

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

Ю.О. Гічов

**ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ
ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ
Частина II**

Затверджено на засіданні Навчальної ради академії
як конспект лекцій. Протокол № 1 від 30.01.2012

Дніпропетровськ НМетАУ 2012

УДК 669.1(07)

Гічов Ю.О. Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина II: Конспект лекцій - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – 54 с.

Розглянуто вторинні енергоресурси (ВЕР) основних металургійних переділів: доменного, сталеплавильного і прокатного. Враховано досвід зі створення та експлуатації теплоутилізаційного обладнання на вітчизняних і зарубіжних підприємствах чорної металургії.

Розглянуто перспективні технологічні рішення по утилізації ВЕР, які поки не знайшли широкого застосування.

Призначений для студентів напряму 6.050601 - теплоенергетика.

Лл. 26. Бібліогр.: 5 найм.

Відповідальний за випуск М.В. Губинський, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: В.А. Габринець, д-р техн. наук, проф. (ДНУЖТ)

А.О. Ерьомін, канд. техн. наук, доц. (НМетАУ)

© Національна металургійна академія
України, 2012

© Гічов Ю.О., 2012

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА.....	6
1.1 Тепловий баланс доменного процесу і загальна характеристика ВЕР доменного виробництва.....	6
1.2 Використання доменного газу як палива.....	7
1.3 Використання надлишкового тиску доменного газу.....	9
1.4 Використання фізичної теплоти доменного газу.....	13
1.5 Використання теплоти чавуну.....	13
1.6 Використання теплоти шлаку.....	14
1.7 Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції доменної печі.....	17
1.8 Використання теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів.....	21
2 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ МАРТЕНІВСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ	22
2.1 Тепловий баланс мартенівської печі і загальна характеристика ВЕР мартенівського виробництва сталі.....	22
2.2 Використання теплоти відхідних газів.....	25
2.3 Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції мартенівської печі.....	28
3 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ.....	30
3.1 Тепловий баланс конвертерної плавки і загальна характеристика ВЕР киснево-конвертерного виробництва сталі.....	31
3.2 Використання теплоти сталі.....	32
3.3 Використання теплоти шлаку.....	34
3.4 Використання конвертерного газу	36
3.4.1 Способи відведення конвертерного газу	36
3.4.2 Використання конвертерного газу для виробництва пари.....	38
3.4.3 Використання конвертерного газу як палива.....	40

3.5 Використання теплоти охолодження кесона.....	43
4 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	44
4.1 Загальна характеристика ВЕР прокатного виробництва	44
4.2 Використання теплоти відхідних газів.....	45
4.3 Використання теплоти охолодження елементів конструкції нагрівальних печей.....	48
4.4 Комплексні теплоутилізаційні установки.....	50
4.5 Теплоутилізаційна електростанція (ТУЕС).....	52
ЛІТЕРАТУРА.....	53

ВСТУП

У першій частині конспекту лекцій з дисципліни «Вторинні енергоресурси промислових підприємств» представлені загальні відомості про вторинні енергоресурси (ВЕР) і дана характеристика основних напрямків використання ВЕР: використання горючих ВЕР в якості палива, застосування котлів-утилізаторів для отримання пари або нагрітої води шляхом утилізації теплоти відхідних газів технологічних печей і агрегатів та застосування систем випарного охолодження (СВО). Розглянута також тема «Вторинні енергоресурси коксохімічного виробництва» і наведений приклад перевірного теплового розрахунку водотрубного котла-утилізатора.

У другій частині конспекту розглянуті ВЕР основних металургійних переділів: доменного, сталеплавильного і прокатного. Аналіз ВЕР по окремих переділах представлений у вигляді теплових балансів технологічних процесів, на основі яких уточнюються ВЕР тих чи інших технологічних процесів, а потім розглядаються способи використання окремих ВЕР.

Відомості, викладені з використання ВЕР в доменному, сталеплавильному і прокатному виробництвах, з одного боку, враховують виробничий досвід по створенню і експлуатації теплоутилізаційного обладнання на вітчизняних і зарубіжних підприємствах чорної металургії, а, з іншого боку, розглядають найбільш перспективні технічні рішення по утилізації ВЕР, які поки не знайшли широкого застосування в промисловості.

Дисципліна «Вторинні енергоресурси промислових підприємств» тісно взаємопов'язана з рядом інших дисциплін, що читаються студентам спеціальності 7.05060101 - теплоенергетика: «Паливо та його спалювання», «Котельні установки», «Нагнітачі та теплові двигуни», «Джерела теплопостачання» та інші.

Конспект лекцій складений відповідно з робочою програмою і навчальним планом дисципліни «Вторинні енергоресурси промислових підприємств». Матеріал, викладений в конспекті, може бути використаний при виконанні науково-дослідних робіт студентів, курсових проектів, випускних робіт бакалаврів, дипломних проектів спеціалістів та випускних робіт магістрів.

1 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Тепловий баланс доменного процесу і загальна характеристика ВЕР доменного виробництва

Доменне виробництво є найбільшим споживачем палива в чорній металургії (до 50 - 60% від загального споживання палива) і, відповідно, найбільшим джерелом ВЕР.

Орієнтовно тепловий баланс доменної плавки має вигляд:

<i>Прихід теплоти</i>	<i>Витрата теплоти</i>
Теплота коксу ($Q_k \sim 73\%$)	Теплота, витрачена на технологію: нагрівання, плавлення, відновлення та ін. ($Q_{\text{техн}} \sim 30\%$)
Теплота замінників коксу: природний газ, вугільний пил, мазут та ін. ($Q_{\text{з.к.}} \sim 12\%$)	Теплота рідкого чавуну ($Q_{\text{ч}} \sim 6\%$)
Теплота високотемпературного повітряного дуття ($Q_{\text{п.д.}} \sim 13\%$)	Теплота рідкого шлаку ($Q_{\text{шл}} \sim 5\%$)
Теплота екзотермічних реакцій, наприклад, реакції шлакоутворення ($Q_{\text{екз}} \sim 2\%$)	Хімічна енергія доменного газу ($Q_{\text{д.г.}^x} \sim 44\%$)
	Фізична теплота доменного газу ($Q_{\text{д.г.}^{\phi}} \sim 4\%$)
	Теплота охолодження елементів конструкції печі ($Q_{\text{охол}} \sim 4\%$)
	Інші витрати і втрати теплоти ($Q_{\text{ін}} \sim 7\%$)
Всього: 100%	Всього: 100%

З витратної частини теплового балансу впливає, що доменний процес є джерелом:

- теплових ВЕР, що становлять 19% від загальної витрати теплоти (теплота рідкого чавуну $\sim 6\%$, теплота шлаку $\sim 5\%$, фізична теплота доменного газу $\sim 4\%$ і теплота охолодження елементів конструкції доменної печі $\sim 4\%$);
- паливного ВЕР, що становить 44% від загальної витрати теплоти (хімічна енергія доменного газу).

Всього на частку ВЕР доводиться $\sim 63\%$ від загальної витрати теплоти.

З витратної частини теплового балансу випливає, що найбільшим ВЕР в доменному виробництві є доменний газ (48 % від загальної витрати теплоти за тепловим балансом). Доменний газ є також ВЕР надлишкового тиску, що не відображено в тепловому балансі. В цілому доменний газ - комбінований ВЕР, тобто тепловий, паливний і надлишкового тиску.

Крім теплових ВЕР, зазначених у тепловому балансі доменної плавки, до ВЕР доменного виробництва відноситься також теплота відхідних газів доменних повітрянагрівачів, яка становить близько 20 % від витрат теплоти на підігрів повітряного дуття.

Розподіл різних ВЕР в загальному обсязі ВЕР доменного виробництва складе:

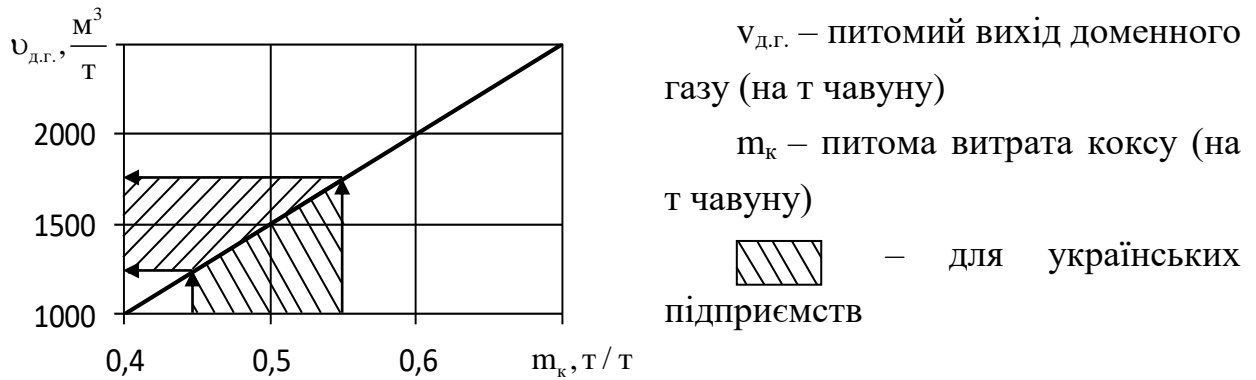
<i>Найменування ВЕР</i>	<i>Частка в загальному обсязі, %</i>
Хімічна енергія доменного газу	75
Фізична теплота доменного газу	4
Надлишковий тиск доменного газу	4
Теплота рідкого чавуну	5
Теплота шлаку	4
Теплота охолоджувача	4
Теплота відхідних газів доменних повітрянагрівачів	4
Всього	100

1.2 Використання доменного газу як палива

У паливному газовому балансі підприємств чорної металургії частка доменного газу становить 30 – 40 %, що вказує на велике значення доменного газу в паливозабезпеченні підприємств.

