

де K_c , $K_{зол}$, $K_{кокс}$ - коефіцієнти послаблення променистого потоку частками сажі, золи і коксу (залежно від роду палива і способу його спалюване $K_{кокс} = 0,02 - 0,10$); α_T , - коефіцієнт надлишку повітря в камері; C^P , H^P вміст вуглецю і водню в паливі; $\mu_{зол}$, $d_{зол}$ - концентрація золових частинок та їхній середній діаметр.

У практиці розрахунків значень ε_z користуються графіками $\varepsilon_{CO_2} = f(pl_{ef}, t_z)$ і $\varepsilon_{H_2O}^V = \psi(pl_{ef}, t_z)$, за допомогою яких знаходять значення ступеня чорноти вуглекислоти ε_{CO_2} і умовний ступінь чорноти водяних парів $\varepsilon_{H_2O}^V$. Помноживши останню на поправку β отримують дійсний ступінь ε_{H_2O} . - Величина ε_z , визначається підсумовуванням усіх складових:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}^V \quad (3.25)$$

Надалі будемо вважати, що середовище, що розділяє тіла, є однорідним й ізотермічним. Прийнемо також, що закон Кірхгофа приблизно виконується і при відсутності термодинамічної рівноваги між газом і випромінюванням, тому $A_z = \varepsilon_z$.

3.4.2. Променистий теплообмін між газом і оболонкою

Даний випадок має практичне значення при розрахунках теплообміну, наприклад, між факелом і екрановою стінкою, високотемпературними продуктами спалювання палива і каналами, за якими вони рухаються.

Нехай є об'єм газового середовища, обмежений ізотермічною сірою поверхнею (рис. 3.2), і температура газу T_z , вище, ніж стінки T_{cm} . Визначимо результуюче випромінювання $Q_{p.cm}$ для поверхні цієї стінки F_{cm} .

Уявну поверхню (див. штрихову лінію на рис. 3.2) пронизують зустрічні теплові потоки стінки $Q_{ef.cm}$ і газу $Q_{ef,z}$. Отже можна записати, що

$$Q_{p.cm} = Q_{ef,z,cm} - Q_{ef.cm,z} = Q_{ef,z} \varphi_{z,cm} - Q_{ef,cm} \varphi_{cm,z} \quad (3.26)$$

Тут ($\varphi_{z,cm} = \varphi_{cm,z} = 1$, оскільки відбувається променистий теплообмін між двома умовно паралельними поверхнями. Тоді

$$Q_{p.cm} = Q_{ef.z} - Q_{ef.cm} \quad (3.27)$$

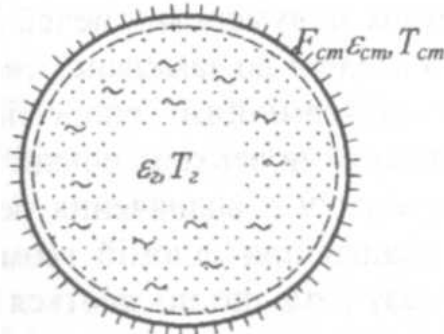


Рис. 3.2 - До розрахунку променистого теплообміну між газом і оболонкою

Відповідно значення $Q_{ef.z}$ і $Q_{ef.cm}$ обчислюють таким чином:

$$Q_{ef.z} = Q_{0z} + (1/\varepsilon_z - 1)Q_{p.z} \quad (3.28)$$

$$Q_{ef.cm} = Q_{0cm} + (1/\varepsilon_{cm} - 1)Q_{p.cm} \quad (3.29)$$

Підставляючи вираження (3.28) і (3.29) у рівняння (3.27) і беручи до уваги що $Q_{p.z} - Q_{p.cm} = 0$, маємо

$$Q_{p.cm} = \frac{Q_{0z} - Q_{0cm}}{1/\varepsilon_z + 1/\varepsilon_{cm} - 1} = \frac{(E_{0z} - E_{0cm})F_{cm}}{1/\varepsilon_z + 1/\varepsilon_{cm} - 1} = \frac{\sigma_0 [T_z^4 - T_{cm}^4] F_{cm}}{1/\varepsilon_z + 1/\varepsilon_{cm} - 1} \quad (3.30)$$

3.4.3. Радіаційний режим теплообміну в робочому просторі печей з напівпрозорою атмосферою, (у системі газ – кладка – матеріал)

У багатьох типах промислових печей основним джерелом тепла служать високотемпературні продукти згоряння палива. Зона технологічної обробки матеріалу відділена від навколишнього середовища кладкою, товщина і матеріали якої підбираються таким чином, щоб втрати тепла в навколишнє середовище були мінімальними. Звичайно їхня частка не перевищує 3-5% загальної теплової потужності печі.

Робочі камери багатьох полумєневих печей з погляду радіаційного теплообміну можуть бути зведені до замкнутої системи з двох тіл (кладка і матеріал, що

теплооброблюються), розподілених ізотермічним випромінюючим середовищем (димовими газами). Введемо такі позначки:

- індекс "к" для параметрів, що стосуються кладки;
- індекс "г" для параметрів, що стосуються димових газів;
- індекс "м" для параметрів нагріваємого матеріалу.

Приклади варіантів сполучення відповідних поверхонь (F_m , F_k) наведені на рисунку 3.3. При цьому різноманітні схеми взаємного розташування F_m , F_k , в залежності від сполучення кутових коефіцієнтів, можливо об'єднати в 3 групи:

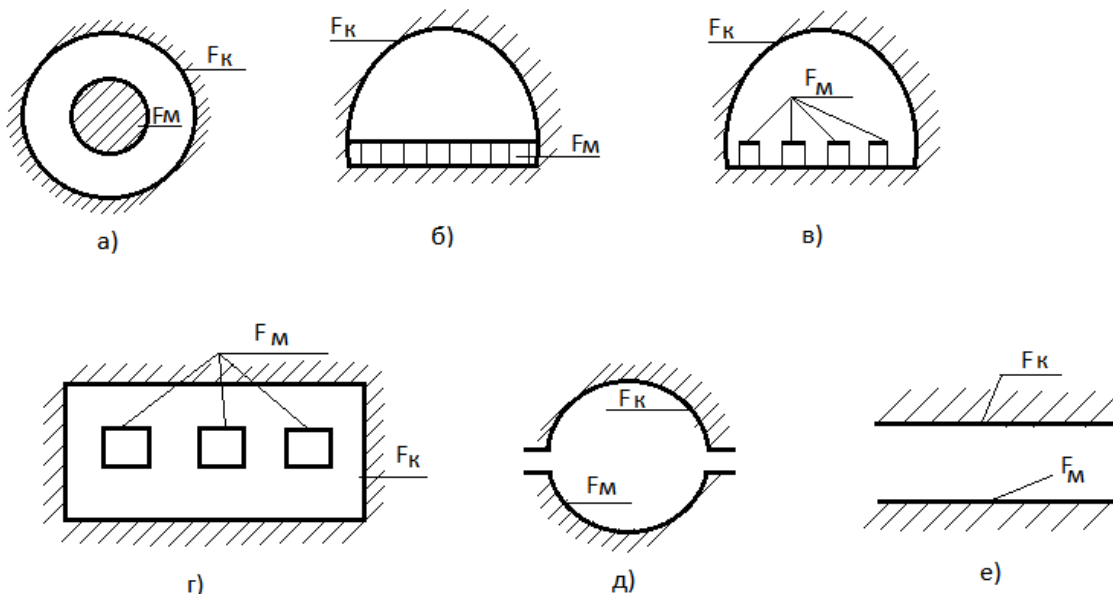


Рис. 3.3 - Приклади сполучення поверхонь кладки і матеріалу в робочих камерах печей

Перша група, ($\varphi_{mm} = 0$; $\varphi_{kk} \neq 0$; варіанти: а, б)

Друга група, ($\varphi_{mm} \neq 0$; $\varphi_{kk} \neq 0$; варіанти: в, г, д)

Третя група, ($\varphi_{mm} = 0$; $\varphi_{kk} = 0$; варіант е)

Рівняння радіаційного теплообміну, виведені для розглянутих випадків можуть застосовуватись при розрахунках і аналізі теплообміну в печах з плавним змінюванням температури газів по довжині робочої камери і порівняно малою нерівномірністю розподілу температур за перерізом газового потоку.

Розглянемо випадок радіаційного теплообміну в камері печі, схема якої наведена у варіанті б на рисунку 3.3. В даній печі між сірим газом (з температурою T_g і ступеню чорноти ε_g), сірою поверхнею кладки (F_k з T_k і ε_k) і сірою променесприймальною поверхнею оброблюваних в печі матеріалів (F_m з T_m і ε_m) здійснюється взаємний радіаційний теплообмін.

Метою розрахунку є визначення результуючого теплового потоку на матеріал $Q_{рез,м}$ і температури кладки T_k при відомій геометрії печі, а також при заданих значеннях температур для газу T_g і матеріалу T_m , що піддається технологічній обробці в камері.

Для спрощення розрахунку припустимо, що кладка печі являє собою ідеальну обмурівку, тобто вона абсолютно нетеплопровідна і нетеплоємна ($\lambda_k=0$; $c_k=0$ і $Q_{рез,к}=0$). Погіршність у даному випадку незначна, тому що втрати тепла через

кладку в навколишнє середовище компенсуються конвекцією від пічних газів до внутрішньої поверхні кладки ($Q_{\text{вт}} \approx Q_{\text{конв}}$)

Виведення рівняння для $Q_{\text{рез.м}}$ суттєво спрощується, якщо скористатися тим, що при $Q_{\text{рез.к}}=0$ величина ϵ_k не є чинником, який визначає радіаційний теплообмін в печі. В загальному випадку промені падаючі на кладку частково поглинаються, частково відбиваються. Внаслідок не теплоємності кладка миттєво розігрівається і починає випромінювати власні промені в кількості рівній кількості поглинених. Таким чином, повна інтенсивність вихідних від ідеальної обмурівки променів завжди дорівнює інтенсивності падаючих променів. Це дає можливість замість фактичної величини ϵ_k при виведенні рівняння ввести умовну величину $\epsilon_{k, \text{ум.}}=1$, що спрощує розрахунки.

Для визначення $Q_{\text{рез.м}}$ і T_k необхідно мати наступні два рівняння:

а) рівняння результуючого випромінювання поверхні нагріву

$$Q_{\text{рез.м}} = Q_{\text{Г-М}}^{\text{погл.}} + Q_{\text{К-М}}^{\text{погл.}} - Q_{\text{М}}^{\text{влас.}}, \text{ Вт} \quad (3.31)$$

б) рівняння результуючого випромінювання внутрішньої поверхні кладки

$$Q_{\text{рез.к}} = Q_{\text{Г-К}}^{\text{погл.}} + Q_{\text{Г-М-К}}^{\text{погл.}} + Q_{\text{М-К}}^{\text{погл.}} + Q_{\text{К-М-К}}^{\text{погл.}} + Q_{\text{К-К}}^{\text{погл.}} - Q_{\text{К}}^{\text{влас.}} = 0, \text{ Вт} \quad (3.32)$$

В рівнянні (3.31):

$Q_{\text{Г-М}}^{\text{погл.}}$ – випромінювання газу, поглинене поверхнею нагріву;

$$Q_{\text{Г-М}}^{\text{погл.}} = [\epsilon_{\text{Г}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{Г}}^4 \cdot F_{\text{М}}] \cdot \epsilon_{\text{М}}, \text{ Вт}; \quad (3.33)$$

$Q_{\text{К-М}}^{\text{погл.}}$ – випромінювання чорної кладки, що пройшли через газ і поглинулось поверхнею нагріву;

$$Q_{\text{К-М}}^{\text{погл.}} = [\sigma_0 \cdot T_{\text{кл}}^4 \cdot F_{\text{К}} \cdot \phi_{\text{К-М}}] \cdot (1 - \epsilon_{\text{Г}}) \cdot \epsilon_{\text{М}}, \text{ Вт} \quad (3.34)$$

$Q_{\text{М}}^{\text{влас.}}$ – власне випромінювання поверхні нагріву;

$$Q_{\text{М}}^{\text{влас.}} = \epsilon_{\text{М}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{М}}^4 \cdot F_{\text{М}}, \text{ Вт} \quad (3.35)$$

В рівнянні (3.32):

$Q_{\text{Г-К}}^{\text{погл.}}$ – випромінювання газу, поглинене чорною поверхнею кладки;

$$Q_{\text{Г-К}}^{\text{погл.}} = \epsilon_{\text{Г}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{Г}}^4 \cdot F_{\text{кл}}, \text{ Вт} \quad (3.36)$$

$Q_{\text{Г-М-К}}^{\text{погл.}}$ – відбите від поверхні нагріву випромінювання газу, що пройшло через газ і поглинулось чорною поверхнею кладки

$$Q_{\text{Г-М-К}}^{\text{погл.}} = (\epsilon_{\text{Г}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{Г}}^4 \cdot F_{\text{М}}) (1 - \epsilon_{\text{М}})(1 - \epsilon_{\text{Г}}), \text{ Вт} \quad (3.37)$$

$(1 - \epsilon_{\text{М}})$ – відбивна здатність,

$(1 - \epsilon_{\text{Г}})$ – пропускна здатність.

$Q_{\text{М-К}}^{\text{погл.}}$ – випромінювання поверхні нагріву, що пройшло через газ і поглинулось чорною поверхнею кладки;

$$Q_{\text{М-К}}^{\text{погл.}} = (\epsilon_{\text{М}} \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{М}}^4 \cdot F_{\text{М}}) (1 - \epsilon_{\text{Г}}), \text{ Вт} \quad (3.38)$$

$Q_{\text{К-М-К}}^{\text{погл.}}$ – відбите від поверхні нагріву випромінювання чорної кладки, що пройшло через газ і поглинулось поверхнею кладки

$$Q_{\text{К-М-К}}^{\text{погл.}} = [\sigma_0 \cdot T_{\text{кл}}^4 \cdot F_{\text{К}} \cdot \phi_{\text{К-М}}] \cdot (1 - \epsilon_{\text{Г}})(1 - \epsilon_{\text{М}})(1 - \epsilon_{\text{Г}}), \text{ Вт} \quad (3.39)$$

$Q_{\text{К-К}}^{\text{погл.}}$ – випромінювання кладки самої на себе, що пройшло через газ і поглинулось поверхнею кладки;

$$Q_{\text{К-К}}^{\text{погл.}} = [\sigma_0 \cdot T_{\text{кл}}^4 \cdot F_{\text{К}} \cdot \phi_{\text{К-К}}] \cdot (1 - \epsilon_{\text{Г}}), \text{ Вт} \quad (3.40)$$

$Q_{\text{К}}^{\text{влас.}}$ – власне випромінювання чорної кладки;

$$Q_{\text{К}}^{\text{влас.}} = \sigma_0 \cdot T_{\text{кл}}^4 \cdot F_{\text{К}}, \text{ Вт} \quad (3.41)$$

Сумісне рішення рівнянь (3.31) і (3.32) після деяких алгебраїчних перетворень, враховуючих співвідношення між кутовими коефіцієнтами, дозволяє отримати наступні формули для визначення $Q_{\text{рез.м}}$ і $T_{\text{кл}}$, в печах для першої групи ($\varphi_{\text{мм}} = 0$; $\varphi_{\text{кк}} \neq 0$)

$$Q_{\text{рез.м}} = \sigma_{\text{Г-К-М}} [(T_{\text{Г}}^4) - T_{\text{М}}^4] F_{\text{М}}, \text{ Вт} \quad (3.42)$$

$$T_{\text{К}}^4 = T_{\text{М}}^4 + (T_{\text{Г}}^4 - T_{\text{М}}^4) \cdot \frac{1}{1 + \frac{\varphi_{\text{КМ}} \cdot \varepsilon_{\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}})}{\varepsilon_{\text{Г}} [1 + \varphi_{\text{КМ}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}}) (1 - \varepsilon_{\text{М}})]}}, \text{ } ^\circ\text{К} \quad (3.43)$$

При цьому зведений коефіцієнт випромінювання системи газ-кладка-матеріал

$$\sigma_{\text{Г-К-М}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{Г-К-М}} = \sigma_0 \cdot \frac{\varepsilon_{\text{М}} \cdot \varepsilon_{\text{Г}} [1 + \varphi_{\text{КМ}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}})]}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{КМ}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}}) [1 - (1 - \varepsilon_{\text{Г}}) (1 - \varepsilon_{\text{М}})]}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \quad (3.44)$$

де $\varepsilon_{\text{Г-К-М}}$ – зведена ступінь чорноти системи газ – кладка – матеріал.

Рівняння (3.42)-(3.44) вперше були отримані В.Н. Тимофєєвим, який вирішував більш складну загальну задачу (при $Q_{\text{рез.к}} \neq 0$).

Для схем взаємного розташування поверхонь кладки і матеріалу, що належать до другої групи ($\varphi_{\text{мм}} \neq 0$; $\varphi_{\text{кк}} \neq 0$) зведена ступінь чорноти системи газ – кладка – матеріал визначається за рівнянням:

$$\varepsilon_{\text{Г-К-М}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{М}}}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{КМ}} \cdot \varepsilon_{\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}})} \quad (3.45)$$

$$T_{\text{кл}}^4 = T_{\text{М}}^4 + (T_{\text{Г}}^4 - T_{\text{М}}^4) \cdot \frac{\varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}} + \varphi_{\text{КМ}} \cdot \varepsilon_{\text{М}} (1 - \varepsilon_{\text{Г}})} \quad (3.46)$$

$$\text{Якщо ж } \varphi_{\text{мм}} = 0; \text{ і } \varphi_{\text{кк}} = 0, \text{ то } \varepsilon_{\text{Г-К-М}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г}} \cdot \varepsilon_{\text{М}} (2 - \varepsilon_{\text{Г}})}{1 - (1 - \varepsilon_{\text{Г}})^2 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{М}})} \quad (3.47)$$

Аналіз формул для визначення $Q_{\text{рез.м}}$ показує, що для інтенсифікації радіаційного теплообміну головне значення має $T_{\text{Г}}$.

Другим за значенням чинником є $\varepsilon_{\text{Г}}$, вплив якої особливо відчутний при малих значеннях $\varepsilon_{\text{Г}}$.

Третім чинником є ступінь розвитку кладки $\omega = F_{\text{к}}/F_{\text{м}} = 1/\varphi_{\text{км}}$.

Вплив ω збільшується при малих низьких значеннях $\varepsilon_{\text{Г}}$. Чим вище розташовано склепіння печі тим більша ω . Однак збільшення висоти склепіння дає ефект лише у тому випадку, якщо полум'я заповнює весь об'єм робочого простору печі. Надмірне збільшення висоти склепіння приводить до зростання теплових втрат і зайвих витрат на спорудження печі. Для існуючих конструкцій печей ω коливається в межах 2 – 3,5.

3.4.4. Температура печі і її зв'язок з температурами газів і кладки

У високотемпературних полумєневих печах матеріали сприймають тепло від первинного випромінювача – димових газів, і вторинного – кладки. Існує уявлення, що матеріали отримують цю суму від печі, тобто піч і є первинним джерелом тепла. Печі приписують властивості абсолютно чорного тіла як замкненому простору. Отже, під температурою печі розуміють температуру такого абсолютно чорного випромінювача, який здатний забезпечити такий же тепловий потік на матеріал, як димові гази і кладка разом. Температура печі $T_{\text{печі}}$ нижча температури первинного випромінювача $T_{\text{Г}}$, але більша температури кладки $T_{\text{К}}$. Оскільки $\varepsilon_{\text{Г}}$ мала, а $\varepsilon_{\text{К}}$ велика (0,8 – 0,9), то $T_{\text{печі}}$ більш близька до $T_{\text{К}}$.

Безперервне вимірювання високої температури газів в печах натрапляє на великі практичні труднощі і можливо лише епізодично за допомогою відсмоктувальної термопари. Отже всі розрахунки $Q_{рез.м}$ по $T_{г}$ залишаються без контролю при роботі печі. За таких умов важко виявити відповідає дійсний температурний режим роботи печі розрахунковому чи ні. Разом з тим для вимірювання високих температур широко застосовується радіаційні пірометри, які при відповідному розташуванні (необхідно щоб в поле зору телескопу пірометра не попадав нагріває мий матеріал) на основі дії сумарного радіаційного теплового потоку газів і кладки показують температуру еквівалентного по радіаційній теплопередачі абсолютно чорного випромінювача, тобто температуру печі $T_{печі}$.

Таким чином необхідно уміти визначати $Q_{рез.м}$ по $T_{печі}$.

Виходячи з того, що $Q_{рез.м}$ повинно залишатися тим самим, отримаємо співвідношення $Q_{рез.м} = Q_{гкм} = Q_{пч-м}$

У розгорнутому вигляді маємо:

$$Q_{рез.м} = \varepsilon_{г-к-м} \cdot \sigma_0 (T_{г}^4 - T_{м}^4) \cdot F_{м} = \varepsilon_{пч-м} \cdot \sigma_0 [T_{печі}^4 \cdot F_{печі} \cdot \varphi_{пч-м} - T_{м}^4 \cdot F_{м} \cdot \varphi_{м-пч}], \text{ Вт} \quad (3.48)$$

Для розрахунку теплообміну по температурі печі $T_{печі}$ цьому умовному джерелу тепла необхідно надати певні геометричні розміри, які визначатимуть поверхню випромінювання. Для спрощення уявлення будемо вважати, що абсолютно чорний випромінювач (під) своєю формою і розмірами відповідає внутрішній поверхні кладки, тобто $F_{печі} = F_{к}$.

Тоді, враховуючи, що $\varphi_{м-пч} = \varphi_{м-к}$ властивість взаємності кутових коефіцієнтів буде виглядати таким чином

$$F_{печі} \cdot \varphi_{пч-м} = F_{м} \cdot \varphi_{м-пч} = F_{м} \cdot \varphi_{м-к}. \quad (3.49)$$

Після підставки співвідношень (3.49) в рівняння (3.48) отримаємо:

$$Q_{рез.м} = \varepsilon_{г-к-м} \cdot \sigma_0 (T_{г}^4 - T_{м}^4) \cdot F_{м} = \varepsilon_{пч-м} \cdot \sigma_0 \cdot \varphi_{м-пч} [T_{печі}^4 - T_{м}^4] \cdot F_{м} \quad (3.50)$$

Звідки знаходимо зв'язок між $T_{печі}$ і $T_{г}$

$$T_{печі}^4 = T_{м}^4 + (T_{г}^4 - T_{м}^4) \cdot \frac{\varepsilon_{гкм}}{\varepsilon_{пч-м} \cdot \varphi_{м-пч}}, \text{ або у безрозмірному вигляді} \\ \frac{T_{печі}^4 - T_{м}^4}{T_{г}^4 - T_{м}^4} = \phi_{печі} = \frac{\varepsilon_{гкм}}{\varepsilon_{пч-м} \cdot \varphi_{м-пч}}, \quad (3.51)$$

Визначивши незалежним шляхом ступінь чорноти системи під – матеріал $\varepsilon_{пч-м}$, отримаємо можливість обчислити $T_{печі} = f(T_{г}, T_{м})$, оскільки $\varepsilon_{гкм}$ визначено раніше.

Для розглянутої вище схеми радіаційного теплообміну (рис. 3.3 б) $\varphi_{мм}=0$; $\varphi_{кк}=0$, а $\varphi_{м-пч} = \varphi_{м-кл}=1$.

З терії теплообміну відомо, що ступінь чорноти системи при радіаційному теплообміні між опуклим або плоским тілом $\varphi_{мм}=0$ і абсолютно чорною оболонкою дорівнює ступеню чорноти нагріваємого тіла, тобто $\varepsilon_{пч-м} = \varepsilon_{м}$.

Тоді функція зв'язку $T_{печі}$ з $T_{г}$ і $T_{кл}$

$$\phi_{печі} = \frac{\varepsilon_{гкм}}{\varepsilon_{пч-м} \cdot \varphi_{м-пч}} = \frac{\varepsilon_{г}[1 + \varphi_{к-м}(1 - \varepsilon_{г})]}{\varepsilon_{г} + \varphi_{к-м} \cdot (1 - \varepsilon_{г})[1 - (1 - \varepsilon_{г})(1 - \varepsilon_{м})]} \quad (3.52)$$

Таким чином для визначення $Q_{рез.м}$ у системі під – матеріал для будь-яких схем розташування поверхонь, маємо:

$$Q_{\text{рез.м}} = \varepsilon_{\text{пч-м}} \cdot \sigma_0 \cdot \varphi_{\text{м-пч}} [T_{\text{печі}}^4 - T_{\text{м}}^4] \cdot F_{\text{м}} = \sigma_{\text{пч-м}} [T_{\text{печі}}^4 - T_{\text{м}}^4] \cdot F_{\text{м}}, \text{ Вт} \quad (3.53)$$

де $\sigma_{\text{пч-м}}$ – зведений коефіцієнт випромінювання системи піч-матеріал, віднесений до температури печі.

Для схем взаємного розташування теплообмінних поверхонь, що належать до I групи ($\varphi_{\text{мм}}=0$; $\varphi_{\text{кк}} \neq 0$) $\varepsilon_{\text{пч-м}} = \varepsilon_{\text{м}}$, $\varphi_{\text{м-пч}} = \varphi_{\text{м-к}} = 1.0$, а $\sigma_{\text{пч-м}} = \sigma_0 \varepsilon_{\text{м}}$;

Для випадків коли $\varphi_{\text{мм}} \neq 0$; $\varphi_{\text{кк}} \neq 0$

$$\varepsilon_{\text{пч-м}} = \frac{\varepsilon_{\text{м}}}{1 - \varphi_{\text{мм}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})}; \quad \varphi_{\text{м-пч}} = \varphi_{\text{м-к}},$$

$$\text{а } \sigma_{\text{пч-м}} = \sigma_0 \frac{\varepsilon_{\text{м}}}{1 - \varphi_{\text{мм}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})} \cdot \varphi_{\text{мк}}.$$

Результуючий тепловий потік на матеріал $Q_{\text{рез.м}}$ можливо віднести також до різниці температур між кладкою і нагріваємым матеріалом, умовно приймаючи кладку як єдине первинне джерело випромінювання тепла.

Використовуючи аналогічний підхід (результат теплообміну повинен залишатись однаковим незалежно від того, що прийнято за джерело випромінювання, тобто $Q_{\text{рез.м}} = Q_{\text{гкм}} = Q_{\text{кл-м}}$), отримаємо :

$$Q_{\text{рез.м}} = \sigma_{\text{кл-м}} [T_{\text{кл}}^4 - T_{\text{м}}^4] \cdot F_{\text{м}} = \varepsilon_{\text{кл-м}} \cdot \sigma_0 [T_{\text{кл}}^4 - T_{\text{м}}^4] \cdot F_{\text{м}}, \text{ Вт} \quad (3.54)$$

де $\sigma_{\text{кл-м}}$ – зведений коефіцієнт випромінювання в системі кладка-матеріал, Вт/м²К⁴, віднесений до температури кладки.

