**УТИЛІЗАЦІЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ**

**17.1 Класифікація вторинних енергоресурсів**

Вторинні енергетичні ресурси (ВЕР) можуть бути розділені на три основні групи:

* горючі вторинні ресурси: доменний, коксовий, феросплавний, конверторний гази, гази нафтопереробних агрегатів, біогаз; відходи паливно-мастильних матеріалів, лакофарбові відходи, смоли; відходи вуглезбагачення, деревна тирса і стружки, гумові та пластмасові відходи, кора, тріска, побутове сміття;
* фізичне тепло газів, що виходять з технологічних агрегатів; розплавленого металу і шлаку; розжареного коксу; нагрітої продукції, обладнання та відходів; гарячої води в системах охолодження, пара випарного охолодження, високотемпературних теплоносіїв; повітря систем вентиляції; грануляційних вод;
* потенційна енергія надлишкового тиску газів (доменного, газу, що утворюється при виробництві азотної кислоти), води, пара.

Чорна металургія в Україні - найбільш енергоємне виробництво, яке споживає більше половини палива в промисловості. Використання ВЕР - шлях до зниження витрат природного палива і електроенергії.

Горючі гази в чорній металургії використовуються на 95%, інші види ВЕР - на 30 ... 35%. Половина невикористаних ресурсів припадає на ВЕР, рекуперація яких технічно не вирішена, друга половина втрачається з економічних причин. У структурі паливного балансу підприємства чорної металургії ВЕР займають 25%, а у балансі пари – 79% [18].

**17.2 Горючі ВЕР**

Розглянемо основні горючі гази, які утворюються на підприємствах. Найбільш важливим з них є ***доменний газ***, що утворюється при виплавці чавуну у доменній печі при взаємодії кисню дуття і шихти з вуглецем коксу. Склад доменного газу залежить від багатьох факторів – марки чавуну, сировини, що застосовується, об’єму печі, тиску під колошником тощо. Середній склад газу, що утворюється у печах, що працюють при підвищеному тиску на колошнику, наведений у табл. 30. Нижча робоча теплота згоряння доменного газу зазвичай лежить у межах 3...4,5 МДж/м3

Кількість доменного газу, що утворюється у печі, складає 3880 м3/т вологого коксу, або 4000 м3 / т сухого коксу, або 2000-2500 м3 / т чавуну.

Таблиця 30 - Склад доменного газу

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Компонент | CO | H2 | CH4 | CO2 | H2O+N2 |
| Об. % | 20…30 | 3…10 | 0…3 | 8…18 | 40…70 |

Температура газу на виході з печі залежить від її об'єму, температури і складу дуття та інших показників. Вона лежить в межах 150 ... 450°С. Причому нижча температура відповідає печам великого об’єму, вища – малим печам, що зараз зустрічаються рідко. Печі на сучасних комбінатах працюють з підвищеним тиском на колошнику. Доменний газ на виході з печі має тиск 0,25 ... 0,3 МПа.

Доменний газ є токсичним і вибухонебезпечним газом. В силу цих причин випуск його в атмосферу виключений. Газ піддається багатоступеневої очистки та використовується як паливо. Через невелику теплоту згорання доменний газ зазвичай використовується в суміші з іншим, висококалорійним паливом, найчастіше з природним або коксівним газом. Після очистки від пилу використовується як паливо для підігріву насадок повітронагрівачів, сталевих зливків, коксових батарей, для опалення котлів тощо.

Надлишкова енергія тиску доменного газу дозволяє використовувати його (після очищення) у газових утилізаційних безкомпресорних турбінах (ГУБТ), в яких спрацьовується тепловміст газу, знижуються його температура і тиск. Енергія газу переходить у механічну енергію обертання турбіни, до якої може бути приєднаний електрогенератор, або повітродувка.

***Коксовий газ*** - горючий газ, що утворюється в процесі коксування кам'яного вугілля, тобто при нагріванні його без доступу повітря до 900-1100°С. Коксовий газ містить багато цінних речовин. Крім водню, метану, оксидів вуглецю в його склад входять аліфатичні та ароматичні вуглеводні, нафталін, аміак, сірководень і ін. Сирий газ піддається багатостадійному глибокому очищенню. Очищений коксовий газ (14-15% від загальної маси вугілля, що переробляється) використовують в якості палива для обігріву батареї коксових печей та інших тепловикористовуючих агрегатів, а також як сировину для синтезу аміаку і для інших цілей. Як паливо коксовий газ часто застосовують суміші з природним газом.