Вихід і теплота згоряння доменного газу в значній мірі визначаються витратою коксу.

Орієнтовно залежність між виходом доменного газу і витратою коксу має наступний вигляд:



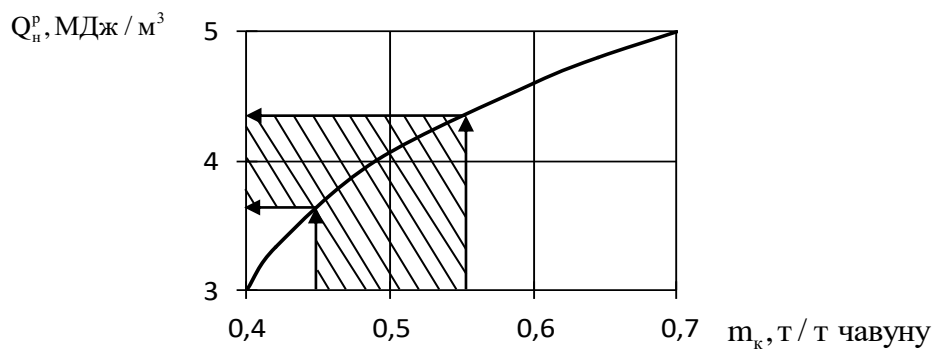
Крім витрати коксу, вихід доменного газу залежить також від ряду інших технологічних показників, вплив яких враховується шляхом статистичної обробки дослідних даних по доменній плавці:

$$V_{д.г.} = A + A_1 \cdot \phi_1 + A_2 \cdot \phi_2 + A_3 \cdot \phi_3 + A_4 \cdot \phi_4 + A_5 \cdot \phi_5 + A_6 \cdot \phi_6 + A_7 \cdot \phi_7, \quad (1.1)$$

де $A, A_1 \dots A_7$ – коефіцієнт рівняння регресії;

$\phi_1 \dots \phi_7$ – фактори, що впливають на вихід доменного газу: ϕ_1 – витрата агломерату; ϕ_2 – витрата обкотишів; ϕ_3 – витрата шлакоутворюючих; ϕ_4 – витрата замінників коксу; ϕ_5 – концентрація кисню в дутті; ϕ_6 – температура повітряного дуття; ϕ_7 – вихід шлаку.

Орієнтовно залежність теплоти згорання доменного газу Q_n^p від питомої витрати коксу m_k має наступний вигляд:



У розрахунках паливних балансів підприємств використовують наведену теплоту згорання доменного газу - $4,2 \text{ МДж/м}^3$.

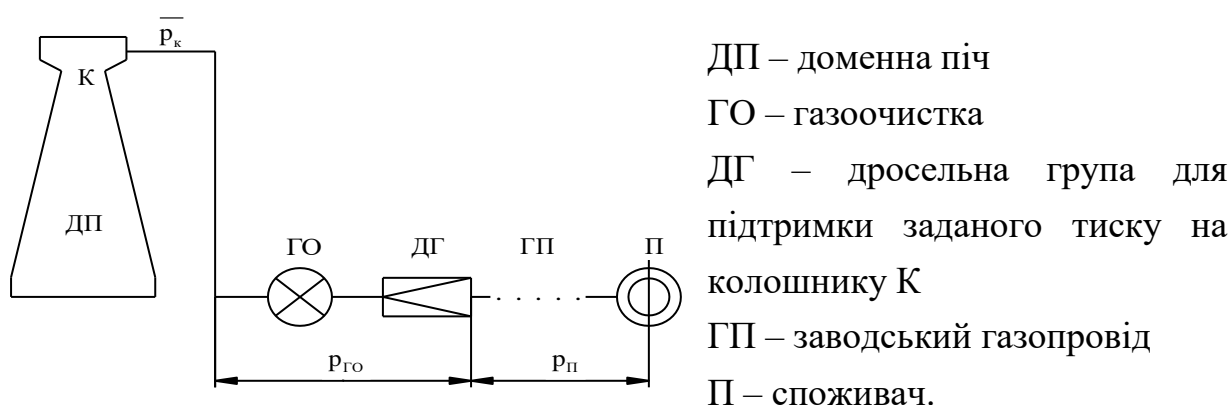
Основними споживачами доменного газу є:

- доменні повітрянагрівачі ~ 35%;
- котли ТЕЦ ~ 30%;
- коксохімічне виробництво ~ 25%;
- нагрівальні печі прокатних цехів ~ 10%.

1.3 Використання надлишкового тиску доменного газу

На українських підприємствах тиск доменного газу на колошниках печей p_k становить $0,18 \div 0,34$ МПа (середнє значення $\bar{p}_k = 0,26$ МПа), на зарубіжних печах $p_k \leq 0,5$ МПа.

З урахуванням необхідного тиску для очищення, транспортування і використання доменного газу у споживачів з'являється нереалізований надлишковий тиск.



Відповідно до балансу тиску доменного газу нереалізований надлишковий тиск становитиме:

$$p_{\text{надл}} = p_k - (p_{\text{го}} + p_{\text{п}}) = 0,26 - (0,02 + 0,01) = 0,23 \text{ МПа}, \quad (1.2)$$

де $p_{\text{го}}$ – втрати тиску на газоочистці ($p_{\text{го}} = 0,02$ МПа);

$p_{\text{п}}$ – тиск, необхідний для транспортування доменного газу до споживача і використання газу споживачем ($p_{\text{п}} = 0,01$ МПа).

Нереалізований надлишковий тиск доменного газу використовують для виробництва електроенергії в ГУБТ - газові утилізаційні безкомпресорні турбіни.

Перед подачею доменного газу в ГУБТ після мокрого очищення його слід нагрівати до температури $250 \div 600$ °С. Нижня межа забезпечує вихід газу з турбіни при температурі $60 \div 80$ °С, що виключає конденсацію вологи, а в разі негативних температур газу - обмерзання проточної частини турбіни. Верхня межа обумовлена термостійкістю сталей, доцільних з економічної точки зору для виготовлення ротора турбін даного класу.

Залежно від способу підігріву доменного газу ГУБТ поділяють на 3 групи:

Позначення до рисунка 1.1:

- 1 – газопровід доменного газу від газоочистки;
- 2 – дросельна група, що призначена для підтримки відповідного тиску на колошнику доменної печі;
- 3 – газопровід доменного газу низького тиску (заводський газопровід);
- 4 – перекидний клапан доменного газу високого тиску;
- 5 – регенеративний теплообмінник;
- 6 – комплексний рекуператор, що включає позиції 7 - 12;
- 7 – камера згоряння;
- 8 – рекуператор для підігріву доменного газу високого тиску;
- 9 – рекуператор для підігріву доменного газу низького тиску, що йде на опалення комплексного рекуператора;
- 10 – рекуператор для підігріву повітря, що йде на спалювання доменного газу низького тиску;
- 11 – дуттьовий вентилятор;
- 12 – ексгаустер для відводу продуктів згоряння;
- 13 – газова турбіна;
- 14 – електрогенератор;
- 15 – перекидний клапан доменного газу низького тиску.

Доменний газ високого тиску після газоочистки надходить в розігріту частину насадки регенеративного теплообмінника 5, де нагрівається до температури 200 - 300 °С. Потім газ надходить в підігрівач 8 комплексного рекуператора 6, де нагрівається до температури 600 °С. Втрати надлишкового тиску при підігріві складають близько 0,01 МПа, тобто в газову турбіну 13 газ надходить з параметрами: 0,22 МПа і 600 °С.

Після розширення в турбіні параметри доменного газу складуть: надлишковий тиск – 0,02 МПа, температура – ~ 300 °С. Теплота доменного газу після турбіни використовується для підігріву насадки регенератора, після якої газ з надмірним тиском 0,01 МПа і температурою до 100 °С направляється в заводський газопровід.