Для схем радіаційного теплообміну а і б наведених на рис.1 зведена ступінь чорноти системи кладка-матеріал визначається рівнянням:

$$\varepsilon_{\text{кл-м}} = \frac{\varepsilon_{\text{м}}[1 + \varphi_{\text{к-м}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})]}{1 + \varphi_{\text{мм}}(1 - \varepsilon_{\text{г}})(1 - \varepsilon_{\text{м}})} \quad (3.55)$$

Для схем в,г і д, наведених на рис.3.3 рівняння для ступеню чорноти системи кладка-матеріал спрощується до виразу:

$$\varepsilon_{\text{кл-м}} = \varepsilon_{\text{м}} \quad (17)$$

Узагальнюючи викладене вище слід зазначити, що $Q_{\text{рез.м}}$ можливо визначити за відомими значеннями джерела теплоти ($T_{\text{печі}}$, $T_{\text{г}}$ і $T_{\text{кл}}$) за допомогою формул 3.42, 3.53, 3.54. При цьому сутність труднощів обчислення $Q_{\text{рез.м}}$ зводиться до визначення зведеного коефіцієнта випромінювання для відповідної теплообмінної системи. Також слід акцентувати увагу на тому, що $\sigma_{\text{гкм}} = f(T_{\text{г}})$, а $\sigma_{\text{пч-м}}$ і $\sigma_{\text{кл-м}}$ відповідно не залежать від $T_{\text{печі}}$ і $T_{\text{кл}}$, тобто є константами. Це значно спрощує визначення $T_{\text{печі}}$ і $T_{\text{кл}}$ за відомими значеннями $Q_{\text{рез.м}}$ і $T_{\text{м}}$ за допомогою формул 3.53 і 3.54. Визначення ж $T_{\text{г}}$ за допомогою формули (3.42) ускладнюється тією обставиною, що $\sigma_{\text{гкм}}$ в свою чергу є функцією ще невідомої $T_{\text{г}}$. Тому $T_{\text{г}}$ приходить визначати методом послідовних наближень з застосуванням лінійної інтерполяції.

3.5. Керування нагріванням металу

В одній з перших робіт з керованого теплообміну в нагрівальних печах розглянуто питання масоперенесення при реверсі й рециркуляції продуктів згоряння в робочій камері.

Для організації керованого теплообміну в робочому просторі нагрівальних печей потрібно розробляти й удосконалювати способи і пристрої опалення і

нагрівання, а також вибирати керуючі впливи і розширювати їхній діапазон. При вирішенні питань керованого теплообміну потрібно враховувати малоінерційність факела. Ця властивість, з одного боку, є позитивною, тому що дозволяє оперативно змінювати температурне поле в робочому просторі печі. З іншого боку, при наявності випадкових збурюючих впливів можуть відбуватися непередбачені за часом і величиною зміни температури та її розподіл по об'єму факела.

У зв'язку з тим, що температурне поле по об'єму робочого простору печі нерівномірне і відсутні методи керування цим полем, доцільним рішенням проблеми є застосування циклічних способів опалення, основаних на періодичній зміні тепломасообмінних процесів у робочому просторі печі, які можна розділити на імпульсні і гармонійні. Тривалість циклу залежить від багатьох факторів (інтенсивності впливу, властивостей металу, що нагрівається, конструкції печі) і визначається експериментально.

На нагрівальних колодязях комбінату «Азовсталь» впроваджено імпульсну подачу компресорного повітря, спрямованого під кутом на факел. Імпульсне опалення у вигляді синусоїдальних коливань перевірено на колодязях із верхнім пальником Західносибірського металургійного комбінату. Система імпульсного опалення впроваджена в масштабі відділень рекуперативних нагрівальних колодязів на Карагандинському металургійному комбінаті й заводі "Дніпроспецсталь". Багаторічна експлуатація показала високу ефективність системи управління, забезпечуючи зниження витрати палива, скорочення тривалості нагрівання й зниження браку по нагріванню.

Циклічні способи опалення дозволяють, крім покращання якості нагрівання, підвищити ККД камерних печей, тому що в період витримки збільшується середнє значення теплового потоку на метал. Водночас виключається тривалий вплив високотемпературної частини факела на ту саму ділянку поверхні металу і кладки, забезпечуючи зниження угару, поверхневих дефектів і підвищення терміну експлуатації вогнетривів. Застосування імпульсного опалення можливе і на низькотемпературних печах з переважним конвективним теплообміном. Значна увага приділяється оптимальному керуванню з метою мінімізації витрати палива, угару металу і собівартості нагрівання.

Реалізація оптимального керування так само, як і циклічного опалення, утруднена малим діапазоном зміни керувальних впливів. Так, на багатьох рекуперативних печах тепла потужність обмежується кількістю повітря для горіння палива. На значній частині нагрівальних пристроїв, у тому числі в нагрівальних колодязях, методичних і термічних печах, обмежена продуктивність димовідвідного тракту. Важлива роль належить пристроям-пальникам, використовуваним як засіб керування. Якщо діапазон зміни витрати палива, повітря і їхнього співвідношення недостатній, то, природно, неможлива зміна в широких межах параметрів теплообміну в робочому просторі печі.

Полуменевим нагрівальним печам властивим є на початкових етапах нагрівання масивних тіл нестационарне температурне поле, а отже, на ділянках тіла, що нагрівається, мають місце різні умови зовнішнього і внутрішнього теплообміну. Через те, що момент закінчення нагрівання визначається по точках, що

нагріваються з мінімальною швидкістю, можливий брак за рахунок перевищення температури в зонах з максимальною швидкістю нагрівання.

Ефективність циклічних способів опалення доцільно оцінювати виходячи з вимог отримання мінімальної тривалості нагрівання при постійній питомій витраті палива або мінімальній питомій витраті палива при незмінній тривалості нагрівання.

Розрахунки нагрівання при стаціонарній температурі газового середовища доцільно виконувати з використанням відомих методик, а для випадку циклічного опалення — методики треба розробляти.

Для реалізації керованого теплообміну потрібні засоби і способи, за допомогою яких можна змінювати керований параметр у широкому діапазоні і стабілізувати інші параметри або підтримувати їхні оптимальні значення. Тому потрібна розробка відповідних алгоритмів і систем керування.

3.6. Параметри керування зовнішнім теплообміном

Покращення ефективності теплообміну і паливоспоживання в нагрівальних печах може бути отримане внаслідок інтенсифікації тепловіддачі від факела до металу, збільшення температурного потенціалу палива, використання самонастроювальних систем керування тощо.

Оцінити вплив факторів на ефективність роботи печей можна шляхом аналізу статей теплового балансу з використанням рівняння теплообміну і коефіцієнта використання палива.

Загальне рівняння зовнішнього теплообміну з урахуванням конвективної складової описується рівнянням

$$Q_{\Sigma}^M = \left\{ \frac{1 + \varphi_K^M (1 - \varepsilon_z) (1 - \varepsilon_z) (q_{\text{кон}}^K - q_{\text{втр}})}{\sigma_0 \varepsilon_z (T_K^2 T_{\text{відх}}^2 - T_M^4)} \times \right. \\ \left. \frac{\varepsilon_z + \varphi_K^M (1 - \varepsilon_z) [\varepsilon_M + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_M)]}{\varepsilon_z + \varphi_K^M (1 - \varepsilon_z) [\varepsilon_M + \varepsilon_z (1 - \varepsilon_M)]} \times \right. \\ \left. \times (T_K^2 T_{\text{відх}}^2 - T_M^4) + \alpha_K \left(\sqrt{T_K T_{\text{відх}}} - T_M \right) \right\} F, \quad (3.56)$$

де (σ_0 — постійна випромінювання абсолютно чорного тіла; ε_z , ε_M = ступінь чорноти газів і металу відповідно; φ_K^M — кутовий коефіцієнт випромінювання металу на кладку; $T_K, T_{\text{відх}}, T_M$ — калориметрична температура горіння палива, температура продуктів згорання, що відходять, і металу відповідно; $q_{\text{кон}}^K$ — тепло, передане конвекцією від газу до кладки; $q_{\text{втр}}$ — втрати тепла через кладку; α_K — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією; F - площа поверхні тіла, що нагрівається.

Члени рівняння $q_{втр}$, $\phi_{м}$, F мають постійні значення для умов даного нагрівання, а ε_m змінюється незначно, тому їхній вплив на теплообмін можна не враховувати.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі є функцією швидкості газів ω_z , коефіцієнта теплопровідності λ_z і кінематичної в'язкості ν_z , тобто

$$\alpha_k = f(\omega_z, \lambda_z, \nu_z). \quad (3.57)$$

У теплових розрахунках потрібно враховувати також можливість підвищення теплового потоку від газу до поверхні металу і за рахунок збільшення ε_z . З аналізу рівняння випливає, що найбільш істотним є вплив на Q_Σ^M калориметричної температури горіння палива.

Ефективність інтенсифікації зовнішнього теплообміну зручно оцінювати по зміні коефіцієнта використання палива :

$$\eta = 1 + a \frac{t_z}{t_k} + b \frac{t_e}{t_k} - c \frac{t_{відх}}{t_k}, \quad (3.58)$$

Де $a = C_0^{t_z} \nu_z / C_0^{t_k} \nu_d$; $b = C_0^{t_e} \nu_e / C_0^{t_k} \nu_d$; $c = C_0^{t_{відх}} \nu_{відх} / C_0^{t_k} \nu_d$; $t_z, t_e, t_{відх}$ — відповідно температура підігріву газу, повітря і продуктів згоряння, що відходять; $C_0^{t_z}, C_0^{t_e}, C_0^{t_{відх}}$ — відповідно середні теплоємності газу, повітря продуктів згоряння в інтервалі температур від 0 до t_z, t_e до $t_{відх}$ і $\nu_e, \nu_{відх}$ питомі кількості повітря і продуктів згоряння на 1 м^3 палива.

Умови теплообміну в робочому просторі залежать і від окалиноутворення. Відсутність інформації про поточні значення температури поверхні металу, складу газового середовища і нерівномірності розподілу температури в робочому просторі утрудняє прямий контроль швидкості окислення металу. Її можна визначити по рівнянню матеріального балансу кисню газової фази:

$$B_{O_2} = B_T \left[C_T \frac{\frac{0,21}{0,79} N_{2d} - (O_{2d} - 0,5CO_d)}{CO_{2d} + CO_d} - \left(O_2^T - \frac{0,21}{0,79} N_2^T \right) \right] \quad (3.59)$$

де B_{O_2} — кількість кисню, поглиненого металом, $\text{м}^3/\text{г}$; C_T — вміст вуглецю в паливі, перерозрахований на обсяг CO_2 ; $N_{2d}, O_{2d}, CO_{2d}, CO_d$ — вміст відповідних компонентів у продуктах згоряння; O_2^T, N_2^T — вміст O_2 і N_2 в паливі; $0,21$ і $0,79$ — вміст кисню й азоту в повітрі.

При постійній витраті палива B_T швидкість поглинання кисню металом може бути визначена по складу відхідних продуктів згоряння (O_{2d}, CO_{2d}, CO_d).

Таким чином, для керування зовнішнім теплообміном може бути використана зміна температурного потенціалу палива, теплової потужності і радіаційних характеристик факела при надійному контролі і керуванні якістю спалювання палива.

3.7. Підвищення температурного потенціалу палива

Температурний потенціал палива можна підвищити шляхом збільшення теплотворної здатності, збагачення повітря киснем, мінімізації надлишку окисника, а також збільшення температури підігріву компонентів горіння. Ефективність кожного з методів може попередньо оцінюватися шляхом розрахунку нагрівання тонких і масивних тіл, а переваги кожного з них можуть бути встановлені за результатами досліджень нагрівання тіл одного виду. Для оцінки можна використовувати вираз

$$Fo = (a_i + b_i\Theta + c_i\Theta^2) / Sk \quad (3.60)$$

де Fo , Sk — відповідно числа Фур'є і Старка; a_i , b_i , c_i — постійні коефіцієнти; Θ — відношення температури металу і газу.

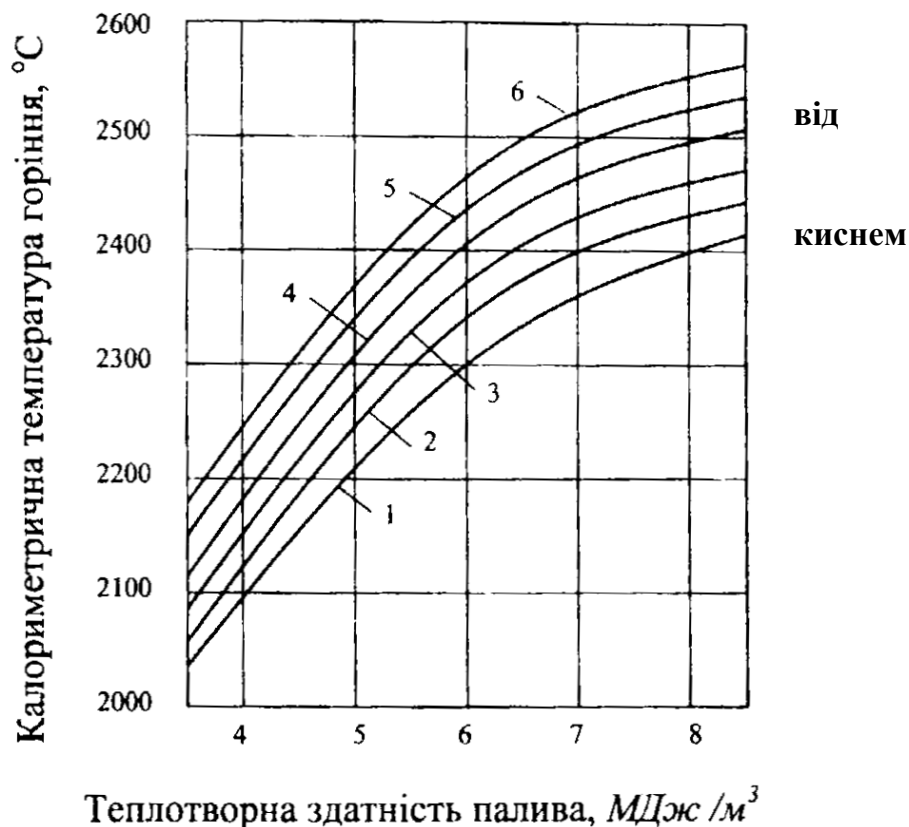
Ефективність застосування кисню і палива зі змінною теплотворною здатністю була оцінена по калориметричній температурі горіння для природнодоменних і коксодоменних сумішей при різній температурі підігріву компонентів горіння. При спалюванні коксодоменної суміші (рис. 3.4) з підігрівом палива і повітря до 800°C підвищення теплотворної здатності від $3,75$ до $8,5 \text{ МДж/м}^3$ приводить до зростання температури на 375°C , в умовах же використання збагаченого до $31\% \text{ O}_2$ повітря — на 520°C . Зростання температури горіння доменного газу за рахунок збагачення повітря киснем до $28 - 29\%$ відповідає підвищенню теплотворної здатності з $3,75$ до $4,5 \text{ МДж/м}^3$; при підігріві газу до 200 і повітря до 400°C збагачення повітря киснем до 28% забезпечує підвищення температури горіння на 150°C , що відповідає збільшенню теплотворної здатності і природнодоменної суміші з 4 до $5,6 \text{ МДж/м}^3$. Опалення нагрівальних печей паливом з перемінною теплотворною здатністю і збагаченням повітря киснем розширює можливості керування параметрами теплообміну.

Однак зі збільшенням теплотворної здатності палива Q_p зростає потреба в повітрі, потрібному для спалювання одиниці палива, при збагаченні ж повітря киснем вона зменшується. Тому другий спосіб може застосовуватися на печах, що мають обмеження по повітрі.

Рис. 3.4 - Залежність калориметричної температури згорання теплотворної здатності палива при збагаченні повітря до:

- 1 - 21%**
- 2 - 23%**
- 3 - 25%**
- 4 - 27%**
- 5 - 29%**
- 6 - 31%**

при температурі підігріву газу і повітря 800 °С



Можливість підвищення теплової потужності печей в умовах обмеженого подавання повітря в робочий простір оцінювалася за результатами розрахунків теплової потужності, отриманої на одиницю кількості подаваного повітря, для різного складу палива і змінного ступеня збагачення повітря киснем. Збагачення повітря киснем до 25% при $Q_p^p = 8 \text{ МДж/м}^3$ Дозволяє підвищити питому теплову потужність приблизно на 25%, а збільшення теплотворної здатності палива приводить до її зниження.

Цікавою є зміна окисної здатності атмосфери печі, обумовлена вмістом у ній H_2O, O_2 і CO_2 . При температурі 1000 - 1260 °С активність H_2O і O_2 відносно металу в три рази вища, ніж CO_2 . Розрахунки складу продуктів згорання при зміні Q_p^p , вмісту O_2 в повітрі n_k і коефіцієнта витрати повітря α_v показали, що при $\alpha = 1,1$ підвищення теплотворної здатності палива з 8 до 16 МДж/м^3 , а також збагачення повітря до 29% O_2 , приводить до збільшення вмісту кисню в продуктах згорання на 0,5%. Вміст CO_2 при збагаченні повітря киснем збільшується на 2,5%, а при підвищенні теплотворної здатності в зазначених вище межах зменшується на 3,5%.

Збагачення повітря до 29% при теплотворній здатності 6 МДж приводить до підвищення вмісту H_2O в продуктах згорання на 2%, а збільшення теплотворної здатності з 4 до 6 МДж/м^3 — на 3%.

Таким чином, зміна окисних властивостей газового середовища при збагаченні киснем і підвищенні теплотворної здатності палива практично однакова для умов рівного підвищення температури горіння. При постійній тепловій потужності зміна теплотворної здатності від 8 до 16 МДж/м^3 , а також збагачення повітря киснем до 25% забезпечують однакове зменшення величини відношення об'єму продуктів горіння, що припадає на одиницю теплотворної здатності палива:

$$\beta = v_{n2} / Q_H^P.$$

На печах з керамічними рекуператорами через перемінні втрати повітря, що залежать від витрати і температури газових рухомих середовищ, невідома його кількість, що надходить у робочий простір. Подача кисню в повітряний канал після рекуператорів дозволяє визначити істинну витрату повітря. Рівняння балансу по кисню на ділянці від місця введення його в повітряний канал до газовідбірного пристрою можна зобразити у вигляді

$$(V_{\text{в}} - V_{\text{к}})0,21 + O_2^{\text{к}} V_{\text{к}} = O_2^{\text{в}} V_{\text{в}} \quad (3.61)$$

де $V_{\text{в}}$ — загальна годинна витрата збагаченого повітря; $V_{\text{к}}$ — витрата кисню; 0,21, $O_2^{\text{в}}$, $O_2^{\text{к}}$ — відповідно частка кисню в атмосферному, збагаченому повітрі і технічному кисні.

З наведеного рівняння визначаємо

$$V_{\text{в}} = \frac{O_2^{\text{к}} - 0,21}{O_2^{\text{в}} - 0,21} V_{\text{к}} \quad (3.62)$$

Використовуючи цю формулу і співвідношення витрат $V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{д}} + V_{\text{к}}$, отримуємо вираз для визначення істинної витрати вентиляторного повітря, що надходить у піч після рекуператорів:

$$V_{\text{в}}^{\text{д}} = \frac{O_2^{\text{к}} - O_2^{\text{в}}}{O_2^{\text{в}} - 0,21} V_{\text{к}} \quad (3.63)$$

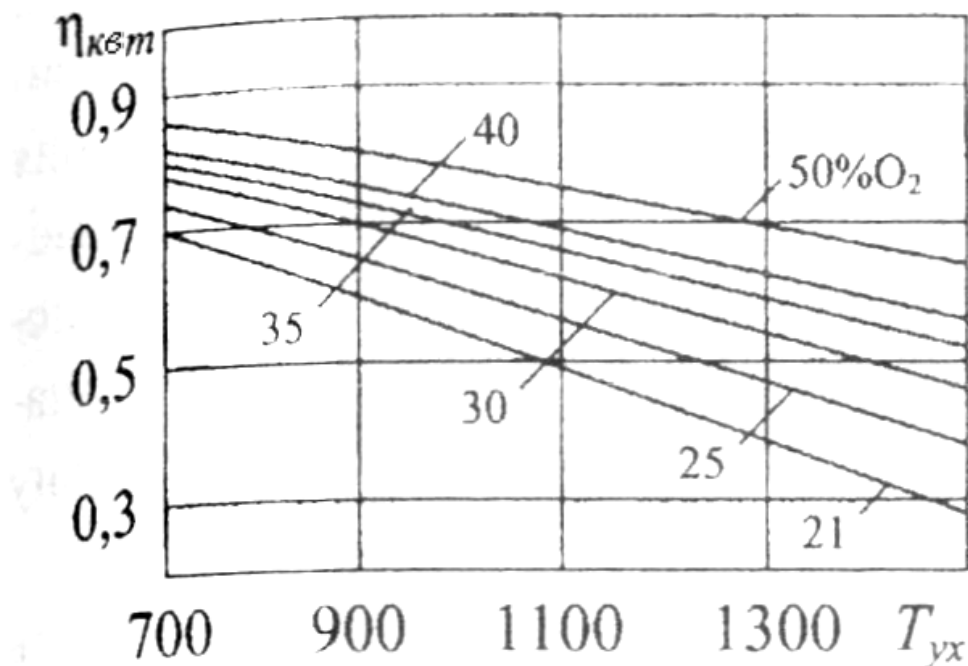


Рис. 3.5 - Залежність $\eta_{квт}$ при спалюванні природного газу від температури відхідних продуктів згоряння

При відомому ступені чистоти використовуваного кисню для розрахунку V_e^0 потрібно визначити ступінь збагачення повітря за допомогою газового аналізу, що може застосовуватися при періодичному контролі роботи печі, при дослідженнях, а також у системах автоматичного керування горінням.

У зв'язку з тим, що питання застосування кисню в нагрівальних печах у літературі раніше не розглядалися, виконаємо обґрунтування економічної доцільності його використання.

З рис. 3.5 видно, що при спалюванні природного газу (теплотворна здатність тут і далі становить $34,95 \text{ МДж/м}^3$ з коефіцієнтом витрати повітря 1,0 без підігріву компонентів горіння збагачення повітря до 30% O_2 призводить до зростання коефіцієнта використання палива $\eta_{квт}$ при температурі продуктів згоряння, що виходять, $1000 - 1300^\circ\text{C}$ на 20-30% і відповідно до 50% - на 36 - 70%.

На рис. 3.7 показані залежності економії природного газу від температури продуктів згоряння, що відходять, при подачі 1000 м^3 кисню і природного газу. Заштриховані області відповідають ступеням збагачення повітря від 25 до 50%.



Рис. 3.6 - Зміна розрахункового економічного ефекту при роботі печі з подачею 1000 м^3 кисню в залежності від величини економії природного газу (криві 3 і 4), а також у випадку збільшення продуктивності печі на 10% (криві 1 і 2) при вартості 1 т умовного палива, рівної 27 грн. (криві 1 і 3) і 14 грн. (криві 2 і 4).

При економії природного газу більш за 350 м^3 (вище роздільної лінії *a*) може бути отриманий позитивний ефект тільки за рахунок економії палива при роботі печі без підігріву повітря, а також в умовах підігріву до 400°C і температурі продуктів згоряння, що відходять, вищою за $1250 - 1350^\circ\text{C}$. Застосування кисню для підвищення продуктивності і зниження витрати палива водночас економічно доцільно при зниженні споживання природного газу до значень, що перевищують роздільну лінію *b*.

Таким чином, ефективність застосування кисню залежить від абсолютних значень підвищення продуктивності печі й економії палива при заданих температурах підігріву компонентів горіння і вартості кисню і палива.

Покращання роботи рекуператорів і регенераторів може стати істотним фактором підвищення використання палива, в тому числі і при застосуванні кисню, а також палива зі змінною теплотою згоряння.

Після перетворення рівняння теплового балансу рекуператора, прийнявши умову $i'_\partial/B'_B = \text{const}$, отримаємо

$$\frac{1}{f(n_y)} i_\partial'' (1 - n_y) + i_\partial'' \left[\frac{1}{B'_B} + \frac{n_y}{f(n_y)} \right] \varepsilon_n = \text{const}, \quad (3.64)$$

де i'_o i''_o — тепломісткість продуктів згоряння до і після рекуператора; i''_e — тепломісткість повітря після рекуператора; ε_n — коефіцієнт, що враховує втрати тепла через зовнішні поверхні рекуператора; B'_B — витрата повітря на вході в рекуператор; n_y — витікання повітря в рекуператорі.

З формули випливає, що співвідношення між тепловмістом продуктів згоряння і підігрітого повітря залежить від його втрат у рекуператорі.

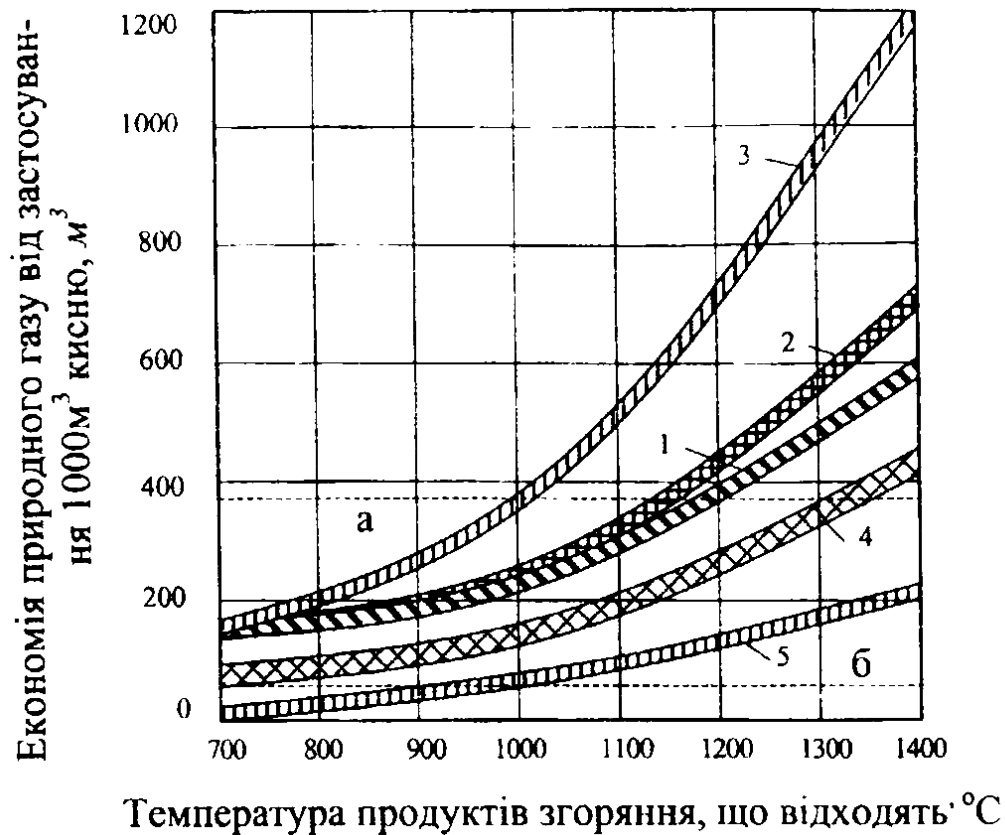


Рис. 3.7 - Залежність економії природного газу від температури відхідних продуктів згоряння, при застосуванні 1000 м³ кисню: 1 - при $\alpha_e = 1$ для $t_e = 0^\circ\text{C}$; 2 - при $\alpha_e = 1,1$ для $t_e = 0^\circ\text{C}$; 3 - при $\alpha_e = 1,3$ для $t_e = 0^\circ\text{C}$; 4 - при $\alpha_e = 1,1$ для $t_e = 400^\circ\text{C}$; 5 - при $\alpha_e = 1,1$ для $t_e = 600^\circ\text{C}$.