Приблизний склад коксового газу (об. % ): Н2 – 55…60, СН4 - 20…30, СО – 5…7, CO2 - 2…3, N2 - 4, ненасичених вуглеводнів – 2…3, О2 - 0,4…0,8. Густина за н. у. - 0,45…0,50 кг / м3; теплота згоряння (нижча) – 16…17,5 МДж/м3; температура самозаймання 600-650 °С. Коксовий газ отруйний і вибухонебезпечний, вибухова концентрація в повітрі - від 6 до 30%. Вихід коксового газу на 1 т сухої шихти - близько 300 м3.

Застосування коксового газу для синтезу аміаку можливо завдяки високому вмісту водню. Процес йде за температурою 500°С і тиском 35 МПа за присутністю каталізатору – залізу і оксидів алюмінію та калію:

N2 + 3H2 = 2NH3

***Феросплавний газ*** - суміш газів, що відходять від рудовідновних феросплавних печей з закритим колошником. У залежності від марки феросплаву, сировини та інших факторів, газ містить, об. %: СО - 70…90; H2 – 2…10; СО2 – 2…20; СH4 - 0,5…5; N2 – 2…4; О2 < 1; SO2 - 0,2…0,5 мг / м3. Отруйний і вибухонебезпечний. Нижча теплота згоряння 8,2…8,4 МДж / м3. Вихід газу рівномірний, 400…800 м3 / т феросплаву в залежності від марки.

Феросплавний газ після очищення використовують як паливо.

***Конвертерний газ*** утворюється при виплавці сталі в кисневих конвертерах. Газ складається в основному з оксиду вуглецю, вихід і склад його протягом плавки значно змінюються. Після очищення склад газу приблизно такий: 70…80% CO; 15…20% СО2; 0,5…0,8% О2; 3-12% N2. Теплота згоряння газу становить 8,4…9,2 МДж / м3. Вихід газу близько 55 м3 на тонну сталі. Найбільш поширена схема утилізації енергії конвертерного газу включає його спалювання (допалювання СО) безпосередньо після виходу з конвертеру і використання тепла продуктів згоряння у котлі-утилізаторі.

***Газ піролізу нафти*** містить 41% метану і 43% інших вуглеводнів (етан, пропан, етилен, пропилен тощо). Нижча теплота згоряння – 47 МДж/м3.

З рідких горючих ВЕР можна відзначити відпрацьовані масла, нафтопродукти, відходи лакофарбового виробництва, з твердих – тріску, тирсу, деревні стружки та інші відходи деревини, відходи пластиків та гуми, паперу.

**17.3 Використання тепла охолоджування високотемпературних установок**

У високотемпературних вогнетехнічних установках багато конструктивних елементів (деталей) знаходяться в зонах високих температур і надійна робота їх залежить від застосування системи примусового охолодження.

Розрізняють два типи охолоджуваних елементів печі (кесонів): порожнисті, або коробчасті, і трубчасті. Порожнисті мають складну форму перерізу, що диктується конструкцією агрегату. У таких елементах швидкість руху потоку в порівнянні зі швидкістю в трубопроводі, що підводить знижується в кілька разів. Трубчасті елементи являють собою трубу або пучок труб, по яким рухається охолоджувальний агент. Трубчасті елементи можуть працювати під більш високим тиском, ніж порожнисті.

Захист від перегріву і руйнування зовнішніх огороджень робочої камери печі високотемпературними продуктами згоряння і розплавом необхідна для всіх плавильних печей, оскільки їх вогнетривка футеровка працює в особливо важких умовах і швидко зношується. Такий же захист потрібен для деяких потужних нагрівальних печей.

Розрізняють 3 типа систем охолодження конструктивних елементів високотемпературних установок: водяне, випарне і охолодження високотемпературними теплоносіями.

***Водяне охолодження.*** Примусове охолодження елементів високотемпературних печей раніше здійснювалося лише технічною водою, що нагрівається до температури не вище 40 ... 45 °С. Більш висока кінцева температура води виключається щоб уникнути випадання накипу всередині охолоджуваних елементів, наслідком чого з'явився б їх перегрів і перепал.

Водяне охолодження здійснюється за проточною і зворотному схемами. Витрата охолоджуючої води залежить від її якості і конструкції охолоджуваних елементів. Теплофізичні властивості води задовольняють вимогам, що пред'являються до охолоджуючим теплоносія. Зменшення в'язкості води з підвищенням температури сприяє збільшенню коефіцієнта тепловіддачі від стінки до води.