Почергову роботу насадок регенератора в режимах нагріву і охолодження забезпечують перекидні клапани 4 і 15.

Пропускна здатність ГУБТ-6 складає ~ 150 000 м³/г.

Недоліки ГУБТ-6:

- громіздкість внаслідок наявності регенеративного теплообмінника, що вимагає для нормальної роботи обмежені швидкості газу (до 1 м/с), що збільшує обсяги теплообмінника;
- великі капітальні та експлуатаційні витрати внаслідок застосування двох типів теплообмінників і великого обсягу обладнання;
- витрата (спалювання) доменного газу на обслуговування ГУБТ.

Принципова схема ГУБТ з використанням змішуючого теплообмінника представлена на рисунку 1.2.

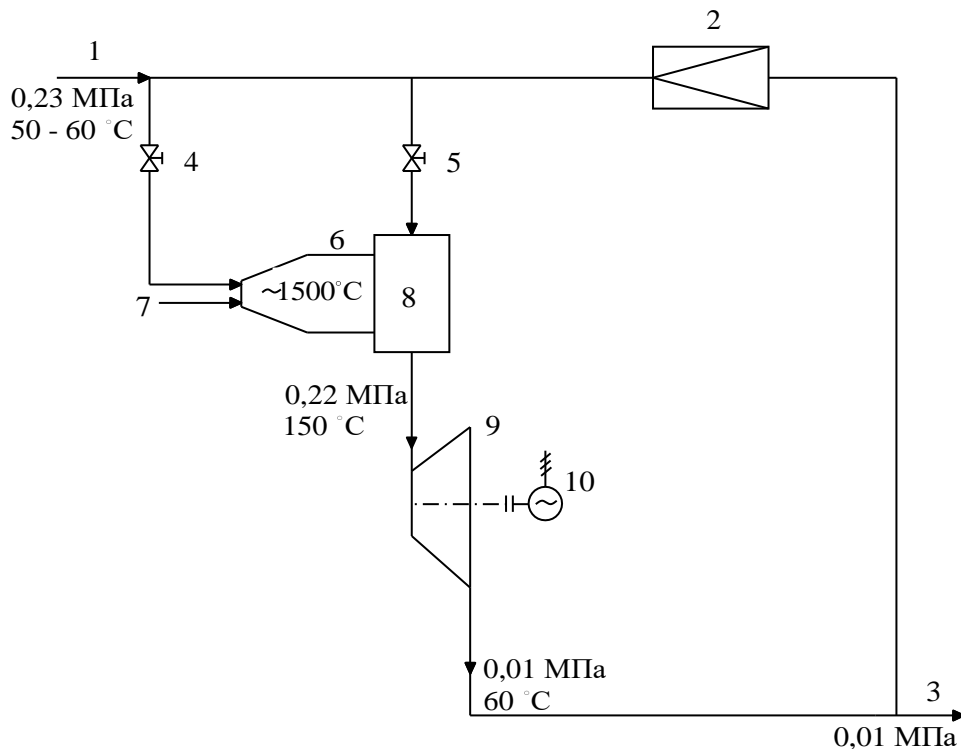


Рисунок 1.2 – Принципова схема ГУБТ з підігрівом доменного газу шляхом змішування з високотемпературними продуктами згоряння

Позначення до рисунка 1.2:

- 1 – газопровід доменного газу від газоочистки;
- 2 – дросельна група;
- 3 – газопровід доменного газу низького тиску (заводський газопровід);
- 4 – подача доменного газу на спалювання;
- 5 – подача доменного газу на змішування;
- 6 – камера згоряння;
- 7 – подача стиснутого повітря;
- 8 – камера змішування;

9 – газова турбіна;

10 – електрогенератор.

Переваги в порівнянні з ГУБТ-6:

- простота, компактність обладнання і, відповідно, значно менші капітальні витрати;

- більш ефективне використання надлишкового тиску газу за рахунок відсутності теплообмінників, що викликають втрати тиску газу.

Недолік: зниження теплоти згорання доменного газу внаслідок баластування продуктами згорання.

1.4 Використання фізичної теплоти доменного газу

Фізична теплота доменного газу, обумовлена температурою на колошнику $150 \div 350$ °С, не використовується з наступних причин:

- внаслідок практично повної втрати теплоти газу при вологому очищенні, яке домінує в доменних цехах;

- внаслідок невисокої температури доменного газу, що робить недоцільним використання традиційних поверхневих теплообмінників.

Рішення проблеми використання фізичної теплоти доменного газу здійснюється в наступних напрямках:

- застосування сухого очищення газу з подальшим використанням газу в ГУБТ;

- використання неочищеного доменного газу до газоочистки для підігріву очищеного газу після газоочистки з подальшим використанням очищеного газу в ГУБТ;

- використання доменного газу до газоочистки для підігріву мережевої води в системах теплопостачання;

- застосування контактних теплообмінників.

1.5 Використання теплоти чавуну

Фізична теплота чавуну, обумовлена температурою на випуску з доменної печі $1350 \div 1400$ °С, використовується в сталеплавильному

переділі шляхом заливки чавуну в рідкому вигляді в сталеплавильні агрегати: мартенівські печі, конвертери і в електросталеплавильні печі.

У залежності від співвідношення переробного та товарного чавуну на підприємствах в сталеплавильних агрегатах використовують $50 \div 90\%$ теплоти рідкого чавуну.

1.6 Використання теплоти шлаку

Питомий вихід шлаку становить $0,6 \div 0,8$ т/т чавуну, з температурою випуску з доменної печі $1450 - 1550$ °С, що робить теплоту шлаку досить значним тепловим ВЕР.

Використання теплоти шлаку залежить від способу його грануляції, яка може бути водяною або повітряною. Гранульований шлак знаходить широке застосування в якості будівельного матеріалу.

При **водяній грануляції** теплоту шлаку використовують для виробництва пари або нагрітої води в системах тепlopостачання (див. рис. 1.3)

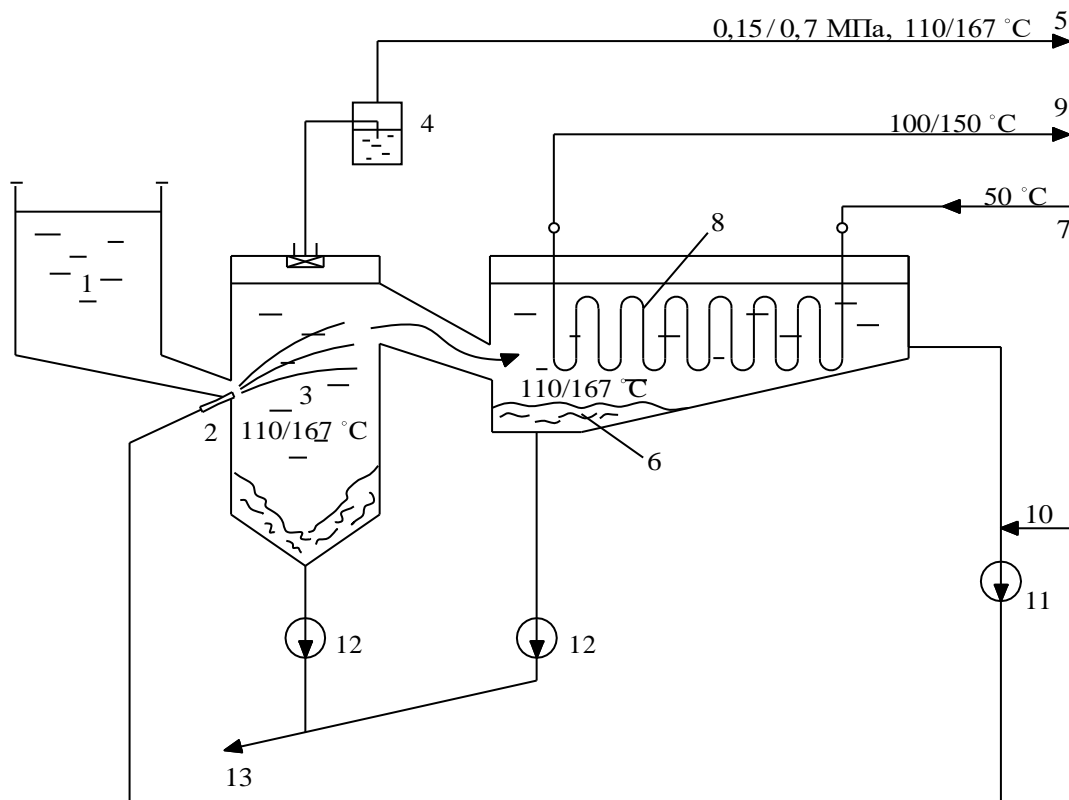


Рисунок 1.3 – Принципова схема використання теплоти доменного шлаку при водяній грануляції

Позначення до рисунка 1.3:

- 1 – накопичувач шлаку;
- 2 – сопло для подачі води на грануляцію;
- 3 – гранулятор, що виконує також функцію контактного парогенератора і первинного відстійника гранульованого шлаку;
- 4 – барботажне очищення пари від сірки;
- 5 – паропровід, що подає системи тепlopостачання;
- 6 – вторинний відстійник гранульованого шлаку, що виконує також функцію мережевого підігрівача;
- 7 – зворотна лінія теплової мережі;
- 8 – поверхні нагріву мережевого підігрівача;
- 9 – лінія, що подає теплової мережі;
- 10 – добавка води, що компенсує випаровування і втрати води;
- 11 – циркуляційний насос;
- 12 – багерні насоси для транспортування гідрошлакової суміші;
- 13 – подача гідрошлакової суміші на склад.