Температуру продуктів згоряння на виході з рекуператора можна визначити за формулою, отриманою з рівняння теплового балансу:

$$t''_o = \frac{[\varepsilon_n W'_o t'_o - (1 - n_y) W''_e t''_e]}{W''_o \varepsilon_n} \quad (3.65)$$

де W'_o , W''_e , W''_o — водяні еквіваленти потоків продуктів згоряння, що відходять, на вході та виході рекуператора, а також повітря на його вході; t''_e — температура повітря на виході рекуператора; t'_o — температура продуктів згоряння на вході рекуператора.

Тому що $W''_e = (B'_B + n_y B'_B) C''_d$, то з виразу випливає, що t''_d залежить від утрат повітря. Зміні t''_d й t''_e у залежності від n_y відповідає зміна середньої по висоті рекуператора різниці температур між димовим і повітряним каналами Δt_{ϕ} . Перетікання повітря в димовий канал приводить до зміни коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням за рахунок зниження температури і вмісту CO_2 і H_2O . Водночас через зростання витрати продуктів згоряння і зниження витрати повітря відбувається перерозподіл коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією α_k .

У зв'язку з відсутністю методу аналітичного визначення перетікання повітря в димовий канал у робочих умовах утруднена можливість оцінки цієї величини при експлуатації печі й урахування її зміни в тепловому режимі.

Зі збільшенням нещільностей у кладці рекуператора для забезпечення $n_y = const$ потрібно зменшити витрату повітря, що проходить через рекуператор. При незмінній загальній витраті продуктів згоряння, що видаляються через рекуператор, і $t''_y = const$ температура підігріву повітря збільшиться пропорційно середньому водяному еквіваленту повітря W_e . Тому загальна кількість тепла, внесена в робочий простір, зміниться менше, ніж при збільшенні n_y . Таким чином, для підвищення ККД рекуператорів потрібно розробляти способи опалення печей, що дозволяють при збільшенні втрат повітря в рекуператорі знизити його витрати в основному каналі.

Ступінь повернення тепла регенераторами визначається частотою реверсування факела, що у свою чергу залежить від температурного стану робочого простору і регенераторів.

4. ВНУТРІШНІЙ ТЕПЛООБМІН У ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ

4.1. Нагрів тонких тіл сталим тепловим потоком

$$(q=\text{const}; \frac{dt}{d\tau} = 0; t = f(\tau))$$

В теорії нагріву прийнято динаміку нагріву тіл ілюструвати 3-ма діаграмами.

Діаграма *A* - температурна, показує змінення температури тіла і печі за часом.

Як видно з діаграми *A*, закон змінення температури за часом має лінійний характер.

Це легко показати аналітично. За час $d\tau$ тіло отримує від печі тепло:

$$dQ = q \cdot F \cdot d\tau \quad (4.1)$$

Ця кількість тепла змінює температуру тіла на dt , °C

$$dQ = M \cdot c \cdot dt \quad (4.2)$$

де M — маса тіла, кг;

c - теплоємність, кДж/кг·°C.

Прирівнюючи (4.1) і (4.2), получимо:

$$q \cdot F \cdot d\tau = M \cdot c \cdot dt ; \frac{dt}{d\tau} = \frac{qF}{M \cdot c} \quad (4.3)$$

$\frac{dt}{d\tau}$ - швидкість нагріву, °C/сек.

q ; F ; c - сталі величини.

Отже $C_n = \text{const}$, тобто в одиницю часу температура тонкого тіла змінюється на одну і ту ж величину: $\frac{dt}{d\tau} = C_n = \frac{qF}{M \cdot c} = \text{const}$.

Діаграма В- теплова, показує змінення теплового потоку з часом (у даному випадку $q = \text{const}$). Кожна ордината діаграми В показує кількість тепла, отриманого тілом в одиницю часу. Площа теплової діаграми показує скільки тепла отримало тіло за весь період теплової обробки τ . Це тепло пішло на підвищення ентальпії тіла: $\Delta J = F \cdot q \cdot \tau$.

Діаграма С- температурна, показує розподіл температур по перерізу тіла (тіло - пластина товщиною $2R$). Як видно з діаграми С, розподіл температури по перерізу пластини у кожен момент часу рівномірний.

Задача теорії нагріву визначити швидкість нагріву визначити швидкість нагріву

C_n і тривалість τ . C_n визначена вище і дорівнює: $C_n = \frac{qF}{M \cdot c}$.

Визначення тривалості нагріву для даного випадку можна виконати двома методами.

4.1.1. Метод теплової діаграми (І.Д. Семерикін)

Як видно з діаграми B , тривалість нагріву може бути визначена з рівняння:

$$\Delta J = F \cdot q \cdot \tau, \text{ для чого необхідно визначити } \Delta i (\text{Дж/кг}).$$

Розрахунки ведуться по частинам, для чого діаграма B розбивається на 3-4 ділянки, тривалість теплової обробки підраховується для кожної ділянки окремо, а потім складається.

$$\text{Ділянка 1. } \Delta i_1 = i_v - i_n = c_n^{t_k} \cdot t_v - c_n^{t_n} \cdot t_n (c = f(t)). \quad (4.4)$$

Тепловміст M тіла

$$\Delta J_1 = M(c_n^{t_k} \cdot t_k - c_n^{t_n} \cdot t_n) = M \Delta i. \quad (4.5)$$

$$\text{Так як } \Delta J_1 = F \cdot q \cdot \tau_1, \tau_1 = \frac{\Delta J_1}{qF} = \frac{M(c_n^{t_k} \cdot t_k - c_n^{t_n} \cdot t_n)}{qF} \quad (4.6)$$

Таким же чином підраховується τ_2 і τ_3 .

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (4.7)$$

Для спрощення формули для визначення τ введемо розрахункову теплоємність:

$$c_p^{t_k} = \frac{c_n^{t_k} \cdot t_k - c_n^{t_n} \cdot t_n}{t_k - t_n} (\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (4.8)$$

$$\text{Тоді } \tau_1 = \frac{M(c_p^{t_k} \cdot t_k - c_p^{t_n} \cdot t_n)}{qF} \cdot \frac{t_k - t_n}{t_k - t_n} = \frac{M c_p}{qF} (t_k - t_n). \quad (4.9)$$

4.1.2. Аналітичний метод

$$dQ = q \cdot F \cdot d\tau; dQ = M \cdot c \cdot dt \quad (4.10)$$

$$dF \cdot d\tau = M \cdot c \cdot dt; \frac{dt}{d\tau} = \frac{qF}{M \cdot c}.$$

Таким чином, диференціальне рівняння процесу нагріву при $q = \text{const}$

$$\text{має вид: } \frac{dt}{d\tau} = \frac{qF}{M \cdot c}, \quad \frac{dt}{d\tau} = \frac{M \cdot c}{qF} dt. \quad (4.11)$$

Після інтегрування $\tau = \frac{M \cdot c}{qF} t + C$:

при $\tau = 0$; $t = t_n$; $C = -\frac{M \cdot c}{qF} t_n$;

при $\tau = \tau_k$; $t = t_k$; $C = \tau_k - \frac{M \cdot c}{qF} t_k$;

Звідки $\tau_k - \frac{M \cdot c}{qF} = -\frac{M \cdot c}{qF} t_n$,

$$\tau_k = \frac{M \cdot c}{qF} \cdot (t_k - t_n). \quad (4.12)$$

Слід мати на увазі, що теплоємність C середня розрахункова для інтервалу температур $t_k - t_n$, тобто:

$$C_{\text{ср}} = \frac{c_0^{t_k, t_k} - c_0^{t_n, t_n}}{t_k - t_n}. \quad (4.13)$$

4.2. Нагрів тіла в печі зі сталою температурою ($t_{\text{печ}} = \text{const}$)

На початку нагріву різниця температур між піччю і тілом найбільша. Це обумовлює великі q і C_n , швидкий підйом температури тіла.

З часом різниця температур зменшується, зменшується q , а також C_n . Для практики головне питання - визначення тривалості нагріву від t_n до t_k . Вирішувати це питання можна 2-ма методами:

- 1) За допомогою теплової діаграми (метод І.Д. Семикіна);
- 2) Шляхом вирішення диференціального рівняння процесу.

4.2.1. Розрахунок тривалості нагріву по тепловій діаграмі

Температурна і теплова діаграми розбиваються на 3-4 інтервали.

1-й інтервал – $0,75 \div 0,8$ від $(t_k - t_n)$ 2-й інтервал – $0,15 \div 0,20$ від $(t_k - t_n)$

3-й інтервал – $0,05 \div 0,10$ від $(t_k - t_n)$.

Принцип розрахунку той же, що і при $q = \text{const}$, тобто тривалість нагріву обчислюємо для кожного інтервалу окремо по формулі:

$$\tau = \frac{C_p \cdot M}{q_{\text{ср}} \cdot F} (t_k - t_n).$$

де $q_{\text{ср}}$ - визначається по арифметичному або по логарифмічному усередненню:

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_n + q_k}{2}, \quad \text{при } \frac{q_n}{q_k} \leq 2; \quad (4.14)$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_n + q_k}{2,3 \lg \frac{q_n}{q_k}}, \quad \text{при } \frac{q_n}{q_k} > 2; \quad (4.15)$$

q обчислюється по формулі $q = \alpha(t_{\text{печ}} - t_n)$, де t - температура тіла, °C.

Для 1 -го інтервалу $\tau_1 = \frac{c_p \cdot M}{q_{cp1} \cdot F} (t_{к1} - t_n)$.

Таким же чином τ_2 і τ_3 .

Повна тривалість теплової обробки $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$.

4.2.2 Розрахунок тривалості теплової обробки матеріалу шляхом вирішення диференціального процесу

За час $d\tau$ тіло отримує від печі тепло $dQ = q \cdot F \cdot d\tau$, яке йде на збільшення тепловмісту тіла $dj = M \cdot c \cdot dt$.

Але $dQ = dj$, $q \cdot F \cdot d\tau = M \cdot c \cdot dt$.

Звідки $d\tau = \frac{M \cdot c}{F \cdot q_{cp}} dt$.

В той же час при режимі нагріву $t_{пів} = \text{const}$ маємо: $q = \alpha(t_{пів} - t)$, то

$d\tau = \frac{M \cdot c}{F \cdot q_{cp}} dt = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha} \cdot \frac{dt}{t_{пів} - t}$.

Після інтегрування:

$$\tau = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha} \cdot \int_{t_n}^{t_k} \frac{dt}{t_{пів} - t} = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha} [-\ln(-t + t_{пів})] = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha} [\ln(t_{пів} - t_n) - \ln(t_{пів} - t_k)] = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{t_{пів} - t_n}{t_{пів} - t_k} \quad (4.16)$$

Отримана формула має наступні недоліки:

- 1) При виводі формули ми приймали, що $\alpha = \text{const}$. В дійсності ж α змінна

величина. Тому ми повинні підставляти середнє значення α :

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

2) Теж саме ми приймали і у відношенні теплоємності. Тому в формулу треба підставляти $c_p = \frac{\Delta i}{t_k - t_n}$.

3) При виводі формули ми скористалися простою конвективною формулою $q = \alpha(t_{пів} - t)$. В дійсності закон теплопередачі випромінюванням дає залежність q від різниці 4-х ступеней температур печі і тіла. Ця складна залежність в прийнятій простій формулі приховується в коефіцієнті α , який не буде сталим по ходу процесу нагріву.

4.3. Вплив форми тіла на тривалість нагріву

В теорії нагріву розглядаються три класичні форми: пластина (плита), циліндр і куля.

$$C_H = \frac{qF}{M \cdot c}$$

$\frac{F}{M}$ - матеріальне навантаження поверхні нагріву (маса матеріалу, що приходить на одиницю його поверхні);

$$\frac{M}{F} = \frac{V \cdot \rho}{F} \quad (4.17)$$

1. Плита, товщини $2R$, площа верхньої та нижньої поверхні $2F_1$:

$$\frac{M}{F} = \frac{V \cdot \rho}{2F_1} = \frac{F_1 \cdot 2R \cdot \rho}{2F_1} = R \cdot \rho, \quad (4.18)$$

$$\left(\frac{M}{F}\right)_H = R \cdot \rho; \quad C_H = \frac{q}{R \cdot \rho \cdot c}.$$

2. Циліндр, радіусом R :

$$\frac{M}{F} = \frac{V \cdot \rho}{F_{\text{бок}}} = \frac{\pi R^2 \cdot H \cdot \rho}{2 \cdot \pi R \cdot H} = \frac{R \cdot \rho}{2},$$

$$\left(\frac{M}{F}\right)_ц = \frac{R \cdot \rho}{2}; \quad C_H = \frac{2q}{R \cdot \rho \cdot c}. \quad (4.19)$$

3. Куля, радіусом R :

$$\frac{M}{F} = \frac{V \cdot \rho}{F} = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho}{4 \pi R^2} = \frac{R \cdot \rho}{3},$$

$$\left(\frac{M}{F}\right)_к = \frac{R \cdot \rho}{3}; \quad C_H = \frac{3q}{R \cdot \rho \cdot c}. \quad (4.20)$$

Зрівнюючи можна записати $C_H = \frac{q \cdot k_1}{R \cdot \rho \cdot c}$

де k_1 - коефіцієнт форми тіла.

Відповідно тривалість нагріву буде:

$$\text{при } q = \text{const } \tau_K = \frac{C_P M}{qF} \cdot (t_K - t_H) = \frac{R \cdot \rho}{k_1} \cdot \frac{C_P}{q} \cdot (t_K - t_H);$$

$$\text{при } t_{\text{пл}} = \text{const } \tau = \frac{R \cdot \rho \cdot C_P}{k_1 \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{t_{\text{пл}} - t_H}{t_{\text{пл}} - t_K}.$$

Якщо зрівнювати ідеалізовані тіла (нескінченні плита і циліндр, куля), то виходить, що тривалість нагріву для циліндру в 2 рази, а для кулі в 3 рази менші, ніж тривалість нагріву плити при тому ж визначальному розмірі R .

4.4 Методи рішення задач нагріву масивних тіл

1) Інженерний метод.

Інженерна модель нагріву тіла полягає у наступному: в перший момент в нагрів вступає тільки тонкий шар плити, в решті перерізу все ще залишається без змін. В наступний момент в нагрів вступає ще один шар, а внутрішні частини плити все ще не беруть участь в нагріві. Таким чином, по інженерній моделі тіло вступає в нагрів окремими шарами. Час, за який тіло вступає в нагрів всім своїм перерізом називають інерційним (τ') і визначає тривалість проходження теплового потоку від поверхні до центру тіла.

2) Класичний метод.

Класичний метод рішення задач теорії нагріву базується на аналітичному рішенні задач теплопровідності. За уявленнями класичної моделі нагріву підведене тепло миттєво розповсюджується на всю товщину тіла.

Нагрів тіла сталим тепловим потоком $q = \text{const}$

Інженерна модель нагріву.

Як видно з діаграми А, запізнювання центру тіла в участі в процесі нагріву виражається часом τ' . За час τ' температура поверхні піднялась до t'_n , а t_c все ще близька до 0. Швидкий підйом температури в період інерційного часу пояснюється великою різницею температур ($t_{плч} - t_c$).

Після начального періоду нагріву τ' швидкість підйому температури на поверхні і в центрі тіла стають однаковими і відбувається паралельний підйом температури в усіх точках. Цей період нагріву називається регулярним (тобто період, коли в процесі нагріву беруть участь всі точки тіла).

Розподіл температур по перерізу у регулярному режимі.

За час $d\tau$ тіло отримує тепло $q \cdot F \cdot d\tau$. Це тепло йде на змінення тепловмісту

$$\text{тіла } dI = M \cdot c \cdot dt_{cp} \quad (4.21)$$

dt_{cp} - змінення середньомасової температури.

По закону збереження енергії:

$$q \cdot F \cdot d\tau = M \cdot c \cdot dt_{cp}, \quad (4.22)$$

$$\frac{dt_{cp}}{d\tau} = \frac{qF}{M \cdot c} = dt_{cp}.$$

Аналізуючи цей вираз, можна помітити, що C_n в режимі $q = \text{const}$ сталою величиною.

Таким чином:

$$\frac{dt}{dt} = \alpha \cdot k_1 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = C_n = \text{const},$$

$$\frac{q \cdot k_1}{r \cdot \rho \cdot c} = \alpha \cdot k_1 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{q}{r \cdot \rho \cdot c \cdot \alpha} = \frac{q}{\rho \cdot \lambda}.$$

Після інтегрування $\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{qx}{\rho \cdot \lambda} + A$.

При $\lambda = 0, q = 0$, звідки $A = 0$, так як $\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0}, \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{qx}{\rho \cdot \lambda}$.

Інтегруємо ще раз:

$$t = \frac{qx^2}{2\rho \cdot \lambda} + B. \text{ При } x = 0, t = t_{\text{ц}}, \text{ таким чином } B = t_{\text{ц}}, t = t_{\text{ц}} + \frac{qx^2}{2\rho \cdot \lambda} \text{ (парабола).}$$

(4.23)

При $x = r$ маємо, що $t = t_{\text{н}}$:

$$t_{\text{н}} = t_{\text{ц}} + \frac{qr}{2\lambda}, \Delta t = t_{\text{н}} - t_{\text{ц}} = \frac{qr}{2\lambda};$$

$$t = t_{\text{ц}} + \frac{qx^2}{2\lambda r} \cdot \frac{r}{r} = t_{\text{ц}} + \frac{qr}{2\lambda} \cdot \left(\frac{x}{r}\right)^2 = t_{\text{ц}} + \Delta t \left(\frac{x}{r}\right)^2;$$

$$\Delta t = \frac{q_n r}{2\lambda} = q_{\text{сп}} \frac{r}{\lambda}; q_{\text{сп}} = \frac{q_n}{k_2};$$

$$\Delta t = \frac{q_n r}{k_2 \lambda}; k_2 = 2. \quad (4.24)$$

Визначення середньомасової температури тіла

Відомо, що температура змінюється по перерізу тіла по закону $t = t_{\text{ц}} + \frac{qx^2}{k_2 R \lambda}$.

Інтервал змінювання температурної функції від 0 до K .

Для визначення середнього значення температурної функції у заданому інтервалі інтегруємо її у вказаному інтервалі і ділимо на інтервал, тобто:

$$\bar{t} = \frac{1}{R} \int_0^R t \cdot dx = \frac{1}{R} \int_0^R \left(t_{\text{ц}} + \frac{qx^2}{k_2 R \lambda} \right) dx = \frac{1}{R} \left(t_{\text{ц}} \cdot x + \frac{qx^3}{k_2 R 3\lambda} \right)_0^R = t_{\text{ц}} + \frac{qR}{k_2 3\lambda}. \quad (4.25)$$

Але $\frac{qR}{k_2 \lambda} = \Delta t$, звідки $\bar{t} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{3}$ - для пластини.

У загальному випадку $\bar{t} = t_{\text{ц}} + \frac{\Delta t}{k_3}$,

Де k_3 :

3- для пластини;

2- для циліндру;

1,67 – для кулі.

Тривалість начального періоду нагріву τ' .

В начальному періоді тіло вступає в нагрів окремими шарами (пошарово):

$$\tau' = \frac{R \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q} (t_{\text{сп}\tau'} - t_{\text{нсп}}), t_{\text{сп}\tau'} = t_{\text{ц}\tau'} + \frac{\Delta t_{\tau'}}{k_3}; \quad (4.26)$$

$$t_{\text{цт}} = t_{\text{нсп}}, \Delta t = \frac{qR}{k_2 \cdot \lambda}; \quad (4.27)$$

$$\tau = \frac{R \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q} \left(t_{\text{нсп}} + \frac{qR}{k_2 \cdot \lambda \cdot k_2} - t_{\text{нсп}} \right); \quad (4.28)$$

$$\tau = \frac{R^2 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \lambda} = \frac{R^2}{\alpha \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} = \frac{R^2}{k \cdot \alpha}. \quad (4.29)$$

Зведена таблиця для коефіцієнтів k .

Форма тіла	k_1	k_2	k_3	$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$
Пластина	1	2	3	6
Циліндр	2	2	2	8
Куля	3	2	1,67	10

5 ПЛАВИЛЬНІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ

5.1. Технологічна й енергетична характеристики доменного процесу

Метою доменного виробництва є одержання визначеної кількості чавуну потрібної якості шляхом термічної та хімічної обробки залізовмісних матеріалів, що завантажуються в піч. При цьому витрати енергетичних, сировинних і інших ресурсів, а також вплив на навколишнє середовище мають бути мінімальними.

Організація і керування тепловими режимами в домнах вимагають знання всіх властивостей завантажуваного матеріалу, технологічних закономірностей його обробки, конструкції печей і іншого цехового устаткування.

Домна (рис. 5.1), що служить для виплавки чавуну, являє собою протитечію піч шахтного типу. Об'єм робочого простору найбільших 5000 м^3 і вищий, діаметр до 15м, висота 30м і більша. Їхня продуктивність досягає $10\text{--}12 \cdot 10^3\text{ т}$ чавуну на добу, що забезпечується завантаженням $18\text{--}20 \cdot 10^3\text{ т}$ залізовмісних матеріалів, $4\text{--}5 \cdot 10^3\text{ т}$ коксу, подачею $7\text{--}9\text{--}10\text{ м}^3/\text{хв}$ дуття. У печі за добу утворюється $14\text{--}19 \cdot 10^6\text{ м}^3$ колошникового газу і $3000\text{--}5000\text{ т}$ шлаку.

У домні, що працює під підвищеним тиском (до $0,4\text{ МПа}$), розвиваються досить великі температури (у вогнищах горіння — до 2000°C), тому її камера, футерована вогнетривкими матеріалами, інтенсивно охолоджується водою й вміщена в герметичний кожух із сталі.

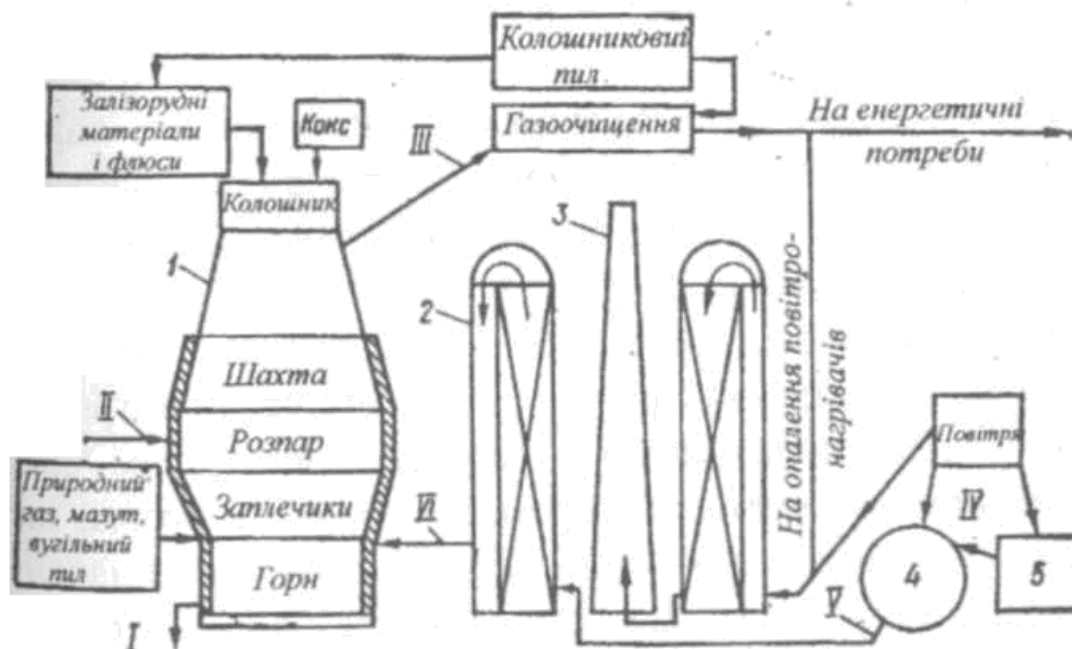


Рис 5.1 - Схема матеріальних і енергетичних потоків у доменному виробництві: 1 - доменна піч; 2 - повітрянагрівачі; 3 - димар; 4 - повітродувна машина; 5 - ксеновий блок; I - чавун і шлак; II - вода на охолодження; III - колошниковий газ; IV - кисень; VI - холодне і гаряче дуття

Для збільшення температурного потенціалу енергоносіїв дуття перед подачею в піч нагрівається до 1000—1200⁰С і більше за рахунок спалювання частини очищеного колошникового газу (іноді в суміші з природним) у спеціальних регенеративних апаратах повітрянагрівачах що є невіддільною енергетичною частиною технологічного процесу виплавки чавуну. Крім того, значна кількість енергії і палива споживається іншими агрегатами, що забезпечують функціонування домен: повітрорудними машинами, кисневими блоками і газоочисними апаратами. Доменне виробництво, отже, — найбільший комплекс по переробці матеріальних і паливно-енергетичних ресурсів у чорній металургії.

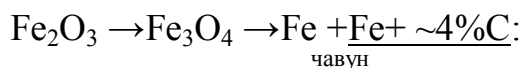
Цільовий продукт доменної плавки, тобто чавун, являє собою багатокомпонентний сплав заліза з вуглецем, кремнієм, марганцем, сіркою, фосфором і іншими елементами. З невідновлених оксидів і сульфідів (Si₂, CaO, MgO, Al₂O₃, Ca) формується шлак. Разом з рідким чавуном він збирається в нижній частині горна — на черені. Внаслідок різниці в питомій вазі той і інший добре розділяються й в міру збирання періодично випускаються з печі через льотки, що потім знову закриваються. Одночасно в печі утвориться доменний, або колошниковий газ (CO, CO₂, H₂, H₂O, N₂), що має теплоту згоряння 3,2—4,2МДж/м³ і, що є в основному продуктом неповного спалювання палива на фурмах і відновлення оксидів заліза й інших елементів. На його частку припадає і 60% загальної кількості вторинних горючих газів, що досягає в паливно-енергетичному балансі галузі 26,5%. Піч, як бачимо, — могутнє джерело енергетичних ресурсів. Відзначимо також, що з доменним газом виноситься найбільш дрібна фракція, завантажуваних матеріалів, (колошниковий пил).