До основних недоліків систем водяного охолодження слід віднести:

а) низьку температуру охолоджуючої води (40 ... 45 ° С), що практично виключає можливість використання теплоти, що забирається водою. Зазвичай її скидають в каналізацію (при прямоточному водопостачанні) або охолоджують в градирнях (при оборотному водопостачанні). Тепловідвід в навколишнє середовище, що виникає при цьому, досягає значної величини - 20 ... 40 ГДж/год. на один пічній агрегат;

б) значні витрати електроенергії на підйом і перекачування великої кількості води (до 300 ... 500 т / год. на один агрегат при тиску 0,3 ... 0,4 МПа). Виробничий комплекс заводу при цьому ускладнюється водним господарством великої продуктивності.

Існують декілька способів використання тепла водяного охолодження, але вони застосовуються рідко:

* Використання гарячої води для гарячого водопостачання побутових приміщень заводу (якщо вони розташовані недалеко);
* Нагрів вентиляційного повітря, що подається до виробничих приміщень;
* Використання тепла в абсорбційних холодильних установках;
* Прогрів ґрунту в парникових господарствах і застосування гарячої води там же у зрошувальних системах;
* Вироблення електроенергії із застосуванням спеціальних турбін або схем.

***Випарне охолодження.*** Сутність випарного охолодження полягає в охолодженні конструктивних елементів печей хімічно очищеною водою, причому відведена від охолоджуваних деталей теплота витрачається на випаровування води. Охолоджувальні деталі приєднані двома трубами до барабану-сепаратора. За опускний трубі вода з барабана-сепаратора підводиться до деталі, по підйомній трубі пароводяна суміш відводиться в барабан-сепаратор. Тут пар відокремлюється від води і надходить в паропровід. Вода в системі циркулює безперервно. При цьому можливе застосування природної циркуляції, заснованої на різниці густини води в опускний трубі і пароводяної суміші в підйомній трубі, і примусової, здійснюваної циркуляційними насосами. Вода, що відводиться у вигляді пари, поповнюється живильною водою, яка подається в барабан-сепаратор.

В системі випарного охолодження відводиться теплота використовується для вироблення пари D в кількості, кг/с:

 $D=\frac{Q\_{0}}{i\_{нп}-i\_{жв}}$ (24)

де *Q*0 – кількість теплоти, що відводиться, кВт; *і*нп – ентальпія насиченої пари, кДж/кг; *і*жв – ентальпія живильної води, кДж/кг.

Основні переваги випарного охолодження в порівнянні з водяним:

1. Підвищення стійкості охолоджуваних деталей (в 5...10 разів), зменшення прогарів деталей і простоїв печі, викликаних заміною прогорілих деталей.

2. Значне зменшення витрат води і в зв'язку з цим зниження витрат електроенергії на її подачу до пічних агрегатів. Відпадає необхідність в спорудженні громіздких і дорогих водоводів, перекачувальних насосних станцій та установок для охолодження зворотної води (градирень, бризкальних басейнів, ставків та ін.).

3. Значне зменшення витрат води (в 20 ... 80 разів) і в зв'язку з цим застосування досконалих методів водопідготовки, необхідних для запобігання утворенню накипу на поверхні кесонів при випарному охолодженні.

4. Зниження витрати палива в установках, що заміщають в зв'язку з можливістю використання теплоти охолоджуваних елементів печей. Практика експлуатації системи випарного охолодження показує, що використання теплоти охолоджуваних елементів металургійних печей становить 8 ... 10% парового балансу заводу.

Слід врахувати, що питоме теплосприйняття печей всіх типів різко змінюється як за часом робочої кампанії, в залежності від зносу вогнетривкої футеровки кесонів (ізоляція подових труб), так і для різних за температурними умовами ділянок печей. Дуже велика величина питомого теплосприйняття окремих (оголених) ділянок систем охолодження пояснюється потужною радіацією високотемпературного факела і розпечених мас металу, шлаку і вогнетривкої кладки. Ці особливості теплосприйняття необхідно враховувати при забезпеченні надійності систем примусового охолодження високотемпературних печей.