Рідкий шлак, що надходить самопливом в гранулятор 3, диспергується і гранулюється в потоці води з сопла 2. Грануляція шлаку супроводжується скипанням води. Утворений пар після сіркоочищення 4 надходить у вхідний паропровід 5 системи тепlopостачання.

Тиск в грануляторі підтримується 0,15 або 0,7 МПа, що призводить до отримання насиченої пари з температурою, відповідно, 110 °С або 167 °С.

Підігрів мережної води відбувається у вторинному відстійнику 6 до температури 110 °С або 150 °С в залежності від температури води, що перетікає з первинного відстійника.

Установка дозволяє заощадити значну кількість палива в опалювальний період за рахунок скорочення спалюваного палива в котельнях.

Недоліки:

- сезонний характер використання отриманої теплоти при утилізації теплоти шлаку;
- сірководокислотна корозія конструкцій установки і поверхонь нагріву мережевого підігрівача внаслідок переходу з'єднань сірки з шлаку в воду;
- необхідність ретельного очищення пари від сполук сірки;

- необхідність періодичної ревізії і чищення від забруднень комунікацій установки дрібнодисперсним шлаком.

При повітряній грануляції теплота нагрітого повітря в результаті грануляції шлаку використовується для виробництва пари в котлі-утилізаторі (див. рис. 1.4).

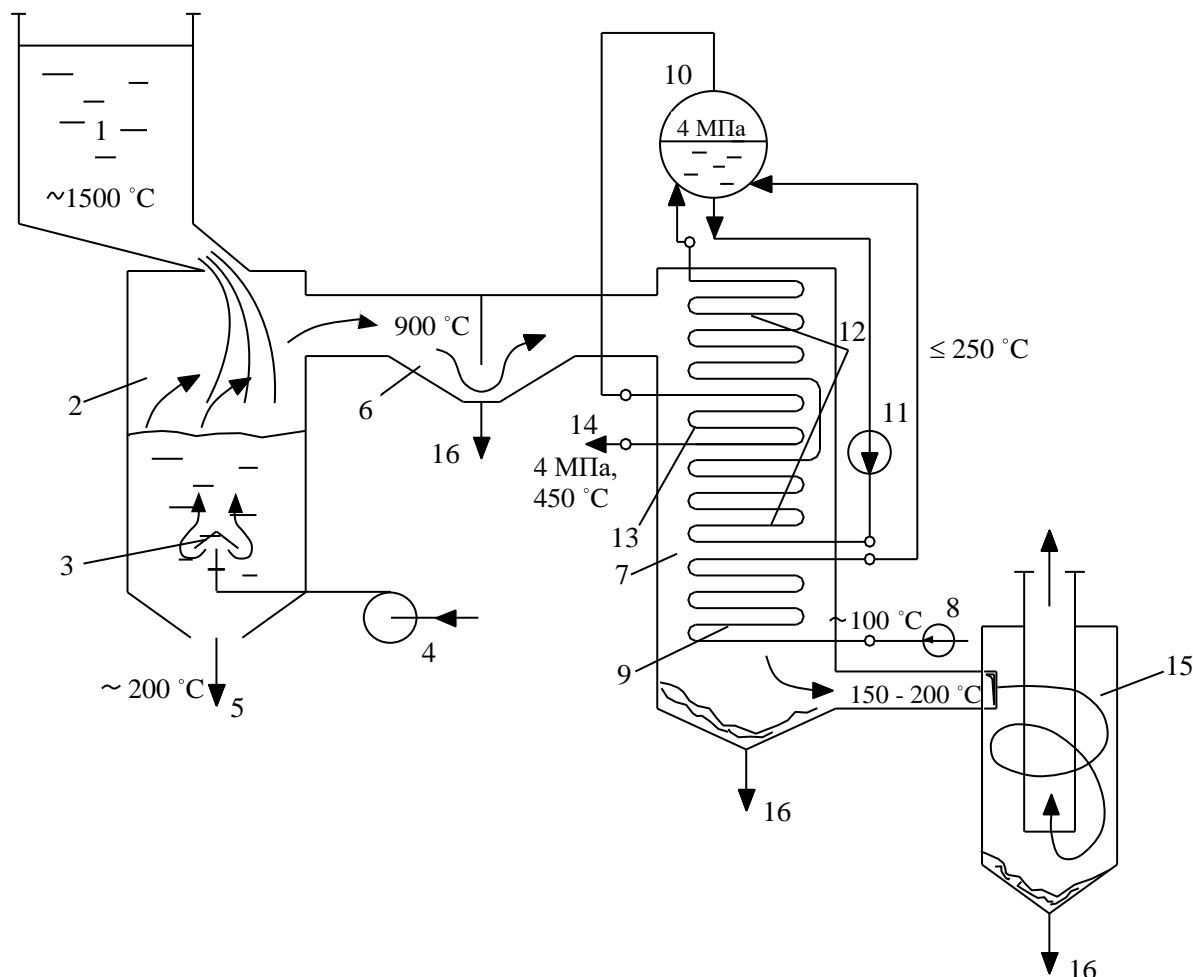


Рисунок 1.4 – Принципова схема використання теплоти доменного шлаку при повітряній грануляції

Позначення до рисунка 1.4:

- 1 – накопичувач шлаку;
- 2 – шахта повітряного гранулятора;
- 3 – повітророзподільний пристрій;
- 4 – повітродувка;
- 5 – відвід гранульованого шлаку;
- 6 – пилоосадна камера;
- 7 – котел-утилізатор, що включає позиції 8 - 13;

- 8 – живильний насос;
- 9 – економайзер;
- 10 – барабан-сепаратор;
- 11 – циркуляційний насос;
- 12 – випарні поверхні нагрівання;
- 13 – пароперегрівач;
- 14 – вихід перегрітої пари;
- 15 – пилоосадний циклон;
- 16 – відвід дрібнодисперсного шлаку.

Рідкий шлак самопливом надходить в шахту повітряного гранулятора 2, де гранулюється зустрічним потоком повітря. Гранульований шлак в нижній частині шахти охолоджується в шаровому режимі.

Нагріте до 900 °С повітря в результаті грануляції шлаку після пилоосадних камер 6 надходить в котел-утилізатор 7, де, охолоджуючись до 150 – 200 °С, передає теплоту на виробництво пари.

Перевагою такої установки в порівнянні з попередньою є отримання пари енергетичних параметрів, яку можна направити у ТЕЦ для вироблення електроенергії в турбогенераторах.

Недоліки:

- абразивний знос елементів установки і поверхонь нагріву котла-утилізатора внаслідок запиленості повітря шлаковим пилом;
- сіркокислотна корозія хвостових поверхонь нагріву котла-утилізатора (при грануляції сполуки сірки в шлаці частково переходять в повітря);
- необхідність доочищення повітря після пилоосадних циклонів.

1.7 Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції доменної печі

Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції доменної печі залежить від способу охолодження: водяне або випарне.

При **водяному охолодженні** теплоту нагрітої до 50 - 55 °С води можна використовувати для вироблення електроенергії в паросилових установках, що

працюють на низькокиплячих рідинах, наприклад, фреонах з температурою кипіння в межах $24 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (див. рис. 1.5).