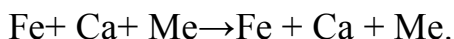
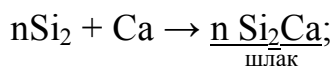
Подавані у певній послідовності і пропорціях сирі матеріали називаються шихтою. Складається вона з залізорудної частини і палива. Для надання потрібних фізико-хімічних властивостей шлаку і чавуну в шихту додаються флюси (вапняки).

Основним паливом для доменної плавки служить кокс, одержуваний термічною обробкою кам'яних вугіль у спеціальних пристроях. Роль його багатогранна. Взаємодіючи з високотемпературним дуттям, він забезпечує технологічний процес теплом і вторинним горючим газом, витрачається як хімічний реагент при відновленні оксидів, є пористою насадкою в печі, особливо в горні, де інші матеріали знаходяться в рідкому стані.

Кокс, використовуваний для виплавки чавуну, повинний мати потрібну міцність; протидіяти стиранню і роздавлюванню, зокрема при високих температурах; містити мало сірки, тому що вона в металі - шкідлива домішка. Такий кокс дефіцитний і дорогий. Тому споживаються й інші види горючих речовин: природний і коксовий газ, вугільний пил, мазут. При виплавці чавуну витрачається приблизно половина палива, що використовується на одержання готового прокату, тобто доменний процес найбільш енергоємний у металургії.

Схематично послідовність основних технологічних процесів у розглянутій печі можна зобразити в такий спосіб:





Доменна піч, як металургійний агрегат, виконує три цільові технологічні функції: відновлення і плавлення заліза і потрібних у ньому домішок; формування розплаву шлаку з усіх невідновлених і таких, що не перейшли в газову фазу хімічних сполук; очищення металу від сірки.

Відповідно до специфіки технологічного процесу й конструктивних особливостей доменної печі енергоносії в ній характеризуються температурними і хімічними параметрами ($t = 1800\text{--}2000^\circ\text{C}$, вміст CO і H_2 у горновому газі 35-45%), а також потенційною енергією (до 0,4МПа), потрібною для організації руху струминного потоку через шар шихтових матеріалів висотою до 30м.

Відмінна риса виплавки чавуну полягає в тісній взаємозалежності технології й енергетики, теплообміну і хімічної кінетики. Приклад тому — непряме і пряме відновлення оксидів заліза, яке вимагає для інтенсивного протікання реакцій високих температур і великої кількості тепла.

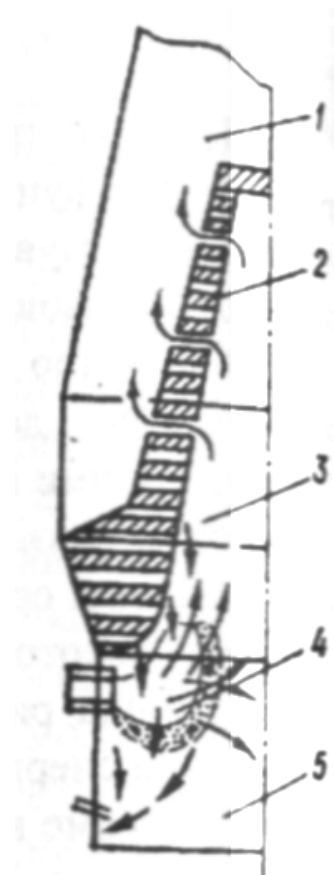
У доменній печі в одному агрегаті поєднуються реакційний апарат, що здійснює певний технологічний процес, і енергетичні пристрої, де виділяється і використовується тепло. Тому ефективна реалізація заходів, пов'язаних з одержанням, передачею і споживанням енергії, є найважливішим елементом, що визначає виробництво чавуну.

Відчизняним ученим належить провідна роль у розвитку теоретичних аспектів процесів теплообміну в доменних печах і розв'язанні багатьох прикладних задач, що стосуються металургії чавуну. У цьому напрямку активно працюють десятки дослідницьких колективів і проектно-конструкторських організацій.

5.2. Теплові режими й теплообмін у доменній печі

Особливості теплових процесів. Виплавка металу в домні, як ми вже знаємо, є високотемпературним, а отже, й енергоємним процесом (величина t для рідкого чавуну досягає $1400\text{--}1500^\circ\text{C}$, а для шлаку на $20\text{--}80^\circ\text{C}$ є більшою). Робота печі основана на широко використовуваному в техніці принципі протитечії. Шихтові матеріали під дією сили ваги опускаються зверху вниз, а назустріч, знизу, надходять гарячі гази, що містять оксид вуглецю і водень. При цьому і відбуваються теплотехнологічні процеси виплавки чавуну — послідовно і по різних яскраво виражених температурних зонах (рис. 5.2): фурменій, кусковій, пластичній тощо.

Рис. 5.2 - Розташування зон в доменній печі за фізичною моделлю: 1 - кускова зона з сипучими сумішами рудної шихти і коксу; 2 - зона плавлення; 3 - зона краплинної течії; 4 - фурмена зона; 5 - металоприймач



Спираючись на численні дослідження охолоджених печей, у домнах, що працюють з L-подібним розподілом температур газу по радіусу колошника, пластичну зону можна представити у вигляді порожнього конуса, границя якого визначається температурним профілем у протитечій ній області: верхнє значення t відповідає початку плавлення рудної частини ($\sim 1100^{\circ}\text{C}$), а нижнє — повному розплавленню при $1300\text{—}1400^{\circ}\text{C}$. В інших випадках ця зона може набувати обрисів букви W, прямої лінії тощо. Зона краплинної течії, що має в сучасних печах вигляд конічної внутрішньої порожнини, нижче рівня повітряних фурм по черзі переходить у шлако- і металоприймачі з коксовими насадками, де продукти розплавлення фільтруються і стікають у горно.

Загальною особливістю роботи доменних печей є те, що процеси тепло- і масообміну визначаються газодинамічним режимом, своєрідність якого, у свою чергу, полягає у фільтрації теплоносія через шар кускових матеріалів дуже великої товщини (до 30м), що рухається в протитечії, де виникають значні, газодинамічні опори (до $0,15\text{МПа}$). Висхідний високотемпературний потік у зоні краплинної течії, проходячи через коксові вікна в пластичній зоні, змінює напрямок на горизонтальний і надходить через зону кускової шихти до колошника.

На відміну від більшості плавильних і нагрівальних печей, де розрізняють зони теплогенерації і теплової обробки матеріалів, у домнах

весь об'єм заповнений шихтою, і ці зони «об'єднані». При опусканні в область високих температур речовини змінюють не тільки фізичні властивості, але і форми, розміри, агрегатний стан і хімічний склад, унаслідок чого теплопередача від газів до матеріалу має складний характер. Водночас здійснюються ендотермічні перетворення і взаємодії в шарі шихти, між її компонентами і газом. У міжкусковому просторі енергія передається теплопровідністю (місця контактів) і конвекцією, а у високотемпературних зонах, крім того, — випромінюванням між поверхнями оброблюваних тіл. Оскільки в різних зонах по висоті печі названі три види перенесення енергії характеризуються неоднаковим питомим значенням, диференційоване їх вивчення є надзвичайно утрудненим і загальний коефіцієнт теплопередачі в домні, який комплексно відображає весь цей процес, звичайно встановлюється експериментальним шляхом.

Хоча цільове призначення печі полягає в передачі тепла технологічним матеріалам, воно неминуче сприймається також огороженням робочого простору й іншими конструктивними елементами домни (фурмами тощо). На стіни печі впливають тверді тіла, що опускаються, і рідкі продукти плавки, створюючи тим самим абразивний і фізико-хімічний вплив. Внаслідок інтенсивного протікання тепло- і масообміну руйнується футеровка холодильників і кожуха домни, утворюються настилі й гарнісаж.

Профіль робочого простору, надійність і довговічність огороження печі визначаються, отже, процесами, що відбуваються між газовим потоком, який опускається твердими матеріалами, рідкими продуктами плавки, футеровкою і системою охолодження. Дані процеси вимагають особливого вивчення й удосконалення.

Теплові процеси в горні печі. Нижня частина домни (горно) виконує дві функції: по-перше, служить металоприймачем, куди під дією сили ваги фільтруються рідкі продукти плавки, що випускаються в міру утворення через спеціальні отвори (льотки); по-друге, тут здійснюються процеси спалювання палива і виділяються основні енергетичні ресурси Доменної плавки — тепло і відновний газ (оксид вуглецю і водень).

На сьогодні застосовуються два способи подачі палива в доменні печі через колошник разом із залізовмісними матеріалами (звичайно у вигляді коксу) і безпосередньо в зону високих температур (фурмену область). Паливо і дуття є рівноправними учасниками процесів горіння й енергетичного забезпечення виплавки чавуну.

Дуття і паливні добавки надходять у піч через фурми, що являють собою охолоджувані водою циліндричні насадки з внутрішнім діаметром 140–200 мм, розташовані по окружності верхньої частини горна на відстані 1,2–1,7 м одна від одної. Завдяки цим приладам формується газовий потік потрібних енергетичних параметрів (по температурі, тиску, кількості, вмісту відновників тощо.).

На виході з фурми швидкість витікання дуття досягає 150–200 м/с при тиску 0,25 — 0,4 МПа і витраті 150–250 м³/хв. При таких параметрах створюваних спеціальними повітродувними машинами, струмінь має велику кінетичну і потенційну енергію. Розширюючись, вона інжектуює в своє ядро шматки коксу, рідкі продукти плавки й газ з периферійної зони.

Важливий теплотехнічний параметр — калориметрична температура — визначає ту межу, до якої прагне температура продуктів згоряння палива в умовах, характерних для доменних процесів. При його спалюванні в кінцевому рахунку до оксиду вуглецю і водню (фурмена область) показник t_k обчислюється за допомогою виразу

$$t_k = \frac{Q_{CO}^p + Q_{\phi}^{dm} + Q_{\phi}^n}{V_{\Gamma} c_0^{t_k}} \quad (5.1)$$

де Q_{CO}^p — теплота неповного згоряння палива, кДж/кг, кДж/м³; Q_{ϕ}^{dm} — ентальпія дуття, кДж/кг, кДж/м³; Q_{ϕ}^n — ентальпія палива, що надходить у зону горіння, кДж/кг, кДж/м³; V_{Γ} — кількість продуктів спалювання палива, м³/кг, м³/м³; $c_0^{t_k}$ — їхня теплоємність, кДж/(м³·°C).

Треба відзначити, що калориметрична температура зростає при нагріванні повітря і палива (рис. 5.3), а також при забезпеченні печі дуттям, збагаченим киснем (в останньому випадку завдяки зменшенню значення V_{Γ}). Подача ж природного газу у фурмену зону призводить до зниження величини t_k унаслідок витрати тепла на розкладання метану і утворення великої кількості продуктів неповного згоряння.

Розглянутий параметр визначає не тільки максимальний температурний рівень виплавки чавуну. Він також дає уявлення про ККД печі і пов'язаний з відносинами водяних чисел газу і шихти, що характеризують теплообмін, який відбувається. Тому даний показник широко використовується при аналізі доменного процесу. Ще

в 20-і роки І.А. Соколов застосовував поняття калориметричної температури для обґрунтування доцільності максимального нагрівання дуття. І в наш час цей параметр служить одним із критеріїв теплового стану горна. Калориметрична температура горіння у фурменій зоні, як правило, змінюється від 1900 до 2300°C, але відомі випадки роботи печей навіть при $t_k = 2500^\circ\text{C}$ і більш.

Доведено, що досліджуваний параметр лише умовно відображає рівень температури фурменого вогнища, значно перевищуючи реальну, дійсну її величину t_d . За даними З.І. Некрасова, коли в горні доменної печі $t_k = 2130\text{--}2275^\circ\text{C}$, то у фокусі горіння експериментально заміряна температура становила 1985°C , а на відстані одного метра від зрізу фурми вона зменшувалася до 1700°C . Показник будучи умовною розрахунковою величиною, що характеризує енергетику процесів неповного спалювання палива, вимагає, отже, критичного осмислення.

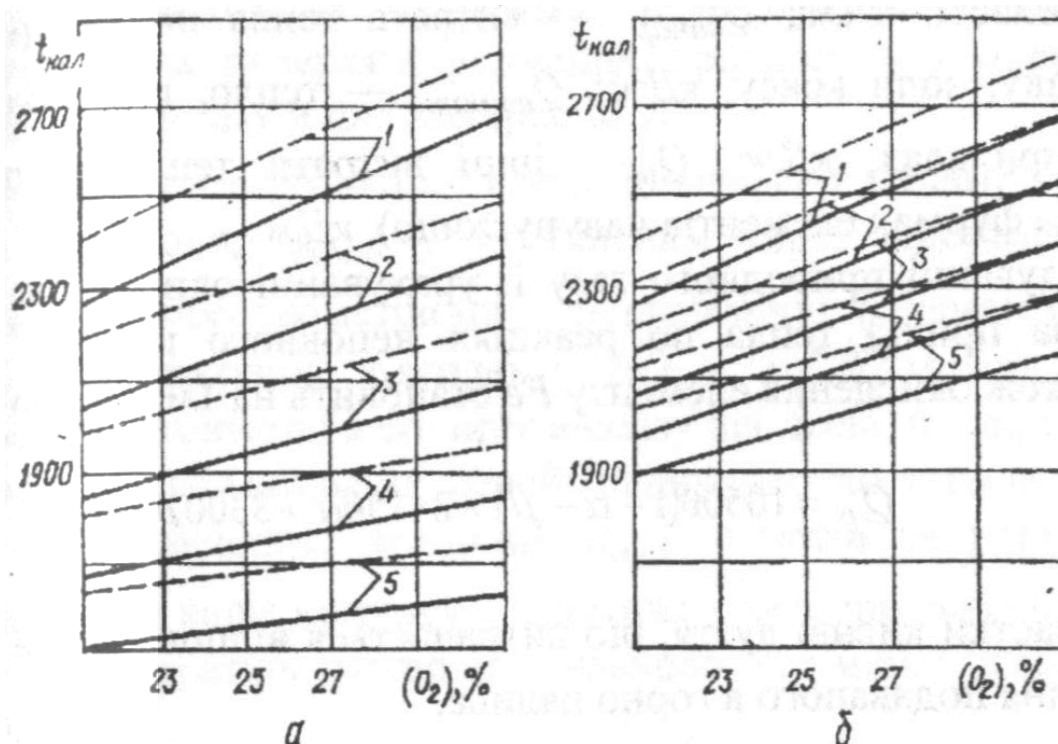


Рис. 5.3 - Залежність величини $t_{\text{кал}}$ від вмісту кисню при подачі природного газу (а), мазуту (б) для температур дуття 1000°C (суцільні лінії) і 1200°C (штрихові лінії).

Частка вуглецю по кожному виду палива від загальної кількості вуглецю, спалюваного в сухому дутті:

1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,3; 5 — 0,4

Температурний рівень у фурменій зоні в кінцевому результаті визначається не абсолютними значеннями t для горнових газів, а рівновагою прибуткових і видаткових статей теплового балансу в цій зоні. При розрахунку балансу на 1м^3 кисню дуття маємо:

$$t_d = \frac{Q_p + Q_{\text{дт}} + Q_k - Q_{\text{випр}} - Q_{\text{випар}} - Q_{\text{втр}} - Q_{\text{ін}}}{V_2 c_0^{t_d}} \quad (5.2)$$

Тут Q_p — прихід тепла від спалювання коксу, паливних добавок і окислення елементів чавуну, кДж; $Q_{дт}, Q_k$ — тепло від нагрітого дуття і коксу, що надходять у фурменну зону, кДж; $Q_{випр}$ — тепло, що передається випромінюванням з центру горіння на матеріали навколо фурменої області, кДж; $Q_{випар}$ — витрата тепла на випар елементів чавуну, шлаку, золи коксу, кДж; $Q_{втрат}$ — тепло, що витрачається на фурмених приладах, кДж; $Q_{ін}$ — інші витрати тепла (з продуктами окислення на фурмах елементів чавуну тощо), кДж.

При вдуванні природного газу й урахуванні окислення на фурмах тільки заліза прихід тепла по реакціях неповного горіння вуглецю і метану, а також окислення елементу Fe становить на 1м^3 кисню дуття:

$$Q_p = 10500(1 - \alpha - \beta) + 24150\alpha + 3300\beta \quad (5.3)$$

де α, β — частки кисню дуття, що витрачається відповідно на окислення заліза і горіння подаваного в горно палива.

У фурменній зоні через високу температуру є можливим частковий випар технологічного матеріалу, що є характерним для більшості плавильних металургійних печей. При цьому

$$Q_{випар} = q_{випар} V_{випар} \quad (5.4)$$

тут $q_{випар}, V_{випар}$ - питома теплота й інтенсивність випару $q_{випар} = 6350$ кДж/кг Fe = 3190 кДж/кг FeO).

Значення $V_{випар}$ для заліза визначається парціальним тиском його парів у газовій фазі зони горіння:

$$V_{випар} = \frac{\mu}{22,4} V_{г.г} \frac{\rho_{Fe}}{\rho_{газ} - \rho_{Fe}} \quad (5.5)$$

де μ — атомна вага заліза; $V_{г.г}$ — загальна кількість горнового газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$ кисню; ρ_{Fe} — пружність парів заліза, Па; $\rho_{газ}$ — загальний тиск газу в горні, Па.

Для розрахунку кількості тепла, що випромінюється з фурменої зони на навколишні матеріали і повітряні фурми, придатною є формула Стефана-Больцмана

$$Q_{випр} = \varepsilon_1 C_0 F \left[\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \quad (5.6)$$

тут ε_1 — ступінь чорноти системи газ-метал-кладка; C_0 — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; F — промене-сприймальна

поверхня фурмених приладів або матеріалів, m^2 ; T_d , T - температури газу й цих матеріалів, К.

Тільки узгоджене керування газорозподілом, завантаженням матеріалів і випуском рідких продуктів плавки дозволяє організувати нормальний температурно-тепловий режим у горні, привести в потрібну відповідність продуктивність домни «по верху» і «по низу», забезпечити надійну роботу всіх її конструктивних елементів.

Теплообмін у протитечійній частині печі. Ця частина, розташована між повітряними фурмами і колошником, являє собою щільний реактор протитечійного типу висотою до 20м з периферійними підведеннями енергоносіїв і відводами доменного газу.

Температурні умови в протитечійній області печі характеризуються, з одного боку, температурою газів у фурменій зоні, а з іншого боку - температурою газів, що залишають рівень завантаження шихти. Зазначені величини сягають відповідно 1800—2000 і 100— 250⁰С (або дещо вище), Тут у неізотермічних умовах відбуваються основні металургійні процеси відновлення, нагрівання і плавлення шихти, формування чавуну і шлаку; споживається велика частина енергії, потрібної для одержання рідкого. Тому дуже важливо вивчити й аналітично описати закономірності тепло- і масообміну між газом і завантажуваним матеріалом, що рухаються в протитечії.

Б.І. Китасв розглянув теплообмін у домні по зонах залежно від співвідношення так званих водяних чисел шихти і газу ($W_{ш}/W_{г}$). створена ним теорія, що є продуктом синтезу різних елементів, не тільки поєднує результати експериментальних досліджень з теплообміну й аеродинаміки в шарі, а також методи математичного опису перенесення енергії в протитечії з урахуванням основних процесів доменної плавки (прямого і непрямого відновлення заліза), а й розвиває прогресивні ідеї що виникли при вивченні теплової роботи печей іншого технологічного призначення (наприклад, газогенераторів).

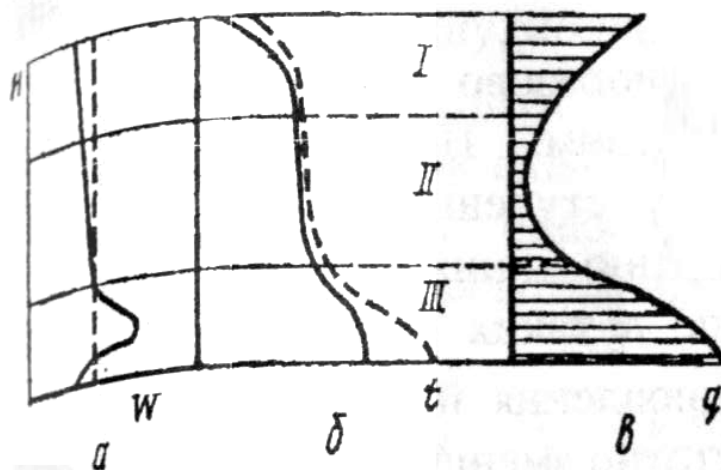


Рис 5.4 - Зміна водяних еквівалентів (а), температур (б) і теплових потоків (в) по висоті доменної печі; суцільні лінії - шихта, штрихові-газ

Доведено, що співвідношення $W_{ш} / W_{г}$ при нагріванні матеріалів у протитечійній частині відіграє, вирішальну роль. Як видно з рис. 5.4, особливість

досліджуваного теплового режиму полягає в тому, що водяне число (еквівалент) газового потоку по висоті домни практично не змінюється, тому що зниження його теплоємності в міру охолодження компенсується зростанням кількості більш теплоємних газів, утворюваних внаслідок відновлення рудного компонента. У верхній зоні печі, де фізичні процеси нагрівання матеріалів і хімічні реакції непрямого відновлення відбуваються при незначному тепловому ефекті, не змінюється й водяне число шихти. Тут співвідношення $W_{\text{ш}}/W_{\text{г}}$ становить величину, яка дорівнює приблизно 0,8.

Опускаючись, матеріали нагріваються зменшуваним тепловим потоком, і на певній висоті температура їх досить близько наближається до температури газу (близько 900°C). Ця частина протитечійної області, названа верхнім ступенем теплообміну, працює подібно методичній зоні нагрівальних агрегатів, призначеній для утилізації теплової і хімічної енергії пічних газів.

Інша ситуація складається в нижньому ступені теплообміну (над фурменою зоною), де водночас з фізичними процесами розплавлення матеріалу протікають ендотермічні реакції прямого відновлення, на розвиток яких витрачається значна кількість тепла. Внаслідок цих процесів, а також інших ендотермічних реакцій відношення водяних чисел шихти й газу збільшується до трьох і більш.

Таким чином, у протитечійній частині доменної печі (залежно від характеру теплообміну в шарі) можна виділити три зони з різними співвідношеннями розглянутих чисел: у верхньому ступені $W_{\text{ш}} < W_{\text{г}}$, зоні помірних температур $W_{\text{ш}} \approx W_{\text{г}}$ і в нижньому ступені $W_{\text{ш}} > W_{\text{г}}$. Температурно-теплову діаграму для протитечійної частини печі,

наведену на рис. 5.4, характеризують такі основні риси:

1. Теплову роботу доменні гази виконують по черзі в двох ступенях (I, III) розділених зоною помірних температур (II) тієї або іншої висоти.

2. У кожному випадку тепла робота відрізняється автономністю, оскільки величина t для потоку продуктів спалювання, що надходять у верхній ступінь визначається температурою газів, що виходять з нижнього ступеня.

3. Теплообмін у доменній печі є завершеним, на що вказує існування зони помірних температур.

Експерименти на діючих печах неодноразово підтвердили основні положення теорії, створеної Б.І. Китаєвим. Подальше уточнення закономірностей теплообміну в нижньому ступені показало, що його можна розділити на дві частини — верхню і нижню відповідно при $W_{\text{ш}} > W_{\text{г}}$ і $W_{\text{ш}} < W_{\text{г}}$, тобто ця зона працює в таких самих умовах, що і верхній ступінь, оскільки тут пряме відновлення йде до завершення і отже, загальне теплопоглинання шихти істотно зменшується.

Основні математичні залежності для розрахунку температурного поля в домні отримані завдяки аналізу закономірностей теплообміну тіл у протитечії з різними співвідношеннями $W_{\text{ш}}/W_{\text{г}}$ і при такому допущенні: якщо теплові втрати в навколишнє середовище відсутні, то в будь-якому перетині по висоті шару H різниця ентальпії потоку продуктів спалювання і матеріалів дорівнює ентальпії газу на виході з даного шару з температурою $t_{\text{к.м}}$, тобто

$$G_z c_z t_z - G_{ш} c_{ш} t_{ш} = G_z c_z t_{к.з} \quad (5.7)$$

де $G_z, G_{ш}$ — об'єм (вага) годинної витрати газу і шихти, м³/год, (кг/год); $t_z, t_{ш}$ — їхні поточні температури, °С.

Тоді, визначаючи величини і для газу і шихти, маємо: при $W_z > W_{ш}$ у верхньому ступені

$$\frac{t_{z0} - t_z}{t_{z0} - t_0} = 1 - \exp \left[- \frac{\alpha_V V_{ш}}{W_{ш}} \left(\frac{W_{ш}}{W_z} - 1 \right) \frac{H}{\varphi} \right], \quad (5.8)$$

$$\frac{t_{z0} - t_{ш}}{t_{z0} - t_0} = 1 - \frac{W_z}{W_{ш}} \exp \left[- \frac{\alpha_V V_{ш}}{W_{ш}} \times \left(\frac{W_{ш}}{W_z} - 1 \right) \frac{H}{\varphi} \right], \quad (5.9)$$

при $W_{ш} > W_z$ у нижньому ступені

$$\frac{t_{z0} - t_z}{t_{z0} - t_0} = 1 - \frac{W_{ш}}{W_z} \exp \left[- \frac{\alpha_V V_{ш}}{W_{ш}} \left(1 - \frac{W_{ш}}{W_z} \right) \frac{H}{\varphi} \right] \quad (5.10)$$

$$\frac{t_{z0} - t_{ш}}{t_{z0} - t_0} = \exp \left[- \frac{\alpha_V V_{ш}}{W_{ш}} \left(1 - \frac{W_{ш}}{W_z} \right) \frac{H}{\varphi} \right]. \quad (5.11)$$

тут t_{z0}, t_0 — початкові температури газу і шихти, °С; α_y — коефіцієнт теплообміну, кВт/(м³·град); $V_{ш}$ — об'єм матеріалів, м³; φ — об'ємна напруга перетину шахти, м³/м²·год).