Надійність роботи механічно навантаженого (що знаходиться під тиском) металу визначається головним чином його температурою, так як всі показники міцності металу (тимчасовий опір, межа плинності і міцності) різко знижуються при підвищенні цієї температури. Оскільки коефіцієнт теплопровідності накипу вкрай низький λн = 1,12 ... 0,12 Вт / (м∙К), то навіть невелика товщина шару накипу буде різко збільшувати тепловий опір і температуру стінки металу кесона.

Важливою умовою надійної роботи систем випарного охолодження, крім забезпечення відповідної якості живильної і котлової води, є запобігання виникненню високого змісту пара у пароводяній суміші. Трубчасті елементи з підвищеною швидкістю примусової циркуляції мають в цьому відношенні переваги в порівнянні з коробчастими кесонами, що працюють при малій і часто нестійкій природній циркуляції.

Для відводу великих теплових потоків величина коефіцієнта тепловіддачі від стінки кесона до пароводяної суміші повинна бути не менше 10 кВт / (м2∙К). Для досягнення таких значень необхідно: застосовувати підвищену швидкість циркуляції (не менше 0,8 ... 1,0 м/с); використовувати малі еквівалентні діаметри каналів або труб; працювати при підвищеному і високому тиску пари, коли зростає одночасно густина пароводяної суміші і коефіцієнт тепловіддачі. Таким чином, підвищення тиску пари і перехід на трубчасті кесони підвищує надійність роботи високотемпературних печей.

Вироблена в установках випарного охолодження пара прямує до заводського паропроводу і використовується для технологічних, енергетичних і теплофікаційних цілей.

Охолодження ***високотемпературними теплоносіями***. Для зниження тиску охолоджуючого теплоносія при одночасному підвищенні його температурного рівня можна використовувати охолодження кесонів високотемпературними теплоносіями. У цьому випадку в самих кесонах повинен циркулювати високотемпературний теплоносій при атмосферному тиску і температурі нижче його температури кипіння, а пароутворення має відбуватися в випарній системі другого контуру. Температура використання найбільш перспективних високотемпературних теплоносіїв при Р = 0,1 МПа: діфенільних та нітратно-нітритній сумішей до 250°С, рідких металів – до 700°С.

Розплавлені метали посідають особливе місце серед теплоносіїв, володіючи відносно високою теплопровідністю, малою в'язкістю і високою температурою кипіння. Як теплоносії застосовують легкі метали - натрій, калій, літій, їх сплави, а також важкі метали - ртуть, олово, вісмут, свинець і їх сплави.

При проходженні в процесі циркуляції через теплообмінник високотемпературної рідини, нагрітої до 525 К, у другому контурі теплообмінника за рахунок використання теплоти цієї рідини можна отримати пар тиском Р = 4 МПа.

Основні вимоги, що пред'являються до конструкції кесонів з рідкометалевим теплоносієм, такі:

а) досить високий коефіцієнт тепловіддачі від стінки кесона до теплоносія і збереження гарнісажного футерування;

б) мінімальний обсяг кесона для зменшення обсягу теплоносія;

в) мінімальні температурні деформації кесона;

г) простота виготовлення і монтажу.

Як високотемпературні теплоносії застосовуються, наприклад: нітратно-нітритна суміш, що складається з 53% KNO3, 40% NaNO3, 7% NaNO2; сплав 44% Рb і 56% Bi; сплав 22% K i 78% Na.

**17. 4 Використання тепла газів, що відходять**

Гази, що відходять від високотемпературних агрегатів – печей, нагрівальних колодязів, котлів, сушарок тощо зазвичай мають високу температуру. Теплова енергія цих газів може використовуватися різними способами. Частіше за все застосовують три типу апаратів – котли-утилізатори, рекуператори і регенератори.

**17.4.1 Котли-утилізатори**

Котли-утилізатори використовують тепло газів, що відходять від технологічних агрегатів, їм не потрібно паливо і повітря для його спалювання. Тому в котлів-утилізаторів відсутні топка і повітронагрівач. Теплота, що генерується котлом-утилізатором у вигляді водяної пари, нагрітої води або нагрітого повітряного потоку, використовується в інших технологічних процесах або в когенераційних установках для виробництва електроенергії або холоду.

Ефективність використання теплоти відхідних газів в котлах-утилізаторах залежить від температури газів, що відходять, теплової потужності і режиму надходження газів. Вихід газів, що відходять залежить від кількості палива, що спалюється в технологічній установці і виходу шихтових газів, що утворюються при термічній обробці вихідних технологічних матеріалів. Велика кількість шихтових газів утворюється, наприклад, при плавці руд кольорових металів, кисневої продувки сталеплавильних конверторів для перетворення чавуну в сталь і ін.