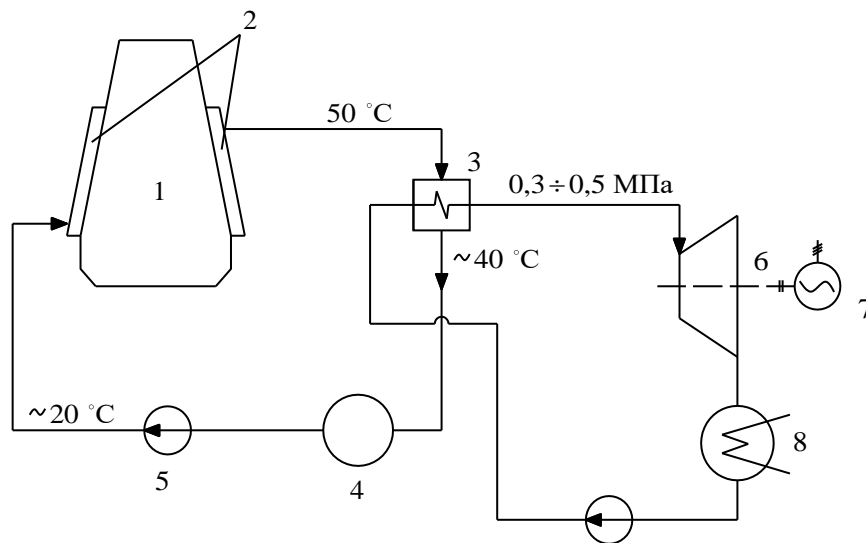


Рисунок 1.5 – Принципова схема установки для використання теплоти водяного охолодження доменної печі

Позначення до рисунка 1.5:

- 1 – доменна піч;
- 2 – холодильники шахти доменної печі;
- 3 – випарник фреону;
- 4 – охолоджувальний пристрій оборотної системи водопостачання (градирня);
- 5 – циркуляційний насос оборотної системи;
- 6 – фреонова турбіна;
- 7 – електрогенератор;
- 8 – конденсатор фреону;
- 9 – фреоновий насос.

Установка, наведена на рисунку 1.5, включає фреонові турбогенератори потужністю $2 \div 10$ тис. кВт. Тиск фреону на вході в турбіну становить $0,3 \div 0,5 \text{ МПа}$.

Переваги установки:

- висока надійність роботи внаслідок невисоких тисків і температури фреону;
- можливість отримання електроенергії безпосередньо в доменному цеху і використання її для власних потреб цеху.

Недоліки:

- невисока енергетична ефективність паросилової установки, к.к.д. якої визначається добутком:

$$\eta_{\text{уст}} = \eta_{\text{вип}} \cdot \eta_t \cdot \eta_{\text{oi}} \cdot \eta_{\text{ем}}, \quad (1.3)$$

де $\eta_{\text{вип}}$ - тепловий к.п.д. випарника фреону, $\eta_{\text{вип}} \approx 0,33$;

η_t - термічний к.к.д. циклу, $\eta_t \approx 0,30$;

η_{oi} - внутрішній відносний к.к.д. турбіни, $\eta_{\text{oi}} \approx 0,85$;

$\eta_{\text{ем}}$ - електромеханічний к.к.д. турбогенератора, $\eta_{\text{ем}} \approx 0,98$.

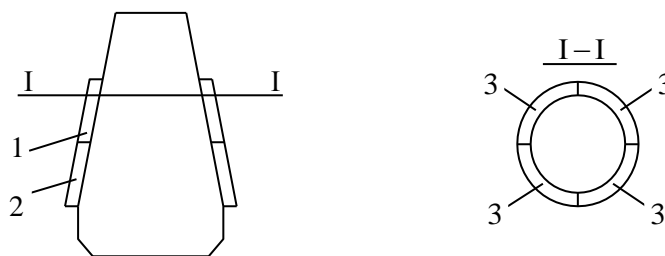
$$\eta_{\text{уст}} = 0,33 \cdot 0,30 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \approx 0,08, \text{ тобто } 8\%;$$

- негативний вплив фреону на екологію (утворення озонових дір у атмосфері).

При **випарному охолодженні** теплоту охолодження отримують у вигляді насиченої водяної пари.

Розглянемо систему випарного охолодження (СВО) холодильників шахти доменної печі, через які відводиться основна кількість теплоти охолодження.

Для забезпечення надійної циркуляції холодильники шахти доменної печі поділяють по висоті на зони (верхня і нижня), а по периметру на секції (2 ÷ 4 секцій).



1 – верхня зона; 2 – нижня зона; 3 – секції

Кожна секція обладнується автономною системою випарного охолодження (див. рис. 1.6).

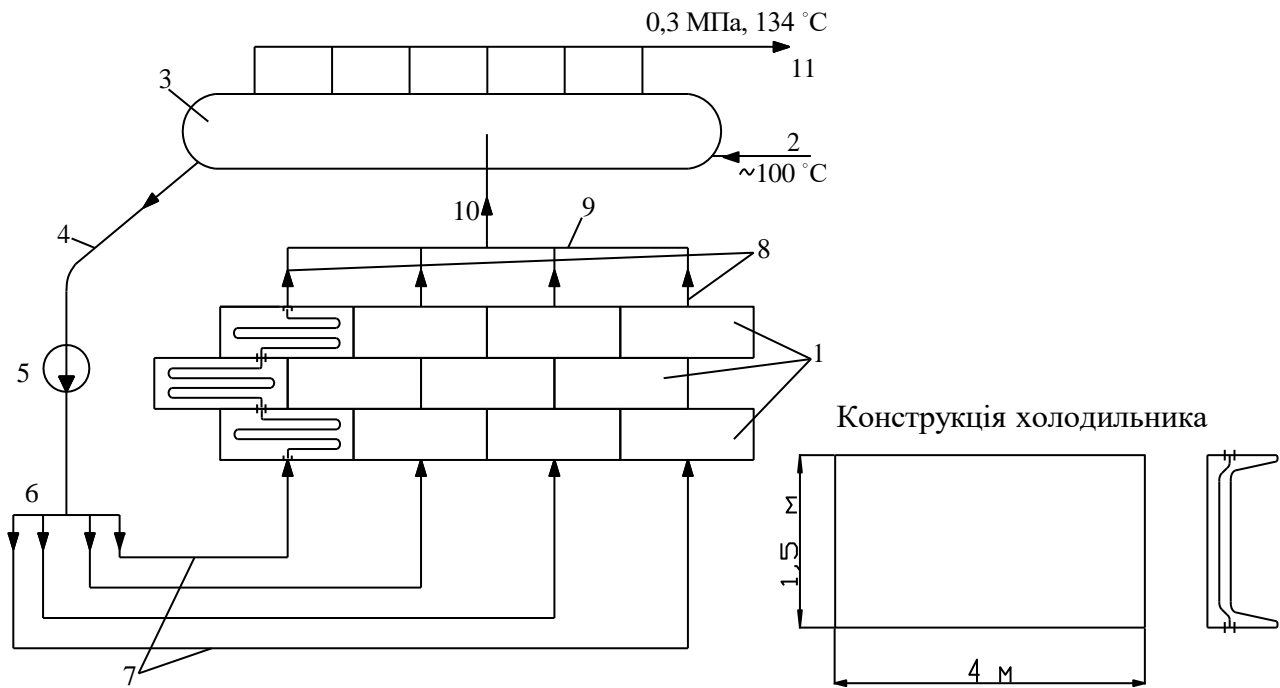


Рисунок 1.6 – Схема СВО секції холодильників шахти доменної печі

Позначення до рисунка 1.6:

- 1 – холодильники шахти доменної печі;
- 2 – подача поживної води;
- 3 – барабан-сепаратор;
- 4 – опускна труба;
- 5 – циркуляційний насос;
- 6 – колектор опускної труби;
- 7 – індивідуальні підвідні труби;
- 8 – індивідуальні відвідні труби;
- 9 – колектор підйомної труби;
- 10 – підйомна труба;
- 11 – вихід насиченої пари.

Холодильники шахти доменної печі виконані у вигляді чавунного лиття з вмонтованими в лиття трубами поверхонь нагріву. Складені один над одним холодильники утворюють автономний контур циркуляції (див. рис. 1.6).

Недоліком СВО холодильників шахти доменної печі є невисокий тиск одержуваної пари (0,2 – 0,3 МПа), що обмежує можливості її застосування.

Робота СВО холодильників шахти доменної печі дозволяє судити про рівномірність теплового режиму в печі.

1.8 Використання теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів

Теплота відхідних газів доменних повітрянагрівачів, обумовлена температурою на виході $150 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$, може бути використана в двох напрямках:

- для підігріву мережної води в системах теплопостачання (утилізація теплоти);
- для підігріву повітря, що йде на спалювання палива, при нагріванні насадки повітрянагрівача (рекуперація теплоти).

Для підігріву повітря найбільш раціональним є застосування теплообмінників з проміжним теплоносієм, який дозволяє компактно розмістити теплообмінники без великогабаритних коробів для підведення повітря і відводу відхідних газів (див. рис. 1.7).