Використовуючи наведені вище співвідношення, а також припускаючи завершеність процесів теплообміну на 95% ($t_{ш} = 0,95 t_0$), висоту верхнього його ступеня H_3 можна встановити за допомогою формули

$$H_3 = 3\varphi \frac{c_{ш} \rho_{ш} (1 - \varphi f)}{\alpha_V (1 - W_{ш} / W_z)} \quad (5.12)$$

де — насипна маса, кг/м³; f — порозність шару.

Для випадку нагрівання шматків шихти з реальною термічною масивністю при розрахунку зон теплообміну і значень t по радіусу цих шматків доцільно застосовувати залежності, описані в розд. 4. При визначенні температурних полів у шарі враховуються джерела і стоки тепла, обумовлені розвитком технологічних процесів.

5.3. Енергетика доменного процесу

Найважливіші теплотехнічні параметри. Від енергетичних процесів (основи технологічних) багато в чому залежить не тільки кількість, але і якість виплавленого чавуну. Вивчення доменного виробництва припускає розгляд питань, що стосуються теплоенергетики металургійних агрегатів різного технологічного призначення, зокрема теорій і методів, розроблених Н.Є. Скарєдовим, Й.Д. Семикіним, Б.І. Китаєвим, М.О. Глинковим та ін.

Енергетичні процеси в домнах включають в себе механіку газів, спалювання палива, теплопередачу при наявності фазових і хімічних перетворень. Загальними комплексними теплоенергетичними параметрами тут є: теплова потужність печі $M_{\text{заг}}$, коефіцієнт використання палива η , тепловий дефіцит чавуну Δi (витрата енергії на 1 т металу) і втрати тепла в робочому просторі $Q_{\text{пот}}$.

Розрахунок величини $M_{\text{заг}}$ — основної енергетичної характеристики печі, яка значною мірою визначає її продуктивність, пов'язаний з особливостями, викликаними специфікою спалювання палива і технологічного процесу. Наприклад, завантажуваний в домну кокс витрачається також (як хімічний реагент) на пряме відновлення і на вуглецьованість чавуну. У горні йде газогенерація, і паливо (кокс, природний газ, мазут тощо) згоряє зрештою до оксиду вуглецю і водню.

Тому при розрахунку параметра $M_{\text{заг}}$ водень, як відновник, можна залишати вільним, а хімічний недопал вуглецю, що є технологічно необхідним, треба враховувати КВТ.

Беручи до уваги першорядну роль газодинамічних процесів у шахтних печах, загальну теплову потужність $M_{\text{заг}}$ доцільно характеризувати кількістю кисню дуття, поданого в домну за годину

$$M_{\text{заг}} = \frac{V_{O_2}}{0,933} Q_n^p = c_{\phi} Q_n^p \quad (5.13)$$

де V_{O_2} — витрата цього кисню, $\text{м}^3/\text{с}$; 0,933 — стехіометричний коефіцієнт у реакції неповного горіння вуглецю; Q_n^p — теплота його спалювання кДж/кг ; c_{ϕ} — кількість сумарного вуглецю, спаленого на фурмах у сухому дутті, кг/с .

Величина $M_{\text{заг}}$ показує кількість тепла, що виділилося б в одиницю часу при повному спалюванні вуглецю палива на фурмах (рис. 5.5).

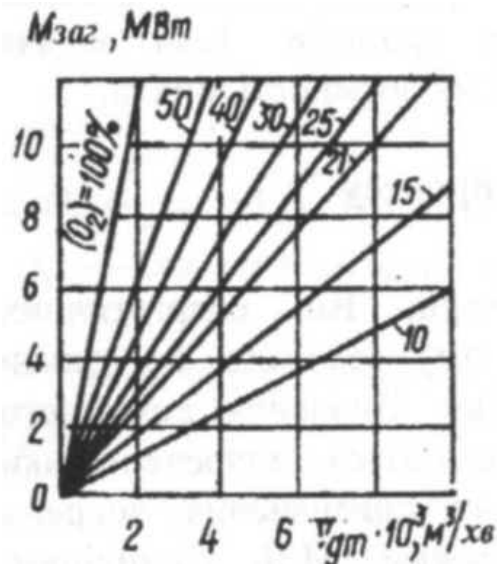


Рис 5.5 - Залежність загальної теплової потужності доменної печі від кількості дуття, поданого в піч

У доменній печі, як і в інших теплотехнологічних агрегатах, кількість дуття $V_{\text{дт}}$ визначається характеристиками мережі і повітродувної машини. Основна роль у даному випадку належить газодинамічному опору матеріалу, що становить 70—80% усіх втрат створюваного напору. Характеристика мережі, що є істотно залежною від якості шихти і профілю робочого простору печі, тісно пов'язана з фізико-хімічними процесами, що протікають у ній. Зазначений опір на шляху руху колошникового газу настільки великий, що найчастіше заважає нормальному опусканню шихти при подальшому збільшенні кількості дуття, тобто сучасна домна, як правило, функціонує на граничному газодинамічному режимі. При аналізі цього режиму для верху печі можна використовувати рівняння, куди входить критерій Du , що відображає співвідношення підпірних сил газового потоку (втрат напору) і сил тяжіння (об'ємної густини твердої фази):

$$Du = c V_{\text{к.г}}^2 \frac{1-f}{f^3} \frac{T_{\text{к.г}} 101,3}{273(P_{\text{к.г}} + 101,3)} \quad (5.14)$$

тут $V_{\text{к.г}}$, $T_{\text{к.г}}$, $P_{\text{к.г}}$ — вихід, температура і надлишковий тиск колошникового газу, $\text{м}^3/\text{хв}$, $^{\circ}\text{C}$, кПа . Величина c у формулі (9.14) встановлюється так:

$$c = \varphi \frac{\rho_{\text{г}}}{F_{\text{кол}}^2 d_{\text{ш}} g \Phi \rho_{\text{ш}}} \quad (5.15)$$

де $F_{\text{кол}}$ — площа поперечного перерізу колошника, м^2 ; $d_{\text{ш}}$ — середньозважений діаметр шихти, м ; Φ — коефіцієнт форми матеріалів.

Для розрахунку коефіцієнта опору шару придатним є співвідношення Ергуна:

$$\varphi = 1,75 + \frac{150(1-f)}{Re} \quad (5.16)$$

Тут $Re = \omega_{к.г} d_{ш} \rho \Phi / \mu_{г} (1-f)$; $\omega_{к.г}$ — швидкість доменного газу на колошнику за нормальних умов, м/с; $\mu_{г}$ — динамічний коефіцієнт в'язкості газу.

Для роботи доменних печей оптимальне значення критерію газодинамічної стійкості Du є набагато меншим за одиницю (становить 0,5-0,6).

З метою збільшення теплової потужності застосовуються різні способи інтенсифікації: відсів дріб'язку і поліпшення якості шихти, визначення раціонального профілю домни і потрібних повітрорудних засобів, підвищення статичного тиску газів у печі і концентрації кисню дуття, вибір шлакового режиму й оптимальних температур для фурменної зони.

Вплив тих або інших факторів на значення $M_{заг}$ можна оцінити за допомогою формули для визначення критерія Du . Так, здрібнювання і стирання шихти (зменшення діаметра куска) утруднює процес опускання матеріалів у протитечії. Максимальну небезпеку зависання має кокс, в якого є більш низька густина.

Розрахунки і практика доменного виробництва показують, що покращення якості шихти (відсів дріб'язку, підвищення міцності й стабілізація гранулометричного складу) є одним з основних факторів, що обумовлюють кількість дуття і теплову потужність печі.

Зростання параметра $M_{заг}$ можна забезпечити підбором газодинамічного режиму в печі: збільшенням статичного тиску й концентрації кисню дуття. У першому випадку підвищується густина газів ρ_t , завдяки чому при тій же масовій подачі повітря зменшуються їхній об'єм, швидкість ω_t і динамічний тиск потоку $\omega_t^2 \rho_t / 2$.

Опір шару матеріалу при проходженні газів пропорційний динамічному тиску. Отже, при його зменшенні в робочому просторі цей опір знижується, полегшується опускання шихти і з'являється можливість збільшити подачу повітря в піч. Сучасна технологія виплавки чавуну з підвищеним тиском газів широко поширена як у вітчизняній, так і зарубіжній практиці.

Збагачення дуття киснем (зменшення баласту, тобто інертного азоту), коли в одиницю часу спалюється більша кількість палива (див. рис. 5.5), дозволяє підняти теплову потужність $M_{заг}$ без збільшення аеродинамічного опору стовпа шихти. В цьому й полягає основна перевага подачі кисню в піч.

У зв'язку з прогресом в області підготовки рудної сировини для виплавки чавуну значимість газодинаміки у верхній (сухій) частини домни як фактора, що лімітує, знижується. У сучасних печах відносна частка нижнього перепаду тиску газів становить 70—75% від усієї втрати їхнього напору. Практика свідчить, що межі, зростання теплової потужності тісно пов'язані з розвитком так званих явищ «захлинання», або зависання, розплаву (шихти). Для математичного опису цих явищ у заплечиках домни використовуються критеріальні співвідношення, отримані експериментально Т.К. Шервудом і Н.М. Жаворонковим і вони застосовуються до низькотемпературних рідин у скрубєрному процесі:

$$K_{nm} = \frac{I}{g_z} \sqrt{\frac{\rho_z}{\rho_{ж}}} = \varphi \left(\frac{\xi \omega_{\delta}^2 \Phi_{y\delta} \rho_z}{f^3 2g \rho_{ж}} \mu_{ж}^{0,2} \right) = \varphi(f_3) \quad (5.17)$$

тут I — густина зрошення, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; g_r — витрата газу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; ρ_r, ρ_p — густина газу і рідини при даній температурі, $\text{кг}/\text{м}^3$; ξ — коефіцієнт опору сухої насадки; $\Phi_{\text{пит}}$ — питома її поверхня, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; μ_p — відносна в'язкість рідини; f_3 — критерій зависання.

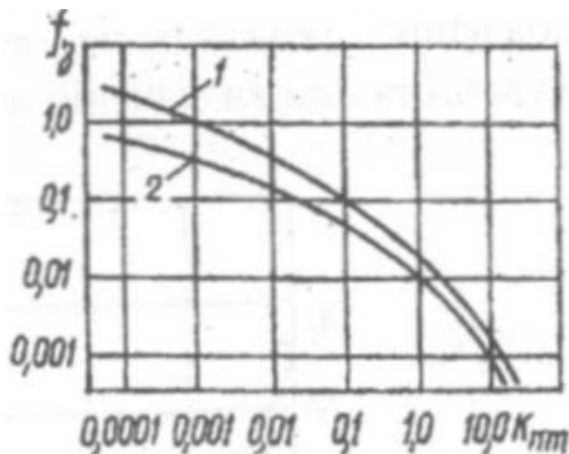
Коефіцієнт ξ може бути визначеним за формулою

$$\xi = 3,8 Re^{-0,2} = 3,8 \left(\frac{\omega_d d}{\nu} \right)^{-0,2}, \quad (5.18)$$

де ω_d — швидкість газу у вільному перетині при даній температурі, $\text{м}/\text{с}$; d — діаметр куска, м ; ν — кінематична в'язкість газів, $\text{м}^2/\text{с}$.

На виникнення явищ «захлинання» дуже впливає збільшення густини зрошення, швидкості руху газів і в'язкості рідини (рис. 5.6). Треба, крім того, враховувати, що такі явища, що розвиваються в доменних печах, відрізняються більшою складністю, ніж у скруберах, тому що вони реалізуються при змінному температурному полі, нерівномірному розподілі газового потоку й хімічній взаємодії стікаючого розплаву (то містить закис заліза) з коксовою насадкою в умовах високого і змінного поверхневого натягу шлаку.

Для підвищення значень $M_{\text{заг}}$ є важливим, щоб теплові режими в доменній печі підтримувалися на рівні, максимально сприятливому для процесів відновлення в твердій фазі. Що доцільніше буде організований теплообмін, тим раніш шихта нагріється до 900°C і тим інтенсивніше, повніше здійсняться названі процеси. Це зменшує вміст монооксиду заліза і кількість первинного шлаку, а також усуває ймовірність зависання розплаву на коксовій насадці.



**Рис. 5.6 - Межі навантаження по газу й рідині в насадках:
1 - крива Шервуда; 2 - крива Жаворонкова**

Розрахунок другого основного енергетичного параметра-коефіцієнта η — пов'язаний з деякими особливостями. Вони полягають у тому, що паливо в доменній печі (на відміну від більшості плавильних і нагрівальних агрегатів) служить не тільки джерелом тепла, але і відновником, безпосереднім учасником технологічного процесу.

В області фурм, як і в газогенераторі, паливо згоряє зрештою до оксиду вуглецю і водню. При нагріванні дуття відбувається регенерація тепла переважно за рахунок хімічної енергії колошникового газу, джерелом якого є те саме паливо, тому формула для розрахунку КВТ має такий вигляд:

$$\eta = \frac{Q_{CO}^p + Q_{\phi}^{dm} + Q_{\phi}^m - Q_{\phi}^{n.з}}{Q_n^p} = \frac{Q_{CO}^p + V_{dm} c_0^{t_{dm}} t_{dm} + c_0^m t_m - V_{n.з} c_0^{t_{n.з}} t_{n.з}}{Q_n^p} \quad (5.19)$$

Тут $Q_{\phi}^{п.с}$ — фізичне тепло продуктів згоряння, що виходять з печі або окремих її зон (у розрахунку на одиницю палива), кДж/кг вуглецю; $V_{дт}$, $V_{п.з}$ — кількість дуття й вихід продуктів згоряння, м³/кгС; $c_0^{t_{dm}}$, c_0^m , $c_0^{t_{п.з}}$ — теплоємність дуття, палива й продуктів згоряння кДж/(м³·град); $t_{дт}$, t_t , $t_{п.з}$ — їхня температура, °С.

Величини $V_{дт}$ і $V_{п.з}$ встановлюються за стехіометрією реакцій неповного горіння палива до оксиду вуглецю й водню. Вихід колошникового газу на одиницю палива, спалюваного на фурмах, і вміст у ньому діоксиду й оксиду вуглецю обумовлюються процесами горіння і відновлення, розкладання карбонатів тощо. Вплив цих параметрів враховується при визначенні не КВТ, а теплового дефіциту.

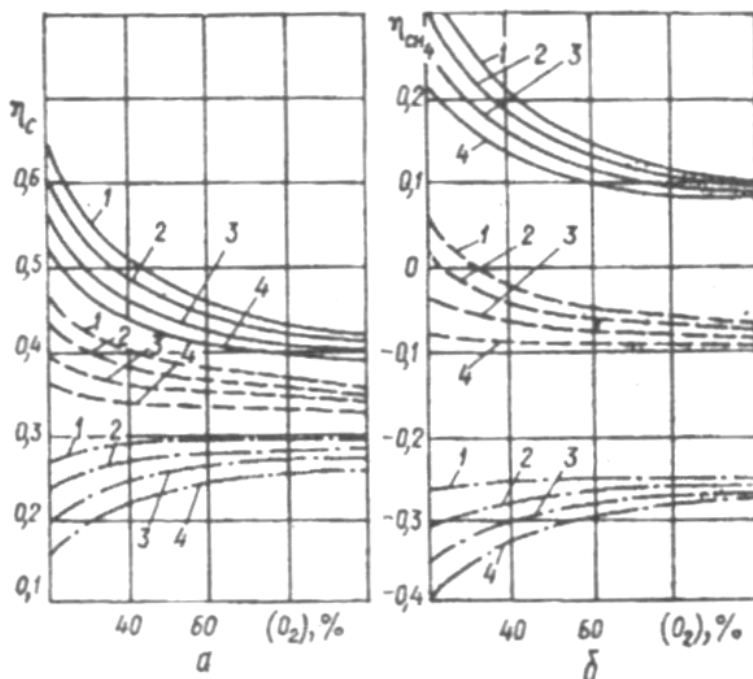


Рис. 5.7 Залежність КВТ вуглецю коксу, нагрітого до 1450°С (а), й холодного природного газу (б) від вмісту кисню дуття в печі при $t_{yx} = 200^{\circ}\text{C}$ (суцільні лінії), нижнього ступеня теплообміну при $t_{yx} = 950^{\circ}\text{C}$ (штрихові лінії) і у фурмовій зоні при $t_{yx} = 1700^{\circ}\text{C}$ (штрихпунктирні лінії).

Температура дуття, °С: 1 — 1600; 2 — 1400; 3 — 1200; 4 — 1000

Теоретичною межею значення η є одиниця, на практиці - найчастіше 0,5—0,6. Шляхом здійснення різних технічних заходів коефіцієнт η можна підвищити до 0,7,

тобто підняти його на 20—40%. До найбільш ефективних засобів належить підігрів повітря й палива. Що більшою є величина КВТ, тим краще використовується теплова потужність доменної печі і тим вищою є її продуктивність.

Хімічний недопал горючих речовин у фурменій зоні — основа технологічного процесу відновлення заліза, тому можливості для зростання КВТ за рахунок зменшення зазначеного недопалу при споживанні окисленої шихти практично відсутні.

Як видно з рис. 5.7, параметр η збільшується на 0,02 при нагріванні повітряного дуття на 100°C. Збагачення ж його киснем позначається тут подвійно: у фурменій зоні при температурі дуття 1000°C і більш КВТ підвищується, а в цілому по печі знижується. Зростання коефіцієнта η в зоні з високими значеннями t полегшує відновлення оксидів кремнію, марганцю й хрому, одержання спеціальних чавунів і шлаків. У цьому ще одна перевага використання кисню.

Оскільки в домну крім коксу додатково подають й інші види палива (природний газ, мазут, вугільний пил), середня величина КВТ обчислюється відповідно до правила адитивності:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta_i, \quad (5.20)$$

де α_i — частка хімічного елементу С по кожному паливу від загальної кількості вуглецю, спалюваного в сухому дутті; η_i — коефіцієнти для різних горючих речовин.

Тепловий дефіцит на тонну продукції Δi — це кількість енергії, яку потрібно передати сирим матеріалам, щоб перетворити їх у готовий кінцевий продукт (чавун і шлак). Що більшою є величина Δi , тим напруженішим є процес виплавки металу й тим меншою є продуктивність печі:

$$\Delta i = \Delta i_{\text{ших}} + \Delta i_{\text{чав}} + \Delta i_{\text{rd}} + \Delta i_{\text{in}} \quad (5.21)$$

тут $\Delta i_{\text{ших}}$, $\Delta i_{\text{чав}}$ — витрати тепла, пов'язані з якістю шихти і сортом виплавленого металу, кДж/т чавуну; Δi_{rd} , Δi_{in} — витрата енергії на пряме відновлення заліза та інші її витрати, кДж/т.

Значення $\Delta i_{\text{ших}}$ й якість шихти залежать насамперед від вмісту в ній заліза й витрат сирого вапняку. При розрахунку величини $\Delta i_{\text{ших}}$ враховується також тепло, що йде на нагрівання вуглецю, спалюваного на фурмах:

$$\Delta i_{\text{ших}} = M_{\text{шл}} c_{t_n}^{t_{\text{шл}}} (t_{\text{шл}} - t_n) + i_C C_{\text{ф}} + Q_{\text{CaCO}_3} + Q_{\text{MgCO}_3} \quad (5.22)$$

де $M_{\text{шл}} c_{t_n}^{t_{\text{шл}}}$ — вихід шлаку й середня теплоємність його складових, кг/т чавуну і кДж/(кг•°C); $t_{\text{шл}}$, t_n — температура шлаку, що випускається з печі, й шихти (початкова), °C; i_C — ентальпія вуглецю коксу у фурменій зоні (звичайно $i_C = 2380$ кДж/кг вуглецю); $C_{\text{ф}}$ — кількість вуглецю, спалюваного в цій зоні, кг/т чавуну; Q_{CaCO_3} , Q_{MgCO_3} — витрати тепла на розкладання карбонатів, кДж/т чавуну.

Показник $\Delta i_{\text{ч}}$, пов'язаний з витратою енергії на фізичне і хімічне нагрівання металу:

$$\Delta i_{\text{ч}} = 1000 c_{t_{\text{ч}}}^{t_{\text{шл}}} (t_{\text{ч}} - t_{\text{н}}) + 52,5 Mn + 235(Si + P) \quad (5.23)$$

тут $c_{t_{\text{ч}}}^{t_{\text{шл}}}$ — середня теплоємність чавуну, кДж/(кг·°C); $t_{\text{ч}}$ — його температура (при виході з печі), °C; 52,5 і 235 — витрати тепла на відновлення Mn і (S + P), кДж/т чавуну.

Показник $\Delta i_{\text{рд}}$ — визначається як

$$\Delta i_{\text{рд}} = 2730 FeO_{\text{ок}} rd, \quad (5.24)$$

де 2730 — витрата тепла на відновлення 1 кг заліза з монооксиду твердим вуглецем, кДж/кг; $FeO_{\text{ок}}$ — вміст окисленого заліза в шихті, кг/т чавуну; rd — ступінь прямого відновлення заліза (по М.О. Павлову).

Величина $\Delta i_{\text{ш}}$ (витрати тепла, наприклад, на нагрівання вуглецю і кисню шихти, що газифікуються в процесах прямого відновлення) при виплавці передільного чавуну становить для нього 40—200 кДж/кг.

З урахуванням споживання енергії на нагрівання матеріалу від 900°C і вище за виразом (5.1) — (5.4) установлюються значення Δi в нижньому ступені теплообміну. Основна частка теплового дефіциту (до 50%) при одержанні передільного чавуну складається з витрат тепла на нагрівання і плавлення шлаку, а також на пряме відновлення заліза. Тому глибоке збагачення руд і застосування металізованої шихти сприяють зростанню продуктивності печі і зменшенню витрати коксу.

Робочий простір домни інтенсивно охолоджується, на що потрібно 2—5% величини $M_{\text{заг}}$. На саму ж систему охолодження припадає 91—97% усіх утрат тепла камери печі. Витрата енергії конвекцією, випромінюванням і теплопровідністю через фундамент становить 3—9%.

Основна частина досліджуваних утрат (до 50%) зосереджена в області повітряних фурм, а всього у високотемпературній зоні (черинь, горно, заплечики тощо) втрачається 70—90% тепла.

5.4. Основи технології процесів виробництва сталі

Загальна характеристика процесів. Сталлю називаються сплави заліза з вуглецем і іншими домішками, у яких вміст останнього не перевищує 2,14%. Технологічні й експлуатаційні властивості сталі визначаються в першу чергу її хімічним складом, тобто наявністю тих або інших компонентів, що додають металу різних властивостей. Ті самі елементи можуть виявляти себе як корисні або шкідливі. Але такі домішки, як сірка, фосфор, миш'як і розчинені в металі гази (азот, водень, кисень), найчастіше погіршують якість сталі, і їхню концентрацію потрібно зводити до мінімуму.

В наш час існують два принципово різних шляхи одержання сталі - прямі і передільні. У першому випадку, коли вона виплавляється безпосередньо з залізної

руди, виключається доменний процес і не застосовується кокс. Відновником служить або природний газ, або енергетичне вугілля. В умовах постійно зростаючої вартості коксу це є великою перевагою.

У загальному вигляді існуюча технологія прямого одержання сталі полягає у твердофазному відновленні багатой залізної руди, концентрату або залізородних окатишів при температурах 700 - 1000⁰С природним газом або вугіллям у шахтних або обертових печах. Підготовлений для подальшої обробки матеріал містить деяку кількість оксидів заліза (близько 10%) і пустої породи, тому, щоб утворилася сталь потрібного хімічного складу, даний матеріал переплавляють (переважно в електродугових печах) з метою відділення металу від шлакової фази і коректування його складу добавками різних елементів.

Наскрізні енерговитрати в розглянутому процесі досягають 1700 - 1850 МДж/т сталі. В наш час у такий спосіб виготовляється близько 5% від загального її обсягу. У перспективі ж цей показник буде зростати. Розвиток прямого одержання сталі стримується через порівняно високі питомі капітальні витрати на спорудження заводів, через великі енергетичні й експлуатаційні витрати.

Основна маса сталі в наш час виготовляється в рідкому вигляді передільними способами. Сировиною служать чавун і металобрухт. Сталь одержують при високих температурах, що забезпечує високі швидкості процесів і значну продуктивність агрегатів, яка досягає кількох сотень тонн металу за годину.

У металургійній промисловості водночас застосовуються різні передільні способи - киснево-конвертерний, мартенівський і електросталеплавильний. На їхню частку припадає відповідно 35, 50 і 15% виробленого металу. Пропорції в даному випадку визначаються сировинною базою, енергетикою, розвитком суміжних областей і вимогами до якості сталі. Між тим, повсюдно зафіксовано розширення киснево-конвертерного й електросталеплавильного виробництва. Ідентичність початкових і кінцевих умов для різних передільних способів (структури і складу шихтових матеріалів, готового продукту - сталі) і приводить до того, що в кожному з них потрібно вирішувати ті самі задачі:

щодо рафінування - видалення із шихти надлишкового вуглецю і шкідливих домішок, очищення металу від газів і неметалічних включень, одержання заданого складу сталі;

щодо теплотехніки - розплавлювання або розчинення твердої частини завантажуваних матеріалів і нагрівання рідкої ванни (металу й шлаку) до температури, яка забезпечує нормальні умови розкислення, легування, позапічної обробки і розливання сталі.

Різні інженерні розв'язання цих задач характеризують той або інший передільний спосіб. У конвертерах (бесмерівських, томасівських, кисневих) рафінування здійснюється продувкою рідкого чавуну повітрям, технічним киснем, окислювальними газовими сумішами. Нагрівання ванни і розплавлювання твердих компонентів шихти відбуваються головним чином за рахунок тепла екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну (вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору) і невеликої кількості заліза. Зовнішні джерела тепла практично не використовуються. Виключення становлять деякі варіанти технології киснево-конвертерного процесу.

Окислення домішок і нагрівання ванни в конвертері відбувається зі значною швидкістю, що забезпечує високу продуктивність агрегату, малу тривалість циклу плавки і, як наслідок, низькі питомі тепловтрати. Швидкість технологічних процесів визначається в основному інтенсивністю підведення окисника.

У подових процесах (мартенівські і дугові електропечі) окислення домішок реалізується завдяки присадкам залізної руди і кисню газової фази агрегату, дифундованому через шар шлаку в метал. При сучасній технології ці процеси інтенсифікуються вдуванням кисню у ванну.

Нагрівання останньої і розплавлення твердої частини шихти здійснюються переважно за рахунок зовнішніх джерел тепла: у мартенівських печах - факелом, а в електродугових - вольтовою дугою.

Продуктивність подових агрегатів визначається звичайно інтенсивністю нагрівання ванни.

Використовуючи класифікацію за типовими режимами теплової роботи металургійного устаткування, можна дійти висновку, що конвертерні агрегати належать до автогенних печей - теплогенераторів, а мартенівські - до розряду теплообмінників. Тому, незважаючи на спільність технологічних завдань, теплові режими в кожному випадку істотно відрізняються, що врешті-решт відбивається на техніко-економічних показниках (продуктивності, видаткових коефіцієнтах шихтових матеріалів, кисню, палива тощо), а також на якості одержуваної сталі. Ця обставина, крім того, обумовлює різний підхід до оптимізації досліджуваних процесів.