Режим надходження газів в котли-утилізатори є не менш значущим чинником ефективної реалізації їх теплоти. У ряді випадків циклічність роботи технологічної установки створює значні труднощі при використанні газів, як це має місце при конверторному виробництві стали, а іноді ця циклічність стає серйозною перешкодою для ефективного застосування газового потоку.

Котли-утилізатори поділяються на групи за кількома ознаками:

* За температурою продуктів згоряння на вході в котел. За цією ознакою котли-утилізатори діляться на низькотемпературні (при температурах <1000 ° C) і високотемпературні (при температурах >1000 ° C). Такий поділ обумовлено тим, що при температурах <1000°C перенесення теплоти від продуктів згоряння відбувається головним чином за рахунок конвекції, а при температурах > 1000°C в більшій мірі випромінюванням. Крім цього, відбувається зміна агрегатного стану технологічного і паливного виносу, який при температурах > 1100 ° C міститься в продуктах згоряння переважно в рідкому стані.
* За параметрами пара: котли низьких (P = 1,5 МПа, t ≈ 300 ° С), підвищених (4,5 МПа і 450 ° С) і високих (10…14 МПа і 550 ° С) параметрів.
* За способом організації взаємного руху води і пари і продуктів згоряння: газотрубні (відхідні гази рухаються всередині труб, вода і пара – у між трубному просторі) і водотрубні (відхідні гази рухаються у між трубному просторі, вода і пара – всередині труб).
* За способом організації руху води в випарному контурі водотрубних котлів: котли з природною циркуляцією і з багаторазової примусової циркуляцією (МПЦ).
* За конструкторським оформленням компонувальних рішень і поверхонь нагріву. За цією ознакою котли-утилізатори бувають П-подібної форми, баштового і горизонтально-тунельного типів зі змієвиковими конвективними поверхнями нагріву в низькотемпературних котлах і радіаційно-конвективними в високотемпературних.

Спрощена схема котла-утилізатора надана на рис. 49.

**17.4.2 Рекуператори**

 Рекуператор (від лат. Recuperator - той, що повертає) - теплообмінник поверхневого типу для використання теплоти відхідних газів, в якому теплообмін між теплоносіями здійснюється безперервно через їх стінку, що їх розділяє. Рекуператори розрізняють за схемою відносного руху теплоносіїв - протиточні, перехресні, прямоточні та інші; по конструкції - трубчасті, пластинчасті, ребристі, оребрені пластинчасті тощо; за матеріалом виготовлення - металеві, керамічні, пластикові та інші; за призначенням - підігрівачі повітря, газу, рідин, випарники, конденсатори і т. д.



1 – барабан-сепаратор; 2 – випарні поверхні; 3 – пароперегрівач; 4 – водяний економайзер

Рисунок 49 – Схема низькотемпературного котла-утилізатора з природною циркуляцією

***Кожухотрубні*** рекуператори (рис. 50, 51). До корпусу, кожуха по торцях приварені трубні решітки, в яких закріплені пучки труб. На корпусі є патрубки (штуцери), через які один теплоносій проходить через міжтрубний простір. Другий теплоносій через патрубки (штуцери) на кришках проходить по трубах. У багатоходовому теплообміннику в корпусі і кришках встановлені перегородки для підвищення швидкості теплоносіїв.

***Елементні*** рекуператори. Кожен елемент такого апарату являє собою найпростіший кожухотрубний теплообмінник без перегородок. Такі апарати допускають при цьому більш високий тиск. Однак така конструкція виходить більш громіздкою і важкою, ніж кожухотрубний апарат.

***Занурювальні*** рекуператори. У заглибному змійовиковому теплообміннику один теплоносій рухається по змійовику, зануреному в бак з іншим рідким теплоносієм. Швидкість рідини в міжтрубному просторі незначна і, отже, тепловіддача від рідини порівняно невелика. Такі теплообмінники знаходять застосування завдяки своїй простоті і дешевизні в невеликих установках.

Рекуператори типу «***труба в трубі***» (рис. 52). Теплообмінний елемент такого апарату складається з циліндричного корпусу, через який проходить труба. Корпус обладнаний двома патрубками через котрі підводиться та відводиться один з теплоносіїв. Інший теплоносій проходить через трубу. Ці теплообмінники знаходять собі застосування при невеликих витратах теплоносіїв та при високому тиску.