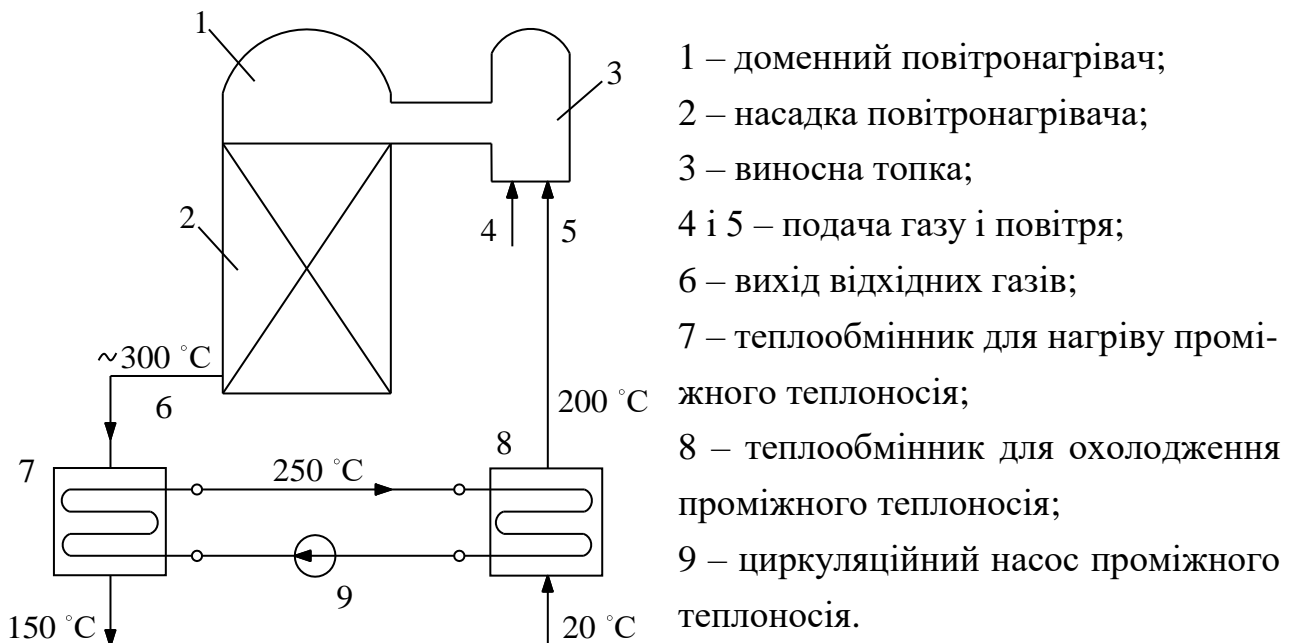


Рисунок 1.7 – Схема використання теплоти відхідних газів доменних повітрянагрівачів

В якості проміжного теплоносія застосовують воду, масло, органічні сполуки (дифенол, дифенолоксид, доутерм). При нагріванні повітря до 200 °С економія палива в доменних повітрянагрівачах становить 4 – 5 %. При використанні в якості палива доменного газу доцільним є також нагрів газу.

2 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ МАРТЕНІВСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

2.1 Тепловий баланс мартенівської печі і загальна характеристика ВЕР мартенівського виробництва сталі

У світовому виробництві сталі на частку мартенівської сталі припадає близько 30 %. В Україні частка мартенівської сталі становить до 40 %.

Виплавка мартенівської сталі включає завалку шихти, нагрівання, плавлення, доведення і випуск плавки. Тривалість циклу плавки 4 ÷ 9 годин.

При опаленні мартенівської печі з певним інтервалом часу здійснюють перекидання клапанів (10 - 15 хв), що змінює напрямок руху продуктів згоряння і забезпечує почерговий нагрів насадок регенератора. Почергове охолодження насадок регенератора здійснюється повітрям, що йде на горіння палива (див. рис. 2.1).

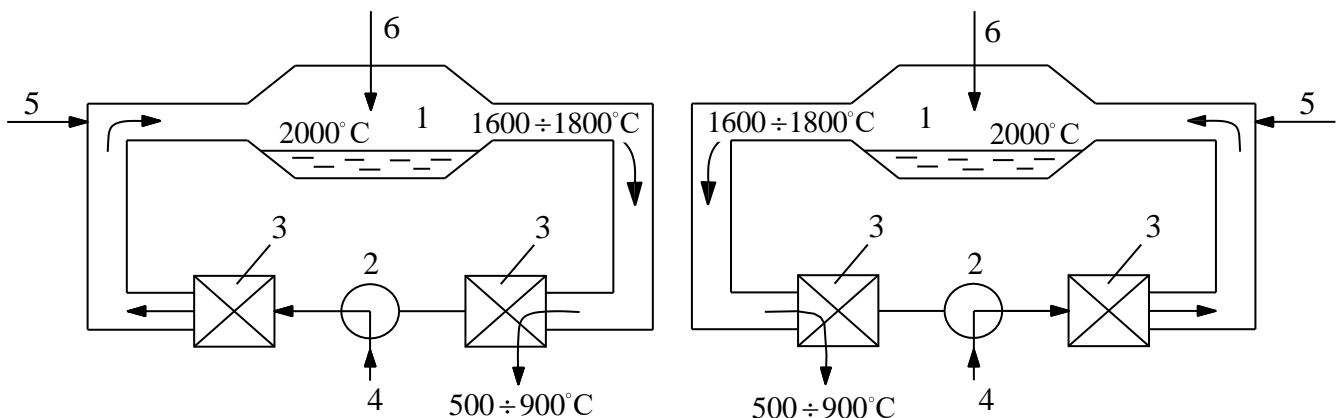


Рисунок 2.1 – Схема роботи мартенівської печі

Позначення до рисунка 2.1:

- 1 – ванна печі;
- 2 – перекидний клапан;
- 3 – регенератори;

- 4 – підведення повітря;
- 5 – подача палива;
- 6 – киснева фурма

В якості палива використовують природний газ, коксодоменну суміш, мазут та ін. При доведенні сталі застосовують кисневу продувку, яка суттєво скорочує тривалість плавки.

Виплавка мартенівської сталі є дуже енергоємним процесом: питома витрата палива близько 100 кг умовного палива на т сталі.

Тепловий баланс мартенівської печі залежить від виду процесу: рудний, скрап-рудний або скрап-процес. У рудному процесі основна металошихта - рідкий чавун ($t_{ч} = 1340 - 1360 \text{ }^{\circ}\text{C}$), в скрап-рудному процесі - рідкий чавун і металобрухт, в скрап-процесі - металобрухт.

Орієнтовний тепловий баланс мартенівської печі при скрап-рудному процесі:

Прихід теплоти	Витрата теплоти
Теплота рідкого чавуну ($Q_{ч} \sim 10\%$)	Теплота рідкої сталі ($Q_{ст} \sim 20\%$)
Теплота палива ($Q_{т.} \sim 50\%$)	Теплота шлаку ($Q_{шл} \sim 5\%$)
Теплота нагрітого повітря ($Q_{н.п.} \sim 25\%$)	Теплота ендотермічних реакцій, пов'язаних з технологією виплавки сталі ($Q_{енд} \sim 10\%$)
Теплота екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну ($Q_{екз} \sim 15\%$)	Теплота відхідних газів ($Q_{відх} \sim 45\%$)
	Теплота охолоджувача елементів конструкції печі ($Q_{охол} \sim 10\%$)
	Втрати теплоти ($Q_{втр} \sim 10\%$)
Всього: 100%	Всього: 100%

Реконструкція мартенівського виробництва сталі здійснювалася шляхом переобладнання звичайних мартенівських печей в двованні сталеплавильні агрегати (ДСПА), що дозволяє збільшити потужність сталеплавильного агрегату при мінімальних капітальних витратах (див. рис. 2.2).

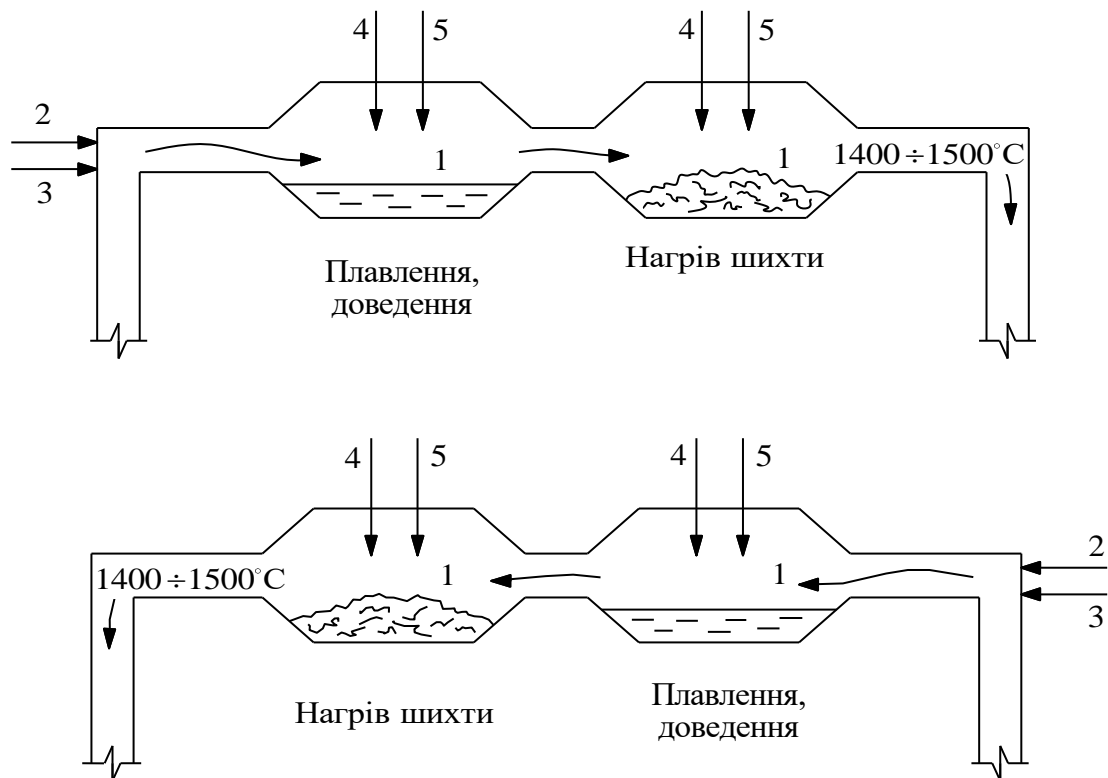


Рисунок 2.2 – Схема двованного сталеплавильного агрегату (ДСПА)