Шихтові матеріали сталеплавильних процесів. Ці матеріали підрозділяються на металеві і неметалеві. Перші з них (чавун, сталевий брукхт, скрап і феросплави) є основою для одержання сталі, а другі, тобто тверді окисники (залізна руда, агломерат, окалина тощо) шлакоутворювальні (вапно, вапняк) і флюси (плавиковий шпат, боксит тощо), служать для формування шлаку з потрібними фізико-хімічними властивостями і для рафінування металу.

Тип сталеплавильного виробництва визначає деякі розбіжності у вимогах до шихти, її структури і складу. Однак для киснево-конвертерного і мартенівського способів зазначені вимоги багато в чому ідентичні.

У розглянутих процесах використовується передільний чавун марок М-2 і М-3 у рідкому вигляді, а в окремих випадках мартенівського виробництва - і в твердому. Концентрація таких домішок, як кремній, марганець, сірка і фосфор, нормується. Вміст вуглецю в передільному чавуні (звичайно 4-4,6%) не регламентується, оскільки він залежить від температури цього металу і наявності інших компонентів.

Технологічна роль домішок пов'язана з їхнім впливом на хід сталеплавильного процесу. Наприклад, при окисненні кремнію утворюється оксид SiO_2 , що руйнує футеровку основних агрегатів і для нейтралізації якого потрібні присадки вапна або вапняку. Отже, високі вмісти кремнію в передільному чавуні є небажаними. Утрудненим є також одержання сталі потрібної якості при вихідній концентрації сірки і фосфору в шихті відповідно більше 0,05 і 0,2%.

Енергетична роль чавуну, особливо важлива при конвертерних способах, визначається фізичним (ентальпія) і хімічним (домішки) теплом, яке міститься в

ньому. Рідкий чавун з температурою 1300°C вносить у сталеплавильний агрегат близько 1200кДж/кг . При підвищенні (зменшенні) параметра t на 100°C ентальпія змінюється на 84кДж/кг .

Найбільш повне значення чавуну в енергетиці сталеплавильного процесу може характеризуватися величиною теплового еквівалента, враховує ентальпію і тепло, виділене при окисленні домішок. Так, для кремнію, розчиненого в рідкому залізі, даний ефект становить: при окисленні газоподібним киснем $827,7\text{кДж/моль}$; оксидами Fe, що містяться в шлаку, $351,7$; киснем, що є в розплаві, $593,8\text{кДж/моль}$. Тому тепловий еквівалент чавуну того самого хімічного складу і тієї самої температури буде різним залежно від виду застосовуваного окисника.

У конвертерах рафінування здійснюється в основному газоподібним технічно чистим киснем. Тепловий еквівалент чавуну максимальний і становить $1900\text{—}2000\text{кДж/кг}$, що дозволяє як охолодник переробляти до 28% металобрухту. У бесемерівському і томасівському процесах при продуванні чавуну повітрям частина тепла витрачається на нагрівання азоту дуття, внаслідок чого немає надлишку енергії, яку можна було б використовувати для переплавки брухту.

При мартенівському способі для рафінування металу застосовують тверді речовини, що істотно знижує прихід тепла окислення домішок чавуну. Інтенсифікація плавлення продуванням ванни киснем, доцільна тут з точки зору енергетики процесу, на практиці призводить до падіння питомої витрати палива як за рахунок зменшення сумарних тепловтрат металургійного устаткування, пов'язаного зі скороченням тривалості плавлення, так і за рахунок збільшення приходу названого вище тепла.

Вид застосовуваного окисника істотно позначається на ролі різних домішок чавуну в тепловому балансі. При використанні твердих матеріалів, що містять оксиди заліза, відчутний ефект дають кремній і фосфор. Значення інших елементів у даному випадку нівелюється. При рафінуванні технічно чистим киснем більше половини хімічного тепла виділяється внаслідок окислення вуглецю.

Металобрухт споживається як вторинна сировина, що дозволяє знизити витрати на виробництво сталі. По своєму забрудненню, окисленості і наявності домішок він має відповідати вимогам до якості сталі, енергетиці процесу (частка в шихті, характерний розмір), організації виробництва (густина, насипна вага, габарити) і техніці безпеки (вибухобезпечність).

У конвертерах брухт виконує специфічну функцію охолодника. Його частка в шихті визначається тепловим балансом. У подових процесах із зовнішніми джерелами енергії теоретично така частка є необмеженою. Наприклад, окремі варіанти технології мартенівського виробництва карбюраторний або скрап-вугільний) можуть бути здійснені з застосуванням самого металобрухту. Однак з урахуванням продуктивності мартенівських печей і якості сталі оптимальний його вміст у шихті при найбільш поширеному скрап-рудному процесі становить $30 - 50\%$.

Феросплави (Fe - Mn, Fe - Si, Fe - Cr тощо) застосовуються для розкислення і легування сталі, що забезпечує одержання продукції заданих властивостей.

До неметалічної шихти ставляться вимоги, пов'язані з її технологічним призначенням. Витрати цих матеріалів невеликі: звичайно не перевищують 10% від

маси металу. Однак їхні присадки можуть істотно впливати на теплову роботу агрегату, оскільки дисоціація оксидів і карбонатів супроводжується значною витратою тепла. Так, при 1400⁰С 1кг Fe₃O₄ «охолоджує» ванну на 5500кДж, а 1кг Fe₂O₃ - на 5800кДж. Охолоджувальний ефект присадки руди, окалини або вапняку в 4 - 4,5 рази більший, ніж такої ж кількості металобрухту.

5.4.1. Шлаки сталеплавильних процесів

Технологічне призначення шлаку, джерелами утворення якого є оксиди, що формуються при окисленні домішок рідкої ванни, а також неметалічна шихта, забруднення брухту, матеріал футеровки, що руйнується, і інші речовини, полягає в рафінуванні сталі від шкідливих елементів. У подових процесах до металу через цей розплав передається кисень газової фази. Оскільки шлак асимілює неметалічні включення він повинен мати певні фізико-хімічні властивості, відповідні його призначенню.

Основні шлаки сталеплавильного виробництва складаються з оксидів CaO, MgO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, FeO і Fe₂O₃. Можлива наявність у малих кількостях ряду інших подібних речовин. Головні виробничі характеристики в даному випадку - основність шлаку, його окисленість і в'язкість. Ці параметри найбільшою мірою відбиваються на технологічному процесі.

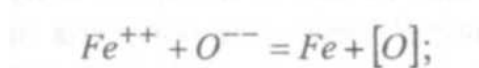
Основність шлаку - величина, що характеризує співвідношення в ньому основних і кислих оксидів. Найчастіше вона представляється у вигляді CaO/SiO₂. Можливі й інші вираження для неї. Розрізняють кислі, низькоосновні й високоосновні шлаки. Для підвищення названої величини в агрегат уводяться присадки вапна або вапняку. Наприкінці сталеплавильного процесу шлак повинен мати основність 2,5 - 4, що сприяє зниженню в металі концентрацій сірки і фосфору.

Окисленість, показником якої є вміст у шлаку оксидів заліза, характеризує його здатність передавати металу кисень, у подових агрегатах регулюється присадками залізної руди, а при продуванні металу киснем - за рахунок режиму подачі дуття.

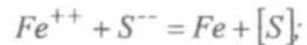
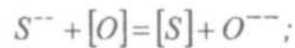
Відповідно до сучасних понять про природу розплавленого шлаку оксиди, що його складають, дисоційовані на іони з позитивними і негативними зарядами - частки (а не електронейтральні молекули), що являють собою найпростіші структурні одиниці. Іонну будову шлаку

підтверджено експериментально його високою електропровідністю й електролізом, наявністю стрибка електричного потенціалу на міжфазній границі метал - шлак та інші дані.

Іонна теорія стверджує, що в основних сталеплавильних шлаках знаходяться катіони металів Fe²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ і Mn²⁺, а також аніони O²⁻, S²⁻, SiO₄⁴⁻, PO₄³⁻ тощо. Хімічні властивості шлаку визначаються активністю іонів, що його складають. Взаємодію між металом і шлаком можна зобразити рядом стехіометричних рівнянь: перехід кисню зі шлаку в метал:



розподіл відповідно марганцю, сірки і фосфору між металом і шлаком:



Формування в сталеплавильному агрегаті гомогенного рідкого шлаку з заданими фізико-хімічними властивостями, будучи багатостадійним, включає як ланки теплоперенесення (прогрівання холодних кусків неметалічної шихти), так і дифузійні. В основі шлакоутворення лежать процеси розчинення чистого вапна (CaO), а не його плавлення, оскільки для цього потрібно близько 2600⁰С, що значно перевищує температури в робочому просторі сталеплавильних агрегатів.

Петрографічні дослідження кусків CaO, вилучених з рідкого шлаку, дозволяють виявити їхню структуру в процесі розчинення. При невеликому часі витримки такого куска в шлаку центральна зона представлена чистим вапном. Ближче до периферії розташовані ділянки, просочені оксидами заліза і марганцю, концентрація яких до поверхні зростає і поступово переходить до твердих розчинів системи FeO - MnO -CaO. Поверхневий шар містить евтектичні сполуки з температурами плавлення, близькими до температури шлаку.

Отже, процес асиміляції вапна включає дві дифузійних ланки:

- зовнішнє масоперенесення, яке полягає в підведенні до куска оксидів заліза, марганцю й інших розчинників, а також у відводі від цього куска частини CaO (на його поверхні утвориться шлак, насичений вапном);
- внутрішнє масоперенесення, тобто проникнення шлаку в пори й тріщини з подальшою дифузією оксидів у кристалічні ґратки вапна й з утворенням твердих розчинів і легкоплавких сполук.

Для опису кінетики процесів, лімітованих зовнішньою масопередачею, М.Я. Меджибожський запропонував рівняння

$$\frac{d(CaO)}{d\tau} = \beta_{(CaO)} [(CaO)_{нас} - (CaO)] \frac{F}{V} \quad (5.25)$$

де (CaO)_{нас}, (CaO) - концентрації вапна на поверхні її куска й у шлаку; $\beta_{(CaO)}$ - коефіцієнт масопередачі; F - сумарна поверхня вапна; V - об'єм шлаку.

Якщо процес лімітується внутрішнім масоперенесенням, масу речовини, що перейшла з об'єму шлаку в кусок вапна за відомий проміжок часу, можна розрахувати, розв'язавши задачу нестационарної дифузії (рівняння другого закону Фіка). Для кулястих кусків

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (5.26)$$

тут C - концентрація речовини, що дифундує; D - коефіцієнт дифузії; r - відстань від центра сфери.

5.4.2 Матеріальний і тепловий баланси сталеплавильного процесу

Вони складаються з метою визначення питомих витрат сировини, вогнетривів, палива й інших енергоресурсів, потрібних для одержання даного сортаменту металу. Розрахунок ведеться на одиницю готової продукції або 100кг шихти. При цьому фіксується тільки початковий і кінцевий стан процесів, а не змінення їх у часі.

Для розрахунків матеріальних балансів складається система відповідних рівнянь, де кожне з них - за одним якимсь показником: металом, шлаком, киснем, газами. У загальному випадку дана система нелінійна, а рівнянь тут звичайно менше, ніж невідомих. Тому для розв'язання системи задається ряд умов, продиктованих технологією процесу; вони доповнюють потрібне число рівностей, а іноді дозволяють представити систему в лінійному вигляді. Такими умовами для сталеплавильних агрегатів є: склад сировини і готового продукту; експериментально визначені витрати футеровки й інших матеріалів; забруднення металобрухту і чавуну; склад і кількість шлаку, що спускається; розраховані за термодинамічними даними коефіцієнти розподілу домішок тощо.

Кожний балансовий вираз має дві частини - прихід і витрату, прирівняні між собою. Розв'язання всієї системи дозволяє визначити витрати кисню або інших окисників, шлакоутворювальних матеріалів і футеровки потрібних для одержання металу заданої властивості, а також вихід сталі, кількість шлаку і газів, що утворюються.

У табл. 5.1 наведено результати розрахунків матеріальних балансів конверторної і мартенівської плавки на чавуні постійного складу без використання кисню і з комбінованим його застосуванням. Характерним є, що заміна твердих окисників (руди) технічно чистим киснем викликає зниження виходу рідкої сталі.

При розрахунку теплових балансів (табл. 5.2) мали на увазі матеріали, зазначені в попередній таблиці. Порівнявши отримані результати, визначаємо, що прихід тепла за рахунок екзотермічних реакцій у мартенівській печі майже в два рази менший, ніж у конверторі.

Таблиця 5.1
Матеріальні баланси плавки до розкислення

Стаття приходу	Мартенівський процес*, кг	Киснево-конверторний процес	Стаття витрат	Мартенівський процес*, кг	Киснево-конверторний процес, кг
Рідкий чавун	65	78	Сталь	$\frac{100,861}{94,749}$	90,416
Металобрухт	35	22			
Вапно	$\frac{1,218}{0,794}$	6,692	Шлак	$\frac{10,782}{9,782}$	11,852
Вапняк	<u>4,5</u>	—	Димові гази	<u>7,522</u>	8,58

	3,716			7,705	
Руда залізна	<u>10,64</u> 0	—	грати заліза: зі шлаком, 3 викидами, 3 димом	— — —	0,5 1,0 2,132
Кисень газової фази_	<u>1,834</u> 1,198	—		<u>119.164</u> 112,236	
Технічний кисень	<u>0</u> 3.171	7,28	*Чисельник - без використання кисню, знаменник - і комбінованим його застосуванням (скран-рудний процес)		
Боксит	<u>0,4</u> 04	—			
Плави́ко-вий шпат	—	0,2			
Фу́теровка й заправні матеріали	<u>1,75</u> 1,75	0,3			
	<u>119,164</u> 112,237	114,48			

Таблиця 5.2
Теплові баланси на 1т металошихти

Стаття приходу	Мартенівський процес*, кг	Киснево-конверторний процес, кг	Стаття витрат	Мартенівський процес*, кг	Киснево-конверторний процес, кг
Фізичне тепло чавуну	0,777	0,932	Тепловміст: сталі шлаку газів		1,314 0,257 0,190
Тепло екзотермічних реакцій	0,523	0,909		0,214	
Тепло шлакоутворення	0,041	0,048	Відновлення оксидів заліза	0,574	0,016
РАЗОМ	1,341	1,890	Дисоціація карбонатів і випарювання вологи	0,097	0,021
			РАЗОМ	2,541	1,795
			Розбаланс тепла	-1,20	+0,073

*Скрап - рудний процес без кисню

Таблиця 5.3
Порівняння питомих втрат тепла сталеплавильними агрегатами

Статті теплових утрат	Робочий простір мартенівської печі, кВт/т	Кисневий конвертер, кВт/т
Втрати: через кладку випромінюванням (з урахуванням часу в частках від тривалості плавки) на охолодження	5-12 2-6 (0,15х14-40) 8,3-19,6	5-9 11,3 0,5х22,6 10-15
РАЗОМ	15,3-37,6	26,3-35,3

Крім того, у першому випадку рідкий чавун вносить на 20% менше тепла, ніж у другому, що пояснюється більшою його часткою в шихті конвертера (78% проти 65%) і більш високими виграями заліза при рафінуванні газоподібним киснем.

У витратній частині балансу мартенівської плавки другою за значенням величиною є витрати тепла на відновлення оксидів заліза. У великій кількості воно потрібно також на дисоціацію карбонатів. При конверторному виробництві ці статті є незначними.

У цілому для мартенівської печі характерний дефіцит тепла, залежний від частки чавуну в шихті і використання технічно чистого кисню від $0,5 \cdot 10^6$ до $1,5 \cdot 10^6$ кДж/т. Сюди не входять тепловтрати робочого простору. Такий стан вимагає введення додаткової енергії за рахунок спалювання палива.

Для киснево-конверторної плавки прибуткова частина балансу є дещо вищою, ніж витратна (на 2 - 5%), що цілком компенсує тепловтрати агрегату і дозволяє обійтися без додаткових джерел енергії. Однак із збільшенням частки брухту в шихті надходження тепла зменшується і потрібно вживати спеціальних заходів для покращання теплового балансу (докладно дане питання розглядається нижче).

Великий вплив на процес одержання сталі мають теплові втрати - через кладку, на охолодження окремих елементів, випромінюванням через відкриті елементи агрегату (горловину конвертера, завальовальні отвори тощо). Сумарні втрати тепла за плавку в цілому пов'язані з її тривалістю. Тому становить інтерес порівняльна оцінка питомих (на тонну в одиницю часу) тепловтрат різних агрегатів.

Із зіставлення результатів розрахунку, наведених у табл. 5.3, видно, що втрати тепла робочим простором мартенівської печі й кисневим конвертером практично однакові. Розбіжність величин загальних тепловтрат за плавку пов'язана з продуктивністю агрегатів.

Дефіцит тепла сталеплавильного устаткування

$$Q_{m.д} = M\Delta q + q_{втр} \tau \quad (5.27)$$

де M - маса плавки; Δq - дефіцит тепла; $q_{втр}$ - питомі тепловтрати; τ - тривалість процесу. У цьому рівнянні перший член правої частини залежить від маси M і використовуваних шихтових матеріалів, а другий доданок є тепловтратами і залежить від часу τ .

Для киснево-конвертерного процесу $Q_{т.д} = 0$, звідки

$$M\Delta q = -q_{втр} \tau \quad (5.28)$$

тобто розглянуті втрати мають компенсуватися надлишком тепла.

Останній вираз також показує вплив тривалості плавки на теплову роботу конвертера. У даному випадку інтенсифікація процесу (його скорочення) приводить до зменшення тепловтрат і дозволяє трохи знизити витрату чавуну на тонну сталі.

Для мартенівського процесу $Q_{т.д} > 0$, що обумовлює необхідність введення додаткового тепла від спалювання палива. Однак і тут інтенсифікація плавки

сприяє зменшенню її тривалості і, отже, теплового дефіциту агрегату. На практиці це виявляється в скороченні питомої витрати палива.

5.4.3. Тепло- і масообмін у конвертерній ванні. Характеристика конвертерних процесів і загальна схема теплообміну в конвертерній ванні

Конвертерні процеси ґрунтуються на рафінуванні рідкого чавуну газоподібним окисником, вдуванням під тиском у розплавлений метал. При цьому використовуються повітря суміші окисних газів (CO_2 , H_2O та ін.), а також технічно чистий кисень. У конвертер вони підводяться через днище (тобто знизу), бічну стінку на рівні розплаву і через водоохолоджувану фурму (зверху).

Перший промисловий спосіб, розроблений і здійснений у 1855р. Г. Бесмером, названий ім'ям автора. У цьому процесі чавун з підвищеним вмістом кремнію рафінували в конвертері з кислою футеровкою. Продування велася повітрям через вогнетривкі фурми, встановлені в днище агрегату. Оскільки в кислому процесі є неможливим видалення сірки і фосфору, їхній вміст мав бути низьким (як у готовій сталі), що істотно обмежувало сировинну базу даного способу виплавки сталі.

Для переробки фосфористого чавуну в 1879 р. був запатентований спосіб його продування в конвертері зі смолодоломітовою (основною) футеровкою, що отримав назву томасівського процесу. При його використанні, як і в бесмерівському процесі, чавун рафінували повітрям, подаваним через днище агрегату.

При продуванні повітрям сталь насичується азотом, що знижує ряд її експлуатаційних і технологічних властивостей. Підвищення якості металу, виплавленого в конвертерах, забезпечується заміною повітря технічно чистим киснем. Завдяки такій заміні поліпшується, крім того, тепловий баланс процесу. Використання кисню в металургії, у тому числі і при конвертерному способі, стало економічно доцільним після промислового освоєння високопродуктивних машин для одержання технічного кисню.

В наш час усі конвертери (їхня місткість досягає 400т) працюють на кисневому дутті. Вихідною металошихтою служать передільний чавун і СКАРП, що застосовується як охолодник (частка останнього становить 25 – 28%). На виготовлення 1т сталі потрібно 1100 – 1130кг металошихти.

Для наведення шлаку (його утвориться 10 – 15% від маси металу) використовуються вапно (5 – 8%) і плавневий шпат (0,1 – 0,3%). Питомі величини витрати кисню й інтенсивності продування дорівнюють відповідно 50 – 60м³/т сталі і 2,5 – 5м³/(т·хв). Тривалість плавки 35 – 50хв, у тому числі тривалість продування 12–20хв. Продуктивність конвертерів (залежно від їхньої садки) становить декілька сотень тон готового продукту на годину (до 600т/год).

Існує декілька різних варіантів технології киснево-конвертерного переділу, що відрізняються як складом шихтових матеріалів, так і способом подачі кисню у ванну. У найбільш поширеному варіанті з застосуванням верхнього продування і кускового вапна (LD процес) переробляється звичайно чавун із вмістом фосфору не більше 0,3% і сірки до 0,06%. При переділі фосфористих чавунів ($P = 1,5 - 2,0\%$) для

прискорення шлакоутворення використовується пилоподібне вапно, що вдмухується у ванну зі струменем кисню (процеси LD – AC, OLP).

В останні роки набули поширення конвертери з донною подачею кисню в оболонці рідкого або газоподібного палива (O-bor, LWS) комбінованим донно-верхнім підведенням окисників, а також з верхнім продуванням і подачею нейтрального газу через донні фурми або пористі вогнетриви в днище агрегату.

Підведення окисного або нейтрального газу через дно конвертера значно інтенсифікує переміщення ванни, що дозволяє дещо підвищити техніко-економічні показники сталі: на 1 – 2% знижується споживання металошихти, зменшується витрата феромарганцю для розкислення тощо.

Основу технології киснево-конвертерного рафінування становлять фізико-хімічні процеси, що можуть бути описані рівняннями тепло- і масопереносу і хімічних реакцій. Створення відповідної математичної моделі й алгоритму її розв'язання потрібні для надійного керування виготовленням сталі шляхом розробки систем автоматизації, а також для визначення можливостей інтенсифікації процесу й оптимізації його техніко-економічних показників.

У загальній постановці задача включає систему диференціальних і алгебраїчних рівнянь з відповідними початковими й граничними умовами. Це рівняння:

матеріального балансу (з урахуванням фізико-хімічних перетворень у ванні, джерел і стоків речовини, молекулярної і турбулентної дифузії);

такі, що описують гідродинаміку рідкої (метал, шлак) і газової фаз;

теплого балансу (з урахуванням усіх видів передачі енергії, її джерел і тепловтрат);

такі, що описують стехіометрію і кінетику хімічних реакцій на основі істинного механізму процесів рафінування.

Для визначення граничних умов потрібні дані про гідродинаміку потоків в об'ємі ванни, про температури металу, шлаку і газу в різних її ділянках, про місце переважного протікання і швидкості хімічних реакцій про кількості тепла, що виділяється і поглинається, фізико-хімічні властивості металу, шлаку і газу, про їхні зміни у часі тощо. Мати в своєму розпорядженні в повній мірі таку інформацію дуже важко, та й сама система рівнянь є надто громіздкою. Тому при розробках алгоритмів схем автоматичного керування і для аналізу всього процесу плавки використовуються спрощені моделі й окремі часткові розв'язання. Подібні моделі створюються на базі експериментальних даних.

У конвертерній ванні можна виділити кілька зон, що істотно відрізняються як за характером фізико-хімічних процесів, так і за умовами тепло- і масообміну. Це - зона взаємодії кисневого струменя з металом, інший об'єм рідкої ванни і шлакова фаза.

5.4.4. Шляхи збільшення частки металобрухту в конвертерному процесі

Основним напрямом удосконалення структури сталеплавильного виробництва є заміна мартенівських печей кисневими конвертерами, що веде до зростання продуктивності праці, покращання якості металу, зниження капітальних витрат.

Значна відмінність в складі шихтових матеріалів викликає ряд проблем, що стосуються паливно-енергетичної бази.

В наш час частка використовуваного металобрухту при мартенівській плавці становить 40 - 50%, а при киснево-конвертерної - лише 24 - 28% (інша частина - чавун).

Отже, якщо механічно замінити сталь, виплавлену в мартенівських печах, на конвертерну, виникнуть дефіцит чавуну і надлишок брухту. Треба також враховувати, що вартість останнього в півтора-два рази менша, ніж чавуну. Тому одна з основних задач удосконалювання конвертерного процесу - підвищення частки брухту в шихті до 40% і більше. Кількість брухту, що може бути перероблений в конвертері, визначається приходом відповідної енергії, тісно пов'язаним з фізичним теплом шихтових матеріалів і тепловим ефектом реакцій окислення домішок і заліза. Тепловтрати агрегату істотно позначитися на долі брухту в шихті не можуть, оскільки вони малі (2 - 4%). Збільшенню частки брухту в шихті сприяє підвищення тепломісткості вихідних матеріалів плавки: чавуну, брухту, газоподібного кисню і неметалічної частини шихти.

Підвищення тепломісткості чавуну, що заливається в конвертер, можна досягти за рахунок більш високої температури випуску металу з домни (потрібно додаткова витрата коксу), зниження втрат тепла при передачі рідкого чавуну від однієї установки до іншої або шляхом використання спеціальних печей для його підігріву. Збільшення температури 1т чавуну на 100⁰С дозволяє додатково переробити близько 33кг брухту.

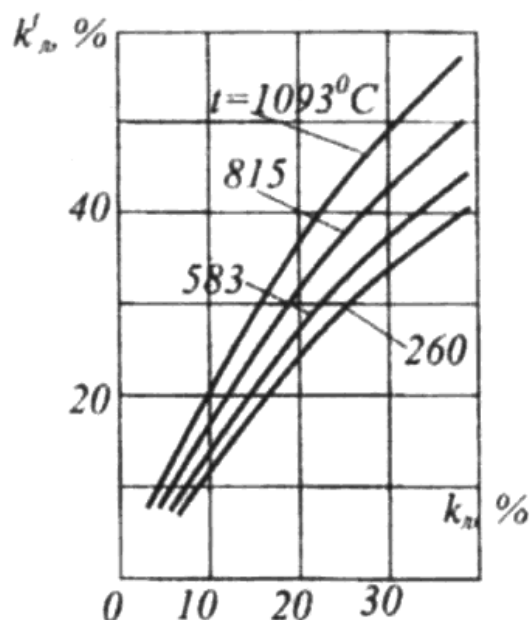
Практика сучасного сталеплавильного виробництва свідчить, що при перегріві чавуну на 220⁰С споживання скрапу зростає на 20%, а продуктивність конвертерів - на 10,5% (без збільшення хвилинної витрати кисню за рахунок зниження маси домішок у шихті).