***Зрошувальні*** рекуператори. Такий тип теплообмінників застосовується головним чином в якості конденсаторів в холодильних установках. Зрошувальний рекуператор являє собою змійовик з горизонтальних труб, розміщених у вертикальній площині у вигляді ряду паралельних секцій. Над кожним поруч знаходиться жолоб, з якого цівками стікає охолоджуюча вода на теплообмінні туби, омиваючи їх зовнішню поверхню. При цьому частина охолоджуючої води випаровується. Вода, що залишилася повертається насосом, а втрати компенсуються з водопроводу. Ці теплообмінники встановлюються на відкритому повітрі і захищаються дерев'яними ґратами, щоб зменшити винесення води.

***Пластинчасті*** рекуператори (рис. 53). Такі теплообмінники складаються з набору пластин із штампованими хвилястими поверхнями і каналами для протоку рідини. Такий рекуператор простий у виготовленні, легко модифікується (додаються або забираються пластини), його легко чистити, у нього високий коефіцієнт теплопередачі, але його не можна застосовувати при високому тиску.

***Пластинчато-ребристі*** рекуператори (рис. 54). Теплообмінник такого типу на відміну від пластинчастого теплообмінника складається з системи розділових пластин, між якими знаходяться ребристі поверхні - насадки, приєднані до пластин методом пайки у вакуумі. З боків канали обмежуються брусками, що підтримують пластини і утворюють закриті канали. Таким чином, в основу ребристого пластинчастого теплообмінника покладена жорстка і міцна цільнопаяна теплообмінна матриця, працездатна (навіть у виконанні з алюмінієвих сплавів) до тиску 10МПа і вище. Основні переваги даного типу рекуператорів - компактність (до 4000 м²/м³) і легкість.

***Спіральні*** рекуператори (рис. 55). Теплообмінник являє собою два спіральних каналу, навитих з рулонного матеріалу навколо центральної розділювальної перегородки - керна, середовища рухаються по каналах. Одне з призначень спіральних теплообмінників нагрів та охолодження високов'язких рідин.

 Максимальна робоча температура визначається матеріалом, з котрого виготовлений рекуператор. На вибір матеріалу також впливають хімічні властивості теплоносіїв. Застосовуються сталь, чавун, вогнетривка кераміка, графіт, пластик, скло.

Теплообмінники для хімічно агресивних середовищ виготовляють з блоків графіту, який просочують спеціальними смолами для усунення пористості. Графіт відрізняється хорошою теплопровідністю. У блоках просвердлюють канали для теплоносіїв. Блоки ущільнюються між собою прокладками з гуми або тефлону і стягуються кришками зі стяжками. Допустима температура 150…180°С.Графітопластові рекуператори працюють з температурою до 130ºС. Скляні апарати застосовуються, як правило, у лабораторних умовах.

У металургії широко використовуються сталеві та чавунні теплообмінники. Допустима температура визначається маркою сталі чи чавуну. Для рекуператорів з вуглецевої сталі вона становить 500ºС. Для апаратів з жаростійкого чавуну вона визначається вмістом у чавуні кремнію і складає: при вмісті кремнію 2,3% - 650ºС; 14% - 750ºС; 30% - 900ºС. Легована хромиста сталь може застосовуватися до температури 1200ºС.

 Рекуператори з вогнетривкої кераміки ставлять після потужних плавильних і нагрівальних печей. Матеріал – шамот (найдешевший), карборунд, шамото-карборунд, магнезит, хромомагнезит. Робоча температура – 1000…1300ºС. Частіше застосовують 2 конструкції керамічних рекуператорів – з круглими або 8-гранними трубами і з фасонних керамічних блоків.

 До переваг рекуператорів належать безперервність дії, постійність температури нагріву, компактність.

Недоліки: можливість перетоків, особливо в керамічних рекуператорах, обмеження температури нагріву.



Рисунок 50 – Кожухотрубний рекуператор



А – вхід гарячого теплоносія; В – вихід гарячого теплоносія; С - вхід холодного теплоносія; D - вихід холодного теплоносія

 Рисунок 51– Кожухотрубний рекуператор у розрізі



 Рисунок 52 – Рекуператор «труба в трубі»



1 – пластина; 2 – нерухома плита; 3 – притискна плита; 4 – патрубки для підвода і відводу теплоносіїв; 5 – стяжний болт; 6 - рама

Рисунок 53 – Пластинчастий рекуператор



Рисунок 54 - Пластинчато-ребристий рекуператор



І – підвід і відвід гарячого теплоносія; ІІ - підвід і відвід холодного теплоносія;

1 – спіральний канал; 2 – металева розподільна спіралеподібна стінка; 3 – керн; 4, 5 – торцеві кришки.

Рисунок 55 – Спіральний рекуператор

**17.4.3 Регенератори**

Регенератор (від лат. regenerare– відроджувати) - теплообмінник, в якому передача теплоти здійснюється почерговим контактом гарячого і холодного теплоносіїв з одними і тими ж поверхнями апарату (насадкою).

Більшість регенераторів – апарати періодичної дії. У першому циклі гарячий теплоносій нагріває насадку, у другому – гаряча насадка нагріває холодний теплоносій. Регенератори служать для нагріву повітря, а іноді – газу. Нагрів повітря може здійснюватися до температури 1300…1400°С, температура гарячого теплоносія (димових газів) – до 1600°С. Матеріали насадок – шамот, шамото-карборунд, динас, магнезит, хромомагнезит та ін.

Регенератори застосовуються у доменному виробництві для нагріву дуття (рис. 56), у мартенівському для нагріву повітря, що йде на горіння палива (рис. 57), у нагрівальних колодязях, у варінні скла тощо.

Теплообмін у регенераторах протікає у нестаціонарних умовах, температури теплоносіїв та насадки змінюються у часі. Для забезпечення безперервності процесу треба мінімум дві камери з насадками. Якщо періоди нагріву і охолодження не однакові, встановлюють 3 камери і більше . Наприклад, у доменному процесі два повітронагрівача нагріваються, один – охолоджується. Застосування регенераторів зв’язано з реверсуванням руху газів, для чого використовуються спеціальні клапани.

 Приклад укладки насадок регенератора наданий на рис. 58. Однією з важливих характеристик насадки є питома поверхня *f*, що показує, яка площа контакту міститься у одиниці об’єму насадки. Для насадки Каупера *f*= 15 м2/м3, для насадки Сименса *f* = 15…19 м2/м3.

 Переваги регенераторів: можливість досягнення високої температури нагріву, відсутність перетоків.

 Недоліки: періодичність дії, непостійність температур теплоносіїв, громіздкість.

Цих недоліків позбавлені регенератори з насадкою, що обертається (рис. 59). Вони застосовуються для нагріву повітря у котельних установках. Насадкою служать хвилясті листи, що дозволяють нагрівати повітря до 450°С, або керамічні кульки діаметром 3…5 мм, що працюють при температурі 600°С. Питома поверхня таких насадок *f*= 150…200 м2/м3. Регенератори такого типу мають невеликі габарити та масу. З іншого боку для них характерні великі перетоки (навіть більші, ніж в рекуператорах), і невелика робоча температура.



1 - кожух; 2 - кладка; 3 - камера горіння; 4 - насадка; 5 - розділова стіна; 6 - газовий клапан; 7 - відділювальний клапан; 8 - підведення до пальника; 9 - пальник; 10 - димовий клапан; 11 - клапан холодного дуття; 12 - патрубок трубопроводу холодного дуття; 13 - трубопровід гарячого дуття; 14 - клапан гарячого дуття; 15 - футеровка куполу; 16 - литі металеві решітки; 17 - литі металеві колони під насадкою

 Рисунок 56 – Доменний повітронагрівач.



1 – робочий простір печі; 2 – газоходи повітряного регенератора; 3 – футерована стінка газоходу; 4 – газоходи газового регенератору; 5 – кесон для подачі повітря; 6 – кесон для подачі газу; 7 – повітряний регенератор; 8 – газовий регенератор; 9 – повітряні лежаки; 10 – газові лежаки; 11 – газовий клапан; 12 – повітряний елапан; 13 – газохід димових газів на трубу

 Рисунок 57 – Мартенівська піч з регенераторами



 а) насадка Каупера б) насадка Сименса

 Рисунок 58 – Насадки з вогнетривкої цегли



1 – насадка, що обертається; 2 – камера для повітря; 3 – камера для газу

 Рисунок 59 - Регенератор з насадкою, що обертається

**17.5 Використання тепловмісту доменного газу**

Доменний газ, як це вже було сказано, виходить з печі з запасом хімічної енергії, а також з запасом тепловмісту, який визначається підвищеними температурою (на більшості печей 200…300°С) і тиском (2,5…3 МПа). Хімічна енергія доменного газу використовується при його спалюванні у різних високотемпературних агрегатах. Розглянемо способи утилізації тепловмісту доменного газу – теплової та потенційної енергії надлишкового тиску (рис. 60).