Ефективність підігріву скрапу, завантажуваного в конвертер (Рис. 5.8), можна оцінити по формулі

$$k_{\text{л}}^t = Q_{\text{надл}} / (q_{\text{охол}} + Q - ct), \quad (5.29)$$

де $k_{\text{л}}^t$ - частка брухту в шихті, %; $Q_{\text{надл}}$ - надлишкове тепло процесу, кДж/100 кг чавуну; $q_{\text{охол}}$ - охолоджувальний ефект брухту, кДж/кг; t - температура його підігріву, ⁰С

Рис. 5.8 Вплив температури нагрівання скрапу (цифри на кривих) на його частку в металевій шихті



Ефективність нагрівання газо-подібного кисню незначна через порівняно малу питому його витрату 50 - 60м³/т) і труднощів чисто технічного порядку, що виникають при

нагріванні. Доведення температури вапна до 1000°C дозволяє додатково переробити 28 - 38 кг/т скрапу.

Іншим напрямком підвищення частки брухту в шихті є розширення прибуткової частини теплового балансу за рахунок маси домішок чавуну, що окисляються, або додатково введених у конвертер кальцію, кремнію, твердого палива.

Збільшення концентрації в чавуні кремнію на 0,1% з урахуванням більшої витрати вапна (для забезпечення сталості основності шлаку) і інших факторів дає можливість додатково переробити 1,5 кг/т сталі. Слід зазначити, що при вмісті кремнію більше 0,9% звичайно зменшується вихід готового продукту, тому що зростає кількість шлаку. Введення в конвертер марганцю приносить істотно менший ефект (до того ж даний метал належить до числа дефіцитних). Вуглець чавуну, навпаки, відіграє важливу роль у тепловому балансі. Його вміст визначається температурою випуску і наявністю інших домішок. Однак варіювати цим параметром складно.

При окисленні карбідів кальцію і кремнію у ванні виділяється тепло - відповідно 13490 ($\eta = 55 - 57\%$) і 24200 кДж/кг ($\eta = 74 - 76\%$), що дозволяє збільшити масу плавки на 9,3 і 14,4 кг металобрухту. При використанні даних речовин ступінь, засвоєння яких близький до 100% підвищується витрата кисню на тонну сталі, а застосування карбідів кремнію вимагає додаткових витрат вапна і приводить до зростання кількості шлаку. Економічна доцільність при цьому визначається співвідношенням у вартості чавуну, брухту і названих матеріалів.

Введення в конвертер твердого палива, звичайно недефіцитного енергетичного вугілля (кусками або у вигляді порошкоподібного продукту), еквівалентно підвищенню середнього вмісту елемента С в шихті. Основні вимоги до вугілля - низький вміст сірки (менше 0,5%) і мала зольність. Ступінь його засвоєння ванною (отже, і ефективність застосування) багато в чому обумовлюється способом уведення. Дослідження показали, що спочатку йде розчинення вуглецю в рідкому металі, а потім окислення в процесі продування. Найкраще засвоєння твердого палива (до 100%) досягається при надходженні його у вигляді порошоків. Найбільш простим способом є його подача кусками по тракту сипучих матеріалів при завалці брухту. У випадку використання вугілля зростає питома витрата кисню і вапна, що викликає деяке збільшення тривалості продування. Подача в конвертер 1 кг твердого палива забезпечує додаткову переробку 4 - 5 кг металобрухту.

Для вугілля марки АС показник КВП дорівнює 21,5 - 25% (залежно від температури процесу і ступеня згоряння CO до CO_2). Низьке значення КВП пов'язано з хімічним неповним спалюванням (недопалом) (окислення вуглецю практично тільки до CO) і високою температурою газів, що відходять ($1300-1600^{\circ}\text{C}$).

Покращання структури теплового балансу можливе також за рахунок використання в процесі конвертерної плавки зовнішніх джерел енергії - продування металу паливно-кисневим факелом і допалювання газів, що відходять, у порожнині агрегату. У першому випадку забезпечується поєднання рафінування і підігрівання ванни внаслідок спалювання палива (природного газу, мазуту) і з'являється можливість впливу факела на процеси димо- і шлакоутворення. Позитивним тут

варто вважати і деяке підвищення частки брухту в шихті. Проте, як показує аналіз результатів досліджень у лабораторних і промислових умовах, використання палива при цьому є неефективним. Величина КВП для природного газу становить лише 8 - 10%, а для мазуту 15 - 20%, що пов'язано з великим хімічним недопалом (65 - 75%) і високим фізичним теплом газів, що відходять (~15%).

Для одержання значного збільшення в кількості перероблюваного брухту, потрібно підвищити витрату дефіцитного природного газу або мазуту. Але тоді збільшується димоутворення, а при обмеженій пропускній здатності газовідвідного тракту знижується продуктивність конвертерів. У цілому, на думку окремих дослідників, паливно-кисневе продування ванни як метод покращання теплового балансу є економічно недоцільним.

Гази, що відходять з конвертера, несуть із собою великий запас хімічного тепла (~90% CO), використання якого в робочому просторі агрегату за рахунок допалювання CO до CO₂ киснем може забезпечити підвищення частки брухту в шихті. З цією метою застосовують спеціальні бічні або двох'ярусні фурми. В останніх сопла нижнього ярусу призначені для продування ванни, а верхнього - для вдування кисню. Недоліками такого способу є погана теплопередача від факела до ванни через шар спіненого шлаку і його підвищена окисленість, а також посилений знос стін конвертера під впливом зростаючих температур.

Доцільність технологічного споживання тепла газів, що відходять, очевидна, що викликає активний дослідницький пошук у даному напрямку. Добрі результати отримані при комбінованому донно-верхньому продуванні.

Ефективність використання різних видів палива і продуктів горіння для збільшення приходу тепла в конвертері можна оцінювати показником КВП, з огляду на те, що паливо спалюється в контакті з рідкими металом і шлаком при температурах 1200—1700⁰C, тобто коли відбувається майже повна дисоціація CO₂ (на 80 - 90%) і H₂O (на 70 - 80%). Продуктами згоряння в таких умовах будуть в основному окис вуглецю і водень.

Отже, досліджуваний процес характеризується значним ступенем хімічного недопалу і високою температурою диму. Дані про розрахунки КВТ (виконані В.М. Баптизманським і співробітниками) для конвертерної ванни наведено в табл. 5.4.

Кожний з розглянутих шляхів підвищення частки скрапу в шихті має свої переваги і недоліки технологічного або конструктивного плану.

Таблиця 5.4

Можливі значення КВП різних видів палива в конвертерній ванні

Вид палива	Значення КВП, при середній температурі конвертерних газів, °C					
	1400	1450	1500	1400	1450	1500
	$\alpha=0,9; \beta=0,7$			$\alpha=0,85; \beta=0,7$		
Природний газ (метан)	8,45	8,00	7,00	9,96	9,25	8,66
Пропан	13,18	12,52	11,89	15,17	15,00	14,32
Мазут марки МП	14,86	14,27	12,85	17,14	16,56	15,97
Антрацит марки АС	22,47	21,95	21,42	24,90	24,93	23,93
Твердий вуглець	23,18	22,70	22,29	26,43	26,00	25,53
Карбід кальцію	55,60	55,38	55,00	57,50	57,20	56,80
Карбід кремнію	75,00	74,80	74,60	76,20	76,00	

У промисловості ці методи впроваджуються комплексно, для того щоб отримати максимальний ефект. Наприклад, застосовуються: підігрівання металобрухту до температур 500 - 600⁰C (забезпечуються високі показники КВН і вимагаються невеликі витрати часу); часткове допалювання окису вуглецю в порожнині конвертера; введення малих кількостей (1-3%) вугілля в агрегат. При незначних добавках твердого палива спрощується рішення питання десульфурації металу, а тривалість продування збільшується лише на 2 – 3 хв, що в цілому прийнятно. Завдяки комплексним заходам частка брухту в шихті зростає до 40%.

6 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ

6.1. Призначення та параметри нагрівання сталі. Якість нагріву, види браку

Цілі і завдання. Нагрівання (підвищення внутрішньої тепломісткості) сталевих виробів, що є однією з найважливіших операцій виробничого процесу, здійснюють або перед їхньою гарячою обробкою тиском (прокаткою, куванням), або при термічній обробці відповідно до мети додавання матеріалові необхідних пластичних або технологічних властивостей.

Якісним нагріванням сталі вважається таке нагрівання, при якому забезпечуються задані кінцеві температурні параметри і немає браку металу. Під названими параметрами варто розуміти досягнення матеріалом у момент його видачі з печі необхідних значень t як на поверхні тіла, так і по перетині. Вибір цих параметрів залежить від хімічного складу сталі і конкретних технологічних завдань. Наприклад, при нагріванні металу під термічну обробку одна з необхідних вимог полягає в одержанні мінімального кінцевого перепаду температур по перетині заготовки. У протилежному випадку виникне брак, зумовлений незавершеністю структурних перетворень по всій товщині металу. Тому велике значення має точність нагрівання.

При підвищенні внутрішньої тепломісткості виробів, що нагріваються, перед обробкою тиском температура їхньої видачі з печі встановлюється за діаграмою стану залізо — вуглець з урахуванням технологічних обмежень. Верхню межу припустимих температур нагрівання сталі вибирають на $100 - 150^{\circ}\text{C}$ нижче від лінії солідуса, що пов'язано з небезпекою перегрівання і перевитрати металу. Причому, чим більший процентний вміст вуглецю в ньому, тим меншою має бути величина t . Нижню межу зазначених температур звичайно вибирають з умови припустимих температур кінця прокатки з урахуванням усіх можливих втрат тепла в навколишнє середовище впродовж усього процесу пластичної деформації.

Отже, для кожної марки сталі і для кожного виду обробки тиском існує визначений діапазон температур, за межами якого нагрівання сталі є неприпустимим. Для маловуглецевих сталей цей діапазон є ширшим, ніж для високовуглецевих і високолегованих. Тому вибір температурного рівня нагрівання металу — одне з важливих завдань розглянутого технологічного процесу.

Не менш важливо забезпечити задану рівномірність нагрівання сталі перед обробкою тиском. Неоднакова тепломісткість за обсягом металу в ході прокатки призводить до наступного: по довжині заготовки — до її різнотовщинності (ділянки з великими значеннями t витягаються сильніше), по ширині — до серповидності або скручування розкату, а по перетині — до того, що більш нагрітий бік подовжується швидше і метал згинається.

Практично сталь перед прокаткою видають з таким ступенем нерівномірності нагрівання, при якому забезпечується необхідна якість готової продукції. Перепади температур по перетині тіла, вибір яких залежить від виду обробки, марки металу й інших чинників, можуть складати від 100 до 300°C на 1 м товщини матеріалу, що

нагрівається. Наприклад, такі перепади мають бути мінімальними при прошиванні й обробці високолегованих сталей (через великі опори деформації), а максимальними — при куванні і штампуванні маловуглецевих марок.

Основними видами браку при тепловій обробці металу є його недогрів, перегрів і перепал. Недогрів — результат низької температури на поверхні тіла або недостатнього вирівнювання значень t по перетині заготовки. Як наслідок, внутрішні шари будуть менш пластичними, ніж зовнішні, а це сприяє виникненню напруг, що приводять до браку у вигляді «кувального хреста», «шпаківень» тощо.

Перегрів — результат тривалої теплової обробки виробів при температурах, що значно перевищують критичну точку A_{c3} . При цьому інтенсивне, утвориться грубозерниста, а іноді великогочаста структура сталі, що викликає ослаблення зв'язків між зернами. Метал стає крихким; при його прокатці можливі тріщини і розривина. Але, навіть, якщо і не виникають подібні дефекти, сталь за своїми механічними властивостями може бути незадовільною.

Перегрів, хоч і є браком, який можна виправити, проте вимагає нових витрат у вигляді термічної обробки (відпалу або нормалізації) або додаткової деформації.

При подальшому зростанні температури (наближенні її до лінії солідус за діаграмою залізо — вуглець) починається часткове оплавлення границь зерен, у результаті чого зв'язок між ними настільки погіршується, що метал у процесі обробки тиском руйнується. Таке явище називається перепалом. Зі згаданої діаграми випливає, що чим вищим є вміст вуглецю в сталі, тим швидше при більш низькій температурі настає перепал, що відноситься до непоправного браку (злам металу — каменеподібний).

Перепал в окисній атмосфері може спостерігатися і при більш низьких температурах, коли кисень з неї дифундує у простір між зернами, окисляє залізо і вуглець, утворюючи в цьому просторі легкоплавкі сполуки. Швидкість дифузії окислювача в сталь залежить від його парціального тиску в газовій фазі і тривалості впливу. Тому, чим вищою є окисна атмосфера печі, тим легше настає перепал, сигналом про який є оплавлення окалини.

6.2. Фізико-хімічні особливості процесів нагріву сталі

6.2.1. Окислювання сталі при нагріванні

У даному випадку прямі витрати металу від окислювання, що називаються угаром, досягають 5% початкової маси. Крім того, утворення окалини може привести до браку готового виробу внаслідок заковчування або заковування окисної плівки, розкриття підкіркових бульбашок тощо. Можливим є також перекручування геометричних форм і розмірів металу; виникає зростання подини, що ускладнює обслуговування печі. Видалення окалини вимагає додаткових витрат часу, робочої сили і матеріалів.

Окислювання сталі в печах з відкритим полум'ям відбувається за рахунок взаємодії заліза (основного його компонента) з вільним киснем, двоокисом вуглецю і водяними парами, що містяться в продуктах згоряння палива. Цей процес являє

собою двосторонню дифузію елементів O_2 і Fe . Кисень з газової фази дифундує до внутрішніх шарів сталі, а залізо — зсередини до поверхні окалини.

При високотемпературному окислюванні заліза окалина утвориться з трьох оксидів: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і FeO — відповідно до зовнішнього гематитного, середнього магнетитного і внутрішнього (що межує з металом) вюститного шарів. Останній з них - найтовстіший. Його величина досягає 85 %.

Основними чинниками, що впливають на товщину окислених шарів, є: температура, тривалість нагрівання, хімічний склад пічної атмосфери і металу. Дослідження і дані заводської практики свідчать, що помітне окислювання сталі починається при температурі 800°C . Надалі, тобто при $t > 800^\circ\text{C}$, швидкість його к різко зростає і добре узгоджується з законом Арреніуса:

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT_{\text{нов}}}\right) \quad (6.1)$$

де A — константа швидкості окислювання металу; Q — константа, що називається енергією активації і показує, яка її кількість є необхідною для Здійснення процесу; $R = 8.314 \text{ кДж/(моль}\cdot\text{K)}$ — універсальна газова постійна; $T_{\text{нов}}$ — абсолютна температура поверхні тіла.

Якщо швидкість окислювання металу при 800°C вважати за одиницю, то при $1000, 1100, 1250^\circ\text{C}$ вона буде дорівнювати відповідно 3, 7 і 10.

Інший важливий чинник, що впливає на величину k — пічна атмосфера, до складу якої можуть входити окисні (O_2 , CO_2 , H_2O , SO_2), відновлювальні (CO , H_2) і нейтральні (N_2) гази. Їхнє співвідношення змінюється залежно від коефіцієнта витрати повітря n при спалюванні палива. Так, при повному його згорянні ($\alpha \geq 1$) пічна атмосфера буде включати окисні і нейтральні гази. Швидкість k у даному випадку наближається до максимальної, а склад такої атмосфери називається окисним.

При неповному спалюванні палива ($0,5 < \alpha < 1$) в пічній атмосфері крім окисних (CO_2 , H_2O) і нейтральних (N_2) газів з'являються також відновлювальні (CO , H_2). Швидкість k при цьому зменшується пропорційно до зниження коефіцієнта α . Склад подібної атмосфери одержав назву малоокисного.

У ході подальшого зменшення коефіцієнта витрати повітря ($\alpha \leq 0,5$) при співвідношеннях відновлювальних і окисних газів $CO/CO_2 \geq 3$ і $H_2/H_2O \geq 1$ окалина практично не з'являється, склад атмосфери, що утворилася в цьому випадку, називається безокиним.

Організація високотемпературного безокисного нагрівання металу стає можливою лише при роботі печей на висококалорійному паливі з відповідним підігріванням повітря ($t_g \geq 1000^\circ\text{C}$) або з дуттям, збагаченим киснем. Виконати такі вимоги в умовах існуючого виробництва досить важко, тому безокисне нагрівання в описаному вигляді поширення не одержало.

Реальним варто вважати малоокисний режим теплової обробки сталі, який ґрунтується на двостадійному згорянні палива, коли в області високих температур воно спалюється при $\alpha = 0,85—0,9$ і $t_g = 400—500^\circ\text{C}$, а в області низьких значень t здійснюється допалювання продуктів неповного горіння. При цьому втрати металу в окалину складають $0,8—0,9\%$ від вихідної його маси, що на $30—40\%$ менше, ніж при окисному нагріванні.

Надійний спосіб безокисного нагрівання забезпечується в печах спеціальних конструкцій з використанням особливих захисних атмосфер. У чорній металургії для процесів термічної обробки ці атмосфери, як правило, створюються такими способами: розкладанням аміаку на водень і азот при наступному електролізі води; поділом повітря на азот і кисень з подальшим очищенням від небажаних компонентів; розкладанням вуглеводнів.

Одним з найдешевших вихідних палив для виробництва захисного середовища є природний газ, з якого можуть бути отримані майже всі атмосфери, що застосовуються у промисловості.

При виборі для обробки тієї або іншої сталі необхідної атмосфер варто враховувати зміну її складу в печі, а також тип і конструкцію агрегату, який використовується. Наприклад, у прохідних печах, де тривалість перебування металу порівняно невелика, до чистоти захисної атмосфери висуваються менш жорсткі вимоги, ніж в установках садочного типу, де тривалість перебування сталі значна. На кількість окалини, що утвориться, впливає вміст вуглецю в металі. Чим вищим є він, тим менше сталь піддається окислюванню. Це пояснюється тим, що більша частина заліза знаходиться не у вільному стані а у вигляді цементиту Fe_3C ; при сполучанні вуглецю з киснем на поверхні металу утвориться окис вуглецю, що нейтралізує вплив газу.

Окисну здатність сталі зменшують й інші легуючі елементи — хром, нікель і ін. При тому ж самому складі пічних газів і постійній температурі поверхні на підставі експериментальних даних отримано залежності окислювання металу від часу, що характеризуються наступними законами: лінійним, параболічним, кубічним, логарифмічним, обернено логарифмічним тощо.

Вид залежностей визначається структурою і товщиною окисної плівки. При тих же самих температурах на поверхні металу і незмінних складових пічних газів спостерігаються переходи від одних тимчасових залежностей до інших: логарифмічні й кубічні характерні для тонких плівок, а параболічні й лінійні — для товстих.

Якщо утворена окисна плівка пориста або являє собою летучі оксиди, вона не чинить ніякого опору проникненню газу до поверхні металу. У цьому випадку збільшення товщини окалини підлягає лінійному законові.

На підставі іонно-електронної теорії окислювання Вагнер вивів наступний вираз для швидкості росту оксидної плівки:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{k_0}{2w} \exp\left[-\frac{Q}{RT_{\text{нов}}(\tau)}\right] \quad (6.2)$$

де k_0 — константа швидкості окислювання металу, що залежить від складу сталі та пічної атмосфери.

Позначивши відношення Q/R через β , вираз (6.2) перепишемо у вигляді:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{k_0}{2w} \exp\left[-\frac{\beta}{T_{нов}(\tau)}\right] \quad (6.3)$$

звідки, якщо температура поверхні постійна, одержимо закон квадратного кореня

$$w = A\tau^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

що знаходить експериментальне підтвердження.

Згідно з дослідними даними квадратична парабола, що впливає зі звичайного дифузійного механізму, є лише частковим випадком при окислюванні сталей. У дійсності показник ступеня закону окислювання h підвищується або зменшується зі зміною температури й атмосфери, тобто

$$w = A\tau^h \quad (6.5)$$

Тоді за аналогією з виразом (6.3) можна записати

$$\frac{dw^h}{d\tau} = k_p \exp\left[-\frac{\beta_p}{T_{нов}(\tau)}\right] \quad (6.6)$$

$$\text{Тут } k_p = h\sqrt[k_0]{k_0}; \quad \beta_p = \frac{\beta}{h}.$$

Аналітичне визначення кількості окалини, що утвориться, у процесі теплової обробки металу має важливе значення при проектуванні нових нагрівальних пристроїв. Це дозволяє попередньо встановити величину видаткових коефіцієнтів сталі для випадку нагрівання і наступного охолодження. Крім того, з'являється можливість кількісно зіставити різні режими теплової обробки з точки зору окалиноутворення.

Відома наближена методика розрахунку угару металу за допомогою розбивки температурної кривої його нагрівання на окремі ізотермічні ділянки:

$$w = \sqrt{k_1^2 \tau_1 + k_2^2 \tau_2 + k_3^2 \tau_3 + \dots}, \quad (6.7)$$

де $k_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ — коефіцієнти, значення яких, обумовлюються температурою і складом атмосфери і обираються на кожній i -й ділянці за експериментальними даними; τ_i — час перебування металу на цих ділянках.

Основний недолік запропонованої методики полягає у тому, що вона залежить

від суб'єктивних чинників, тобто від кількості розрахункових ділянок, збільшення якої з метою підвищення точності кінцевих результатів приводить до зростання обсягу обчислювальних операцій і вимагає значної витрати часу.

Значення коефіцієнтів k_0 і β при окислюванні сталі (ст.35) у продуктах горіння різних палив			
Константи	α	$k_0, \text{кг}^h / (\text{м}^{2h} \cdot \text{г}^h)$	$\beta, \text{К}$
Доменний газ	1,1	$1,85 \cdot 10^3$	9200
	1,0	$2,1 \cdot 10^3$	9900
	0,9	$6,1 \cdot 10^3$	18600
Коксовий газ	1,1	$1,2 \cdot 10^4$	11600
	1,0	$2,9 \cdot 10^4$	13100
	0,9	$3,7 \cdot 10^4$	13700
Природний газ	1,1	$3,2 \cdot 10^1$	10000
	1,0	$1,8 \cdot 10^3$	9300
	0,9	$6,1 \cdot 10^2$	8100

6.2.2 Зневуглецювання сталі при нагріванні

Це — процес вигорання поверхневого вуглецю в металі, що викликає погіршення його механічних властивостей. Такій сталі притаманна мала опірність проти статичних навантажень, низька межа втоми і схильність до короблення. Для усунення можливого браку поверхневий шар видаляють, що приводить до подорожчання вартості готового виробу.

Зневуглецювання металу в нагрівальних печах відбувається за рахунок взаємодії карбіду заліза Fe_3C з вільним киснем, водяними парами, двоокисом вуглецю і воднем. Даний процес, що являє собою двосторонню дифузію зневуглецювального газу і карбіду заліза, залежить від різниці концентрацій речовин, що дифундують. Ось чому за однакових зовнішніх температур і газових умов вигорання вуглецю у високовуглецевих сталях йде інтенсивніше, ніж у низьковуглецевих.

У ході розглянутого процесу утворюються два шари: зовнішній і внутрішній — відповідно шари повного і часткового зневуглецювання. За глибину зневуглецьованого шару можна прийняти відстань від поверхні до шару з вихідною концентрацією вуглецю, однак, на цій глибині його вміст змінюється дуже повільно, і такий розрахунок приводить до великої остаточної похибки. Тому приймають глибину, де концентрація вуглецю складає 90% від вихідної.

Основними чинниками, що впливають на величину зневуглецьованого шару, є: температура поверхні металу, тривалість нагрівання, склад пічної атмосфери і хімічний склад сталі. Вплив легуючих елементів, що застосовуються, різний. Так, хром і нікель трохи знижують глибину вигорілого шару через обмеження дифузії вуглецю назовні. Марганець практично не спричинює ніякого впливу, а кремній, навпаки, сприяє процесові.

Помітне зневуглицювання починається з температури поверхні 800°C . При подальшому підвищенні значень $T_{нов}$ воно різко зростає і так само, як угар металу, підлягає закону Арреніуса.

Окисний склад пічної атмосфери (інший чинник) сприяє не тільки окалиноутворенню, але і значному зневуглицюванню. Зниження її окисної здатності (коефіцієнт витрати повітря ($0,5 < \alpha < 1$)) практично не уповільнює вигорання вуглецю, що можна пояснити, по-перше, зменшенням окисленого шару металу, який до температури поверхні порядку 1000°C перешкоджає процесу, і, по-друге, появою в пічній атмосфері водню, що підсилює її зневуглицюючі властивості.

Процес зневуглицювання припиняється при коефіцієнті $\alpha \leq 0,4$. Тому на практиці там, де є потреба цілком виключити цей процес, метал відокремлюється від продуктів згоряння газонепроникною оболонкою, його теплова обробка ведеться в захисному середовищі.

Оскільки зневуглицювання — процес дифузійний, для знаходження розподілу концентрації вуглецю в сталі С можна застосувати диференціальне рівняння Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D(T) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6.8)$$

де D — коефіцієнт дифузії, що залежить від температури поверхні. Величина D визначається так:

$$D(T) = (0,07 + 0,06 C_0) \exp \left[- \frac{\beta}{T_{нов}(\tau)} \right] \quad (6.9)$$

Тут C_0 — вихідна концентрація вуглецю в металі, % ; β — константа, дорівнює для сталі 16000K.

Якщо вигорання вуглецю відбувається при наявності окалини на поверхні металу, в області високих температур кисню окисної плівки цілком достатньо, щоб здійснювався процес зневуглицювання сталі. Можна вважати, що тут він відбувається за поверхневих умов першого роду, тобто при $C_{нов} = const$. Розв'язання диференціального рівняння (6.8) у даному випадку буде таким:

$$C(x, \tau) = C_{нов} + (C_0 - C_{нов}) \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \sqrt{\int_0^{\tau} D d\tau}} \right] \quad (6.10)$$

Приймаючи, що глибина зневуглицюваного шару визначається величиною $C(x, \tau) = 0,9 C_0$ і що при наявності окалини $C_{нов} = 0$, одержуємо вираз для розрахунку зазначеної глибини:

$$\delta(\tau) = 2,4 \sqrt{\int_0^{\tau} D d\tau} \quad (6.11)$$

або

$$\delta^2(\tau) = 5,76 \int_0^{\tau} D d\tau \quad (6.12)$$

У диференціальній формі швидкість росту товщини вигорілого шару запишеться так:

$$\frac{d\delta^2}{d\tau} = 5,76 D_0 \exp\left[-\frac{16000}{T_{нов}(\tau)}\right] \quad (6.13)$$

З виразу (6.13) випливає, що для її встановлення потрібно знати закон зміни температури поверхні металу в часі. Так, якщо знеуглецювання відбувається при ізотермічній витримці, шукана глибина пропорційна квадратному кореню часу процесу, тобто

$$\delta(\tau_k) = \sqrt{5,76\{0,07 + 0,06C_0\} \exp\left(-\frac{16000}{T_{нов}}\right) \tau_k} \quad (6.14)$$

де t_k — загальна тривалість теплової обробки.