У схемі на рис. 60а використовуються газоочисні апарати мокрого типу і газова утилізаційна безкомпресорна турбіна (ГУБТ). Газ після мокрої очистки насичений водяними парами, які, при зниженні температури в ГУБТ будуть конденсуватися. Краплі води, що будуть ударятися об лопатки турбіни, що обертаються з великою швидкістю, приведуть до їх руйнування.

В цьому випадку необхідний підігрів очищеного газу перед турбіною. В наданій схемі застосовується підігрівач, в якому частина доменного газу спалюється, а гарячі димові гази підмішуються до основного потоку доменного газу, підвищуючи його температуру. Це забезпечує нормальну роботу ГУБТ, але веде до зниження теплоти згоряння доменного газу, що змушує при використанні його як палива додавати до пальної суміші більше висококалорійного палива – природного чи коксового газу. Це знижує економічну ефективність використання ГУБТ.

Схема 60б відрізняється від традиційної, що використовується на більшості металургійних підприємств, наявністю теплообмінника. Це може бути апарат трубчастого типу, де по міжтрубному простору подається доменний газ, а по трубам йде холодний теплоносій, наприклад, повітря, що потім прямує на пальники доменних повітронагрівачів або іншого металургійного агрегату. У цій схемі використовується лише теплова енергія доменного газу, а потенційна енергія надлишкового тиску втрачається на дросельній групі, де тиск знижується до необхідної споживачам величини.

1 2 3 4 5 6

**а**

1 7 2 3 4 8

**б**

1 9 6

**в**

1 10 6

**г**

1 - радіальний пиловловлювач; 2 - скрубер; 3 - труба Вентурі;

4 - краплевловлювач; 5 - підігрівач доменного газу; 6 - ГУБТ;

7 - теплообмінник; 8 - дросельна група; 9 - рукавний фільтр;

10 - електрофільтр.

а - схема з газоочисними апаратами мокрого типу і ГУБТ; б – схема з теплообмінником

Рисунок 60 - Схеми очищення доменного газу з утилізацією його енергії

З точки зору використання тепловмісту доменного газу схеми 60а та 60б найменш переважні. Найбільший інтерес представляють схеми 60в і 60г, в яких тепловміст доменного газу спрацьовується в газових утилізаційних безкомпресорних турбінах і при цьому не знижується теплота згоряння газу, тому що для його очищення використовуються апарати сухого типу – рукавний фільтр або електрофільтр.

Газова утилізаційна безкомпресорна турбіна (ГУБТ) призначена для утилізації тепловмісту доменного газу. Газ, проходячи через ГУБТ, здійснює роботу, обертаючи вал турбіни. При цьому знижуються температура і тиск газу. Тепловміст газу переходить в механічну енергію обертання турбіни. ГУБТ може служити приводом електрогенератора або повітродувки , що подає дуття в повітронагрівач , а звідти - в доменну піч.

Застосовувані в даний час ГУБТ являють собою пристрої , в яких передача механічної енергії робочому тілу здійснюється в процесі взаємодії потоку газу з лопатками спеціальної форми, встановленими на обертовому роторі . Іншим основним елементом турбіни є нерухомий статор, в якому розміщуються напрямні лопатки (сопла), що перетворюють потенційну енергію потоку газу в кінетичну і додають йому доцільне спрямування перед входом на обертові лопатки. Лопатковий апарат ГУБТ спільно з вхідним і вихідним пристроями утворює проточну частину. Залежно від форми відводу проточної частини і напрямку руху газу всі ГУБТ поділяються на осьові і радіальні .

Пил, потрапляючи в ГУБТ, викликає ерозійний знос лопаток. Щоб уникнути цього необхідна ретельна очистка газу, а також конструктивні рішення, що розподіляють весь потік газу рівномірно по всьому кільцевому перетину апарата - це призведе до меншого і більш рівномірного зносу лопаток.

Бажано з точки зору утилізації енергії і матеріаломісткості встановлювати ГУБТ після апаратів сухої газоочистки .

На рис. 61 показаний зовнішній вигляд і переріз осьової ГУБТ.





Рисунок 61 – Осьова ГУБТ