Якщо ж нагрівання сталі здійснюється при постійній температурі газів, що гріють, розрахункова формула для визначення глибини знеуглецьованого шару буде мати наступний вигляд:

$$\delta^2(\tau_k) = \frac{5,76 D_0}{p} \left\{ e^{-\frac{16000}{T_\partial}} [Ei(-y_0) - Ei(-y_1)] + [Ei(-z_0) - Ei(-z_1)] \right\} \quad (6.15)$$

тут

$$D_0 = 0,07 + 0,06C_0 ; p = \frac{\alpha k_1}{m S \rho c} ; z_0 = \frac{16000}{T_{нов0}} ; z_1 = \frac{16000}{T_{нов.к}}$$

$$y_0 = \frac{16000}{T_{нов0}} - \frac{16000}{T_\partial} ; y_1 = \frac{16000}{T_{нов.к}} - \frac{16000}{T_\partial}$$

Істотним засобом зменшення знеуглецювання сталі перед обробкою тиском є збільшення швидкості нагрівання і зниження тривалості перебування металу при високих температурах, для чого ефективно можна застосовувати індукційні печі і електроконтактне нагрівання. Але ці методи поки широко не практикуються через досить значну вартість електричної енергії. Прийнятнішою є двостадійна теплова обробка металу. Існують два її способи:

використання двох окремих печей; однієї — для попереднього нагрівання (до $750 - 800^{\circ}\text{C}$), а іншої — для остаточного (до температури обробки);

організація тих же стадій у межах однієї печі.

При реалізації першого способу для попереднього нагрівання можна застосовувати металургійні агрегати звичайного типу, а для остаточного - установки з крокуючим подом чи балками або індукційні печі. Однак недолік даного способу полягає у тому, що гарячий продукт необхідно транспортувати від одного агрегату до іншого, що приводить до додаткових теплових втрат.

Для здійснення другого способу використовують печі з двома механізмами крокування балок поду, що дозволяють після повільного переміщення заготовок у зоні підігрівання швидко просувати їх з великим кроком в область остаточної теплової обробки. Тут, як і в попередньому випадку, забезпечується швидке вивантаження заготовок із зони високих температур при тривалих зупинках прокатного стану, що запобігає надлишковому знеуглецюванню.

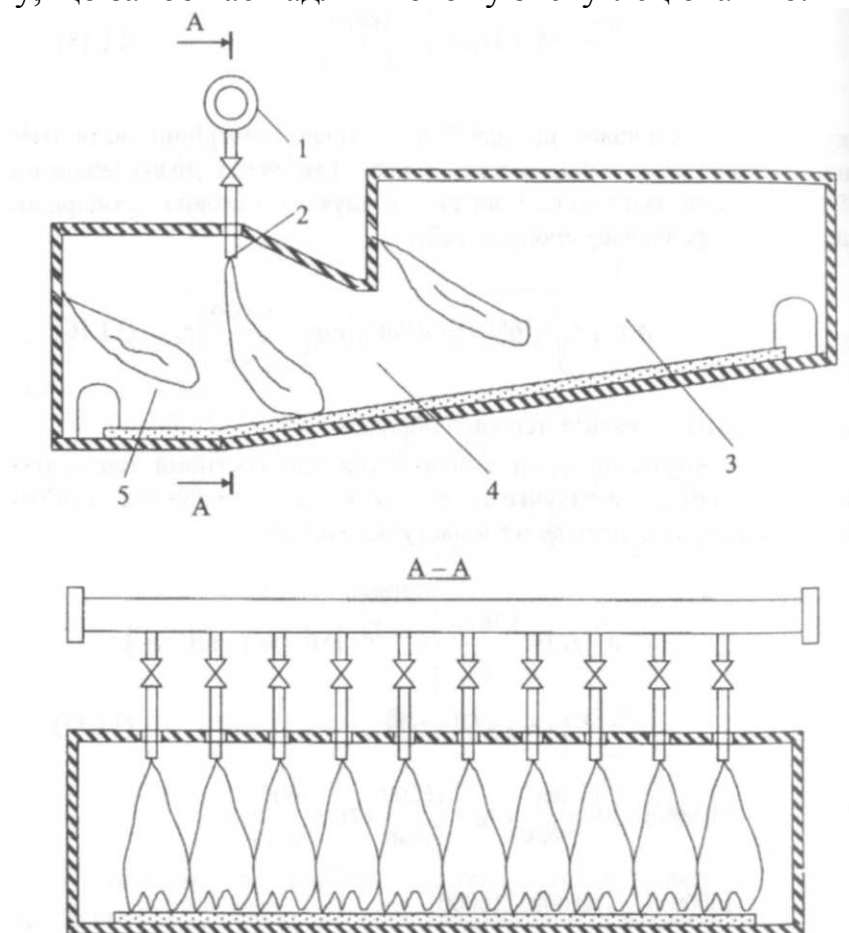


Рис. 6.1 - Схема реалізації способу двостадійного нагрівання металу в межах однієї печі

Ще одним способом, що реалізує двостадійне нагрівання металу в одній печі, є теплова обробка з використанням газової завіси з технологічного палива (рис. 6.1), яке подається через склепіння високотемпературної зони по всій ширині печі (на відстані приблизно однієї третини її довжини від вікна видачі). Для включення завіси газовий колектор 1 із соплами 2 встановлюється таким чином, що по всій ширині агрегату потік палива (без надходження повітря) обмежує область високих температур, зменшуючи її довжину, внаслідок чого скорочується тривалість перебування металу в цій області. Крім того, між зонами підігрівання 3 і остаточної гарячої обробки 5 створюється ще додаткова зона 4 для попередньої витримки при температурі 900 — 950⁰С. Тут же відбувається часткове науглецювання поверхні металу за рахунок сажистого вуглецю, що надходить у процесі спалювання технологічного палива.

Газова завіса дозволяє знизити глибину знеуглецюваного шару порівняно зі звичайним нагріванням. Зменшується також витрата палива до меж, що забезпечують необхідні температури по зонах і відповідну пічну атмосферу. Допалювання продуктів неповного згоряння здійснюється в області попередньої теплової обробки.

6.2.3 Термонапруження, що виникають у сталі при нагріванні

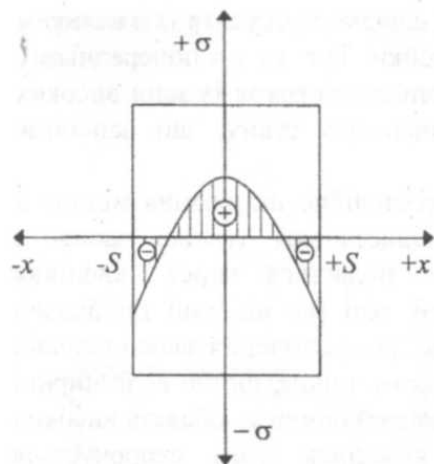
При тепловій обробці масивних тіл поверхневі шари нагріваються сильніше, а внутрішні — слабкіше. Першим, котрі прагнуть до розширення, перешкоджають інші. Тому поверхневі шари знаходяться в стисненому стані, а внутрішні — у розтягнутому. Напруги, що виникають при цьому, називаються температурними. Чим більшою є нерівномірність значень T по перетині заготовки, тим сильніші термонапруги, що можуть привести до жолоблення металу і утворення тріщин у ньому.

Особливо небезпечними є напруги, що виникають у високовуглецевих і легованих сталях в області пружних деформацій, тобто в інтервалі температур до 500⁰С. Якщо тут величина термонапруг перевищить межу зазначених деформацій, метал може зруйнуватися. Цю величину визначають за законом Гука:

$$\sigma = \frac{\beta' E}{1 - \nu} (T_m - T) \quad (6.16)$$

Рис. 6.2 - Схема розподілу напруг у тілі при симетричному нагріванні

де σ — напруга; β' — коефіцієнт лінійного розширення; E — модуль пружності;
 ν — Пуассонове відношення (для сталі $\nu = 0,3$);
 T_m — середньомасова температура тіла;
 T — температура тіла в розглянутому перетині.



Якщо в інтервалі температур до 500°C значення σ не перевищить межі пружності, при подальшому нагріванні метал переходить із пружної області до пластичної, де термонапруги, що виникають, релаксуються. Такі напруги, тобто ті, що зникають при тепловій обробці, називаються тимчасовими.

З виразу (6.16) випливає, що поверхневі шари тіла мають знак мінус, а внутрішні — плюс. Це свідчить відповідно про їх стиснений і розтягнений стан.

Всередині тіла є поверхня, що являє собою межу переходу шарів із одного стану до іншого. Координата цієї межі відповідає координаті середньомасової температури в тілі. Епюру розподілу термонапруг при симетричному нагріванні заготовки показано на рис. 6.2.

Використання виразу (6.16) є справедливим тільки у випадку, якщо межа міцності співпадає або є близькою до межі пружності матеріалу. Однак, є такі марки сталей, у яких межа міцності значно вища від межі плинності. Тоді небезпечні напруги повинні визначатися, виходячи з пружно-пластичних деформацій.

Небезпечними з погляду руйнації металу при його нагріванні є розтягуючі напруги, максимальне значення яких для області пружних деформацій

$$\sigma_p^{max} = \frac{\beta' E}{1 - \nu} (T_M - T_{\text{ц}}) \quad (6.17)$$

З умови параболічного розподілу температур у тілі відомо, що

$$T_M = T_{\text{ц}} + \frac{\Delta T}{k_3} \quad (6.18)$$

і тоді рівняння (6.17) з урахуванням формули (6.18) можна переписати так:

$$\sigma_p^{max} = \frac{\beta' E}{1 - \nu} \frac{\Delta T}{k_3} \quad (6.19)$$

$$\Delta T = \frac{q_{нов} S}{k_2 \lambda}$$

Взявши до уваги вираз , одержимо:

$$\sigma_p^{max} = \frac{\beta' E}{1 - \nu} \frac{q_{нов} S}{k_2 k_3 \lambda} \quad (6.20)$$

звідки випливає, що розтягуючі напруги залежать від умов нагрівання і форми тіла.

Так, при постійному тепловому потоці (інші умови рівні) найменша величина σ_p буде в пластини, а в циліндра і кулі вона є більшою відповідно в 1,47 і 1,76 рази. Отже, найбезпечнішою формою (маються на увазі можливі деформації металу при нагріванні) є пластина.

Крім тимчасових напруг, у масивному тілі можуть виникати і залишкові - у випадку його нагрівання з наступним охолодженням, коли стисненню поверхневих шарів, що швидше охолоджуються, перешкоджають внутрішні шари. Як результат, у перших з них утворюються розтягуючі напруги, а в інших — стискаючі.

Після того, як поверхня охолоне й обсяг стабілізується, внутрішні шари ще будуть відчувати теплове стиснення, внаслідок чого напруги почнуть зменшуватися й у деякий момент відбудеться зміна їхнього знака на поверхні і всередині. Коли остаточно завершиться охолодження, у поверхневих шарах з'являться залишкові напруги стиснення, а у внутрішніх — розтягнення. Якщо таке масивне тіло ще раз піддати нагріванню, тимчасові напруги, що виникають у ньому, будуть підсумовуватися із залишковими, оскільки їхні знаки збігаються. Ось чому високовуглецеві зливки, що мають температуру більшу від 500°C, можна нагрівати як загодно швидко, а зливки холодного посуду потребують обережної теплової обробки.

Крім тимчасових і залишкових термонапруг при нагріванні-охолодженні сталі виникають також структурні напруги, пов'язані з перетворенням α -заліза на γ -залізо. Але, тому що це перетворення відбувається при величині t , що значно перевищує верхній температурний інтервал пружності, структурні напруги при нагріванні різко зменшуються за рахунок пластичної деформації матеріалу.

6.3 Теплові і температурні режими нагрівання металу

Під режимами розуміють залежність основних параметрів теплової обробки металу від часу. Режим нагрівання сталей обумовлюється технологічними особливостями, конструкцією і призначенням печі формою, розмірами і розташуванням металу в агрегаті.

Розрізняють температурний і тепловий режими нагрівання, а для печей періодичної дії — ще і режим теплового навантаження. Для всіх них, як уже зазначалося, характерна залежність від часу, тобто перший із названих режимів — це нагрівання відповідно до заданого температурного графіка, другий — дотримання певного закону зміни зовнішнього теплового потоку і третій — збільшення або зменшення теплової потужності печі.

Режими нагрівання металу є взаємозалежними між собою. Щоб забезпечити виконання заданого температурного графіка, для печей періодичної дії необхідно тим або іншим шляхом змінювати кількість тепла, що подається до печі, а для безперервних печей — певним чином розподіляти його по довжині робочого простору.

Температурний режим може бути постійним і змінним. Якщо параметр t не змінюється і за часом нагрівання, і за обсягом робочого простору, такий режим називається камерним.

У печах безперервної дії температурний режим звичайно характеризується підвищенням або зниженням значень t по довжині робочого простору. У цьому випадку температура матеріалу, що нагрівається, змінюється в часі.

У печах періодичної дії підвищення (зменшення) величини t здійснюється в тому самому обсязі робочого простору, а тому прийнято говорити про стадії (ступені) нагрівання. У прохідних печах безперервної дії досліджуваний режим неоднаковий на окремих ділянках робочого простору. Тому розрізняють температурні зони печі.

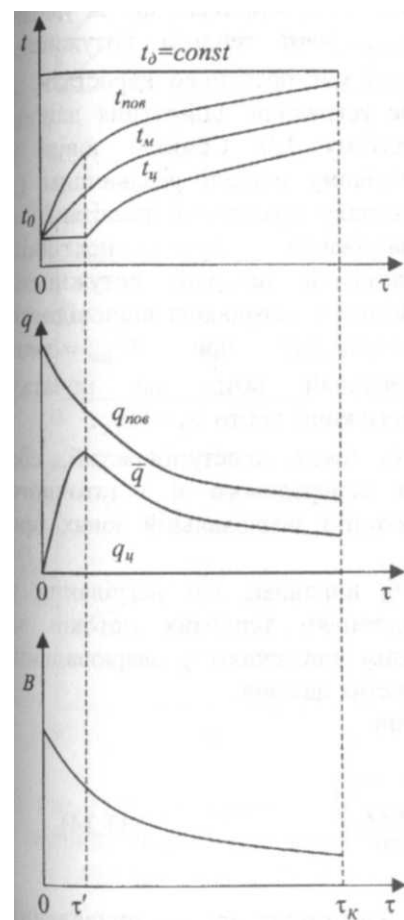
Практикуються одно-, дво- і багатоступінчасті режими теплової обробки металу. У першому випадку, тобто при одноступінчастому (однозонному) режимі (температура газів, що гріють, постійна), нагрівають термічно тонкі вироби, оскільки тут виключене виникнення термонапруг і перепаду значень t по перетині тіл. Такий режим застосовують для нагрівання: у прохідних печах — листів, сутинок, тонкостінних труб і інших виробів при одиночному їхньому розташуванні, а в одномісних регенеративних нагрівальних колодязях — зливків гарячого посаду.

Камерний режим забезпечує підвищення продуктивності печі за рахунок форсування нагрівання, але приводить до погіршення використання палива в агрегаті.

Рис. 6.3 - Температурна, теплова і паливна діаграми камерного режиму нагрівання масивних тіл холодного посаду

На рис. 6.3 подано температурну і теплову діаграми, а також діаграму теплових навантажень камерного режиму нагрівання масивних тіл холодного посаду. З теплової діаграми випливає, що максимальний тепловий потік, потрібний у перший момент часу, використовується лише впродовж незначного періоду. Отже, початкова потужність печі M витрачається неефективно. Так, розрахунки, які виконав І.Д. Семикін (рис. 6.4), показали, що зниження початкового теплового потоку до 50% від максимального приводить до деякої втрати продуктивності (до 15%), але при цьому забезпечується різке зменшення установочної потужності енергетичного устаткування (тяги, витрати газу й ін.).

Подальше скорочення теплового потоку викликає помітне збільшення тривалості процесу нагрівання металу. У цьому випадку оптимальний початковий тепловий потік



$$q_{opt} \approx 0.5 \sigma_d (T_{d,k}^4 - T_{нов0}^4) \quad (6.21)$$

де $T_{\partial,к}$ — максимальна температура газів, що вибирається з умови досягнення заданих кінцевих параметрів нагрівання масивних тіл; $T_{нов0}$ — початкова температура їхньої поверхні.

У такий спосіб виникло уявлення про раціональний двоступінчастий режим теплової обробки зливків у нагрівальних колодязях: перший — при оптимальному потоці від газів, що гріють, а другий — при постійній їхній температурі.

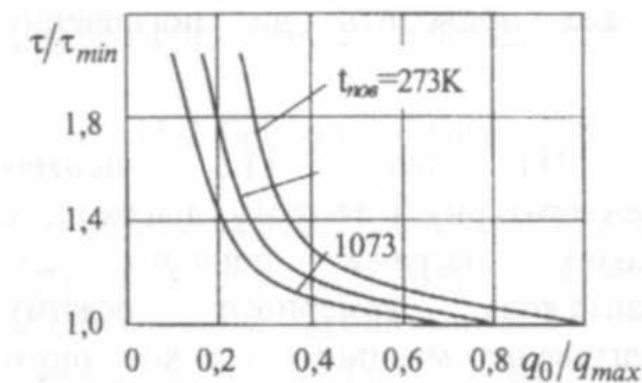


Рис. 6.4 - Вплив відносного початкового теплового потоку на тривалість нагрівання зливків при комбінованому нагріванні $q_{нов} = const, t_{\partial} = const$

З діаграм, наведених на рис. 6.5, випливає, що за умови $q_{нов} = const$ тепла потужність печі має поступово наростати а це ускладнює здійснення даного режиму. І.Д. Семикін довів: у першому періоді реальнішим (з погляду практичної реалізації) є нагрівання при постійній загальній тепловій потужності. Згідно з методикою відповідного розрахунку при $M_{заг} = const$ тепловий потік на початку першого періоду на 10% більший, ніж у його кінці, тобто $q_0 = 1,1q_k$.

У методичних печах застосовують також двоступінчастий, або двозонний, режим, що складається з попереднього й остаточного нагрівання металу відповідно у методичній і зварювальній зонах при постійній температурі газів, що гріють.

Із діаграм, поданих на рис. 6.6, випливає, що нагрівання у методичній зоні характеризується зростанням теплових потоків за напрямом руху металу з наступним їхнім зниженням у зварювальній області. Максимальний потік припадає на стик цих зон.

Температура газів у зварювальній зоні

$$T_{\partial}^{св} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_k}{\sigma_{\partial}} + \left(\frac{T_{нов.к}}{100}\right)^4}. \quad (6.22)$$

Тут q_k — тепловий потік наприкінці нагрівання; σ_{∂} — приведений коефіцієнт випромінювання системи, віднесений до температури газу, $T_{нов.к}$ — температура поверхні металу наприкінці гарячої обробки.

Значення q_k визначається з виразу

$$q_k = 2\lambda\Delta T_k / 2S, \quad (6.23)$$

де ΔT_K - кінцевий перепад температур по перетині тіла; $2S$ — повна товщина металу, що нагрівається

Рис. 6.5 Температурна, тепла і паливна діаграми нагрівання зливків при $q_{нов} = const, t_d = const$

Температура димових газів, що виходять, пов'язана з тепловою потужністю печі і з відносною довжиною зварювальної зони. Чим більше одне й інше, тим вищою є зазначена температура, і тим нижчим КВП. Тому збільшення довжини зварювальної зони вважається ефективним засобом підвищення продуктивності печі, але при цьому погіршуються техніко-економічні показники її роботи.

Вигіднішим є тризонний режим нагрівання металу. З діаграм, наведених на рис. 6.7, видно, що гаряча обробка в методичній зоні також характеризується зростанням теплового потоку за напрямом металу — аж до зварювальної області, де тепловий потік починає знижуватися. Потім він продовжує зменшуватися в томильній зоні печі.

При тризонному режимі нагрівання збільшення продуктивності печі досягається за рахунок піднімання температури зварювальної зони і скорочення її довжини, що дозволяє знизити температуру димових газів, що виходять, і тим самим підвищити КВП.

Крім того, триступінчасті режими можуть застосовуватися і для Уникнення температурних напруг при тепловій обробці високовуглецевих і легованих сталей посаду. Так, у нагрівальних колодязях такий режим (рис. 6.8) включає три ступіні:

гарячу обробку при постійному тепловому потоці з уповільненою швидкістю (до температури центру 500°C);

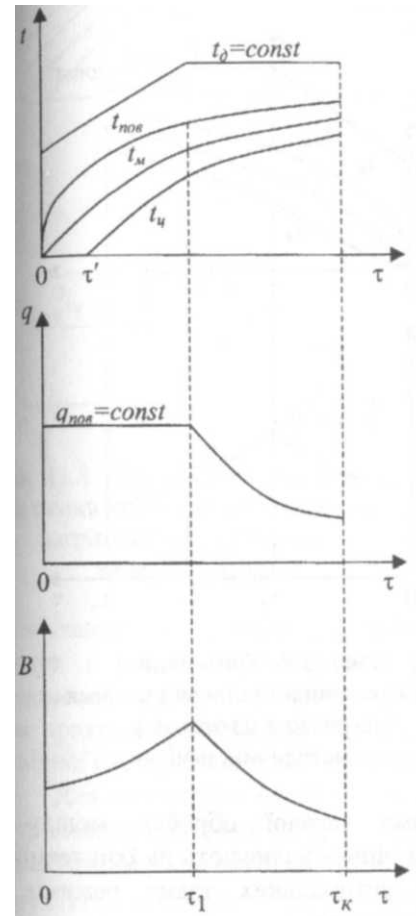
нагрівання при стабільній максимальній величині $M_{заг}$ (до контрольної температури газів, що гріють,);

витримку при досягнутій температурі.

Теплові і температурні режими гарячої обробки металу в нагрівальних установках визначальним чином впливають на їхні техніко-економічні показники. Тому вибір оптимальних таких режимів є важливим теоретичним і практичним завданням.

Відоме широке коло досліджень, щодо рішенням часткових задач, пов'язаних із оптимальним управлінням тепловою обробкою матеріалів у печах (задачі найшвидшого нагрівання, мінімізації витрати палива й окислювання металу у ході процесу, забезпечення найменших сумарних витрат при цьому й ін.).

Останнім часом теорія оптимального управління застосовується і для



розв'язання задач проектування нагрівальних пристроїв, визначення найкращих варіантів конструктивних елементів печей тощо.

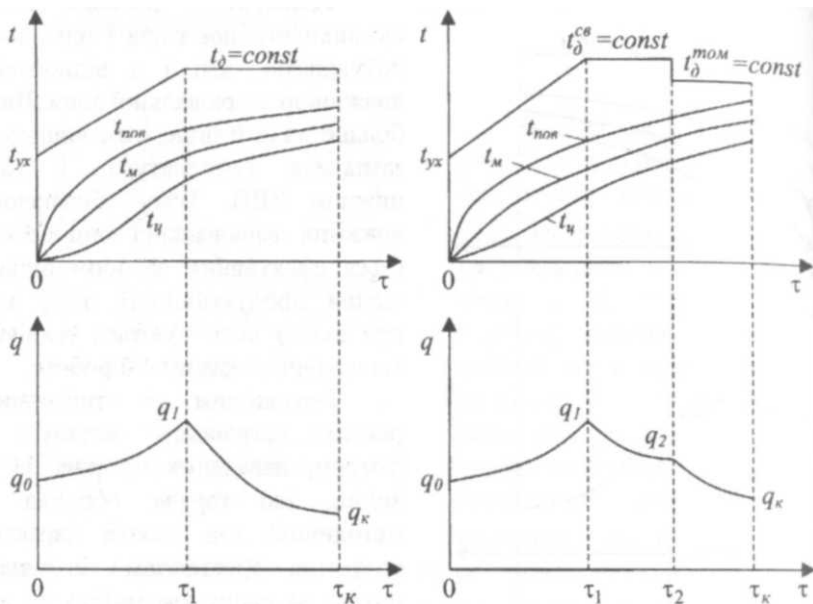
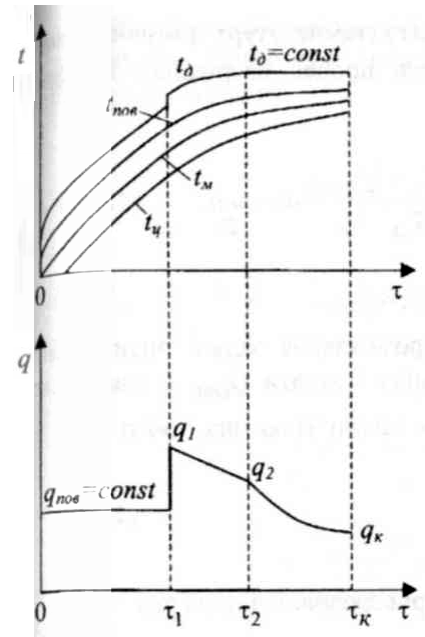


Рис. 6.6 - Температурна і теплова діаграми двозонного нагрівання заготовок у методичній печі

Рис. 6.7 - Тризонний температурний і тепловий режим нагрівання заготовок у методичній печі



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Перелетов И.И. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки
(Под ред. Ключникова А.Д. – М.: Энергоатомиздат, 1989.- 336с.)
2. Високотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии. Учебн. пос./ Ревун М.П. и др. Запорожье: ЗГИА.- 2002 -304 с.
3. Розенгарт Ю.И. и др. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах.-К.: Вища школа, 1986.- 296с.
4. Ващенко А.И. и др.. Металлургические печи, Часть 2 (Под ред. Глинкова М.А.) – М.: Металлургиздат, 1964.- 428с.
5. Ю.П.Филимонов и др.. Металлургическая теплотехніка.Часть 2 (Под ред. Глинкова М.А.- М.: Металлургия – 1974,520с.
6. Аверин С.И. и др.. Расчеты нагревательных печей (Под ред. Тайца Н.Ю.- К.: Техніка, 1969).
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей (Под ред. А.С.Телегина.- М.: Металлургия, 1970.-528с.
8. Семикин И.Д. и др.. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов.- М.: Металлургия, 1965.- 392с.
9. Расчеты нагревательных и термических печей. Справочник (Под ред. В.М.Тымчака и В.А. Гусовского.- М.: Металлургия,1983.- 481с.

Конспект лекцій по дисципліні «Високотемпературні теплотехнологічні процеси і установки» для студентів спеціальності 6.050601 – ”Теплоенергетика” денної форми навчання з напрямку 0905-Енергетика

Укладач: старший викладач Проскурня А.Я.

Підписано до друку _____ 2013р. Формат 60*84 1/16
Обсяг _____ д.а. Тираж _____ екз. Замовлення № _____
Безкоштовно. Ротапринт ДДТУ.
51918, м. Дніпродзержинськ,
вул. Дніпробудівська 2а