Позначення до рисунка 2.2:

- 1 – ванни сталеплавильного агрегату;
- 2 – подача палива;
- 3 – подача повітря;
- 4 – киснева фурма;
- 5 – газокиснева фурма.

В одній з ванн ДСПА здійснюється нагрів шихти, в іншій - плавлення і доведення.

Агрегат працює без регенераторів на холодному повітрі, перекидка клапанів здійснюється два рази за плавку.

Відхідні гази після плавлення і доведення використовуються для нагріву шихти. Дефіцит теплоти при підігріві і плавленні шихти компенсується додатковим спалюванням палива через газокисневу фурму.

Орієнтовний тепловий баланс ДСПА:

<i>Прихід теплоти</i>	<i>Витрата теплоти</i>
Теплота рідкого чавуну ($Q_{\text{ч}} \sim 20\%$)	Теплота рідкої сталі ($Q_{\text{ст}} \sim 40\%$)
Теплота палива ($Q_{\text{п}} \sim 20\%$)	Теплота шлаку ($Q_{\text{шл}} \sim 10\%$)
Теплота екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну ($Q_{\text{екз}} \sim 60\%$)	Теплота ендотермічних реакцій, пов'язаних з технологією виплавки сталі ($Q_{\text{енд}} \sim 10\%$)
	Теплота відхідних газів ($Q_{\text{відх}} \sim 20\%$)
	Теплота охолоджувача елементів конструкції печі ($Q_{\text{охол}} \sim 10\%$)
	Втрати теплоти ($Q_{\text{втр}} \sim 10\%$)
Всього: 100%	Всього: 100%

З витратної частини теплових балансів мартенівської печі і ДСПА випливає, що обидва процеси є джерелами теплових ВЕР, на які припадає близько 90 % теплоти у витратній частині теплових балансів (теплота сталі, шлаку, відхідних газів і охолоджувача елементів конструкції печей).

2.2 Використання теплоти відхідних газів

Теплота відхідних газів мартенівських печей в значній мірі використовується для підігріву повітря в регенераторах. Після регенераторів температура відхідних газів становить $500 \div 900$ °С. Теплота газів, що відходять після регенераторів, використовується в котлах-утилізаторах (див. рис. 2.3).

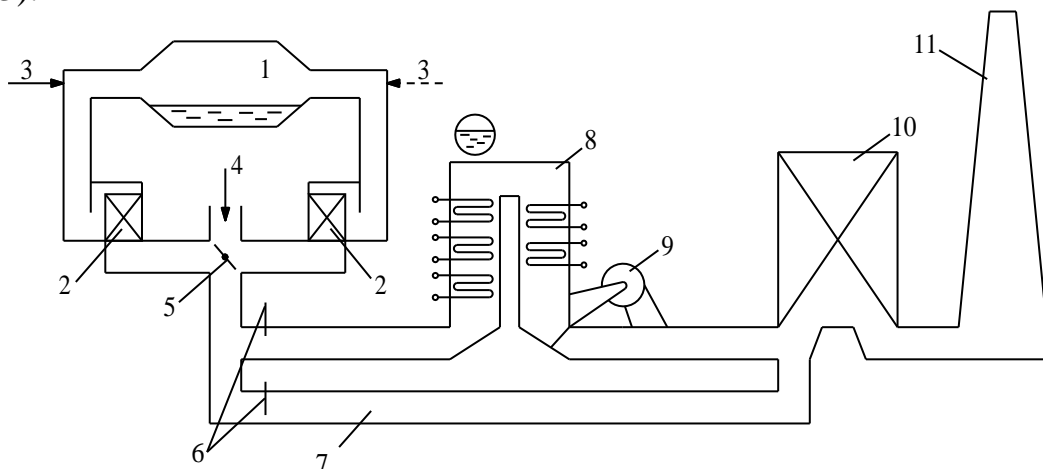


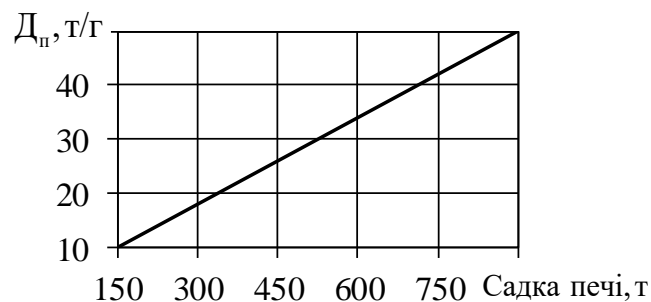
Рисунок 2.3 – Схема розміщення котла-утилізатора на газовідвідному тракті мартенівської печі

Позначення до рисунка 2.3:

- 1 – мартенівська піч;
- 2 – регенератори;
- 3 – подача палива;
- 4 – подача повітря;
- 5 – перекидний клапан;
- 6 – шибери;
- 7 – обвідний газохід;
- 8 – котел-утилізатор;
- 9 – димосос;
- 10 – газоочищення;
- 11 – димова труба.

За мартенівськими печами встановлюють водотрубні конвективні котли-утилізатори. Параметри одержуваної пари: тиск $p_n \leq 4,5$ МПа, температура перегрітої пари $t_{пн} \leq 450$ °С. Питома паропродуктивність становить приблизно 0,4 т пари/т сталі.

Залежність паропродуктивності котла-утилізатора D_n від садки мартенівської печі:



Установка котлів-утилізаторів за мартенівськими печами знижує температуру відхідних газів до 150 - 200 °С, що дозволяє встановити димосос, забезпечити примусову тягу і збільшити продуктивність печі.

Використання відхідних газів за ДСПА шляхом установки серійних котлів-утилізаторів вимагає вирішення наступних проблем:

1. Зниження температури відведених газів. Температура відхідних газів за ДСПА становить 1400 - 1500 °С, що виключає безпосередньо застосування серійних водотрубних котлів-утилізаторів.

2. Спалювання CO, концентрація якого в відхідних газах ДСПА значно вище, ніж в відхідних газах мартенівських печей, внаслідок більш інтенсивної кисневої продувки.

Можливе рішення цих задач ілюструється на схемі розміщення котла-утилізатора за ДСПА (див. рис. 2.4).

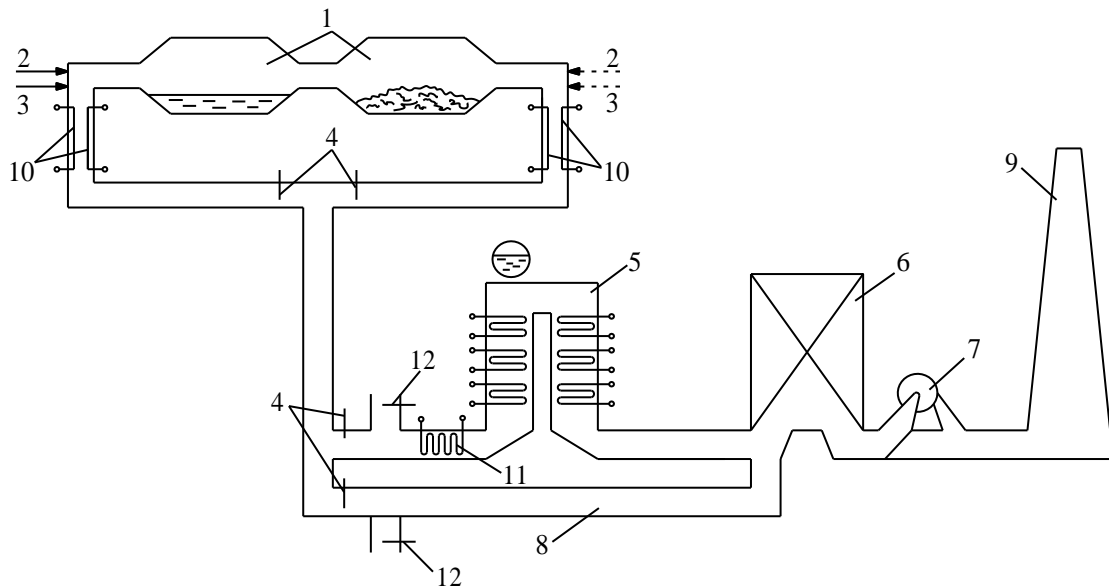


Рисунок 2.4 – Схема розміщення котла-утилізатора на газовідвідному тракті ДСПА

Позначення до рисунка 2.4:

- 1 – сталеплавильні ванни;
- 2 і 3 – подача палива і повітря;
- 4 – шибери каналів і газоходів печі;
- 5 – котел-утилізатор;
- 6 – газоочищення;
- 7 – димосос;
- 8 – обвідний газохід;
- 9 – димова труба;
- 10 – радіаційні поверхні нагріву, виконані у вигляді екранів вертикальних газоходів ДСПА;
- 11 – попередньо включені випарні поверхні нагріву;
- 12 – клапан для подачі повітря з метою допалювання CO.

Охолодження газів, що відходять, досягається установкою радіаційних екранів 10 у вертикальних газоходах ДСПА і попередньо включеною секцією випарних поверхонь нагріву 11. Спалювання СО здійснюється підсмоктуванням повітря через клапан 12.

2.3 Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції мартенівської печі

Використання теплоти охолоджувача елементів конструкції мартенівської печі можливо при обладнанні печі системою випарного охолодження (СВО). Більшість мартенівських печей обладнано СВО, яка забезпечує охолодження близько 25 елементів печі: кесони газових прольотів, п'ятові балки головного склепіння печі, стовпчики передніх стінок, рами завалочних вікон, форсунки, перекидні клапани та інше (див. рис. 2.5).

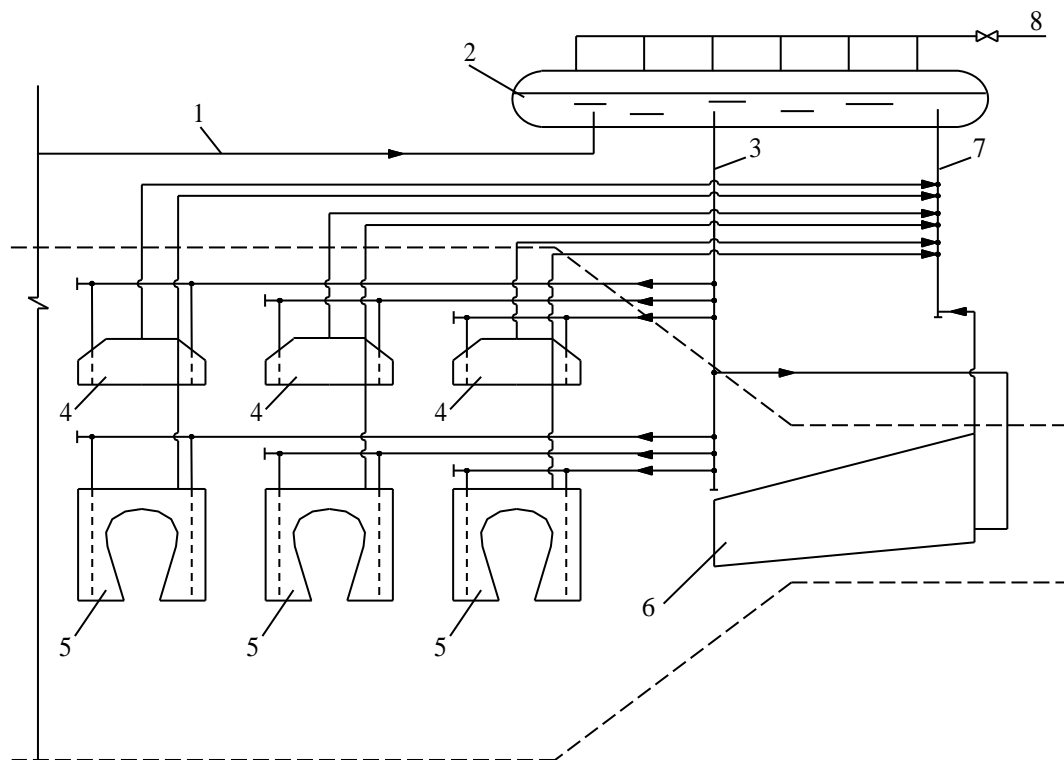


Рисунок 2.5 – Принципова схема СВО з колекторною розводкою труб

Позначення до рисунка 2.5:

1 – подача живильної води;

- 2 – барабан-сепаратор;
- 3 – опускний колектор;
- 4 – п'ятові балки головного склепіння печі;
- 5 – рами завалочних вікон;
- 6 – кесон газового прольоту;
- 7 – підйомний колектор;
- 8 – подача насиченої пари споживачеві.

На СВО припадає 85 % теплоти, що відводиться через системи охолодження печі. Водяне охолодження використовується тільки в тому випадку, якщо за конструктивними і теплотехнічними ознаками неможливо використовувати СВО. Разом з цим, водяне охолодження на мартенівських печах залишається в якості резервного.

СВО мартенівських печей виконується як з колекторною, так і з індивідуальною розводкою труб, причому, опускна система завжди колекторна, а підйомна система може бути індивідуальною тільки в тому випадку, якщо різниця висот між барабаном і охолоджуваними елементами не перевищує 10 м.

Зазвичай СВО мартенівських печей складається з двох автономних і практично симетричних частин. При тиску в барабані до 1,2 МПа охолоджувані елементи - порожнисті, понад 1,2 МПа - трубчасті.

Застосовують природну циркуляцію. Максимальний тиск - 2,5 МПа. Питомий вихід пари близько 0,25 т/т сталі.

Пар СВО використовується:

- в системах комунально-побутового та технологічного теплозабезпечення підприємства;
- на ТЕЦ підприємства (підготовка хімоочищеної води, деаерація поживної води, подача пари в відбори турбін та ін.)

3 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ

Киснево-конвертерне виробництво сталі займає провідне становище в світовому виробництві сталі (на частку конвертерної сталі припадає близько 70%): в окремих країнах киснево-конвертерне виробництво сталі складає: США ~ 60 %, Німеччина ~ 70 %, Японія ~ 80 %, Франція ~ 80 %. В Україні на частку конвертерної сталі припадає близько 60 %.

Процес виробництва сталі в конвертерах - безпаливний. Забезпечення теплотою відбувається за рахунок екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну.

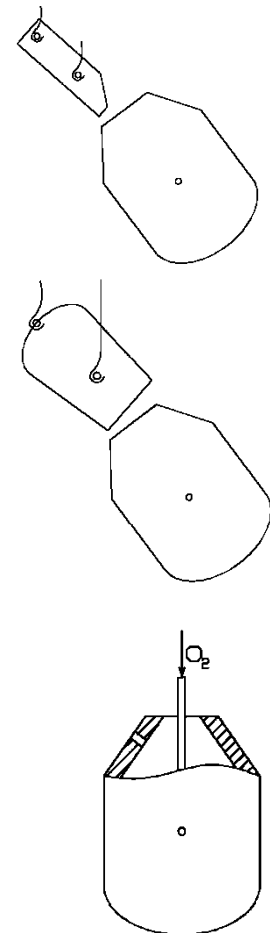
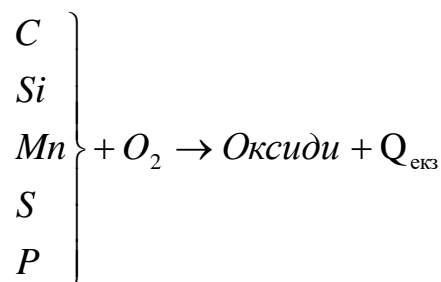
Виправка сталі здійснюється в конвертерах, які представляють собою броньовані футеровані зсередини реторти з можливістю повороту на 360° навколо горизонтальної осі.

У конвертер завантажують брухт (до 25 % від маси металошихти) шляхом повороту конвертера до прольоту, який обслуговує мостовий кран. Завантаження здійснюється совками з дозованою кількістю брухту.

Потім заливають чавун (понад 75 % від маси металошихти, $t_{ч} \sim 1340-1360$ °C). Заливку чавуну здійснюють чавуновозним ковшем також шляхом повороту конвертера до прольоту, який обслуговується мостовим краном.

Після заливки чавуну конвертер встановлюють в вертикальне положення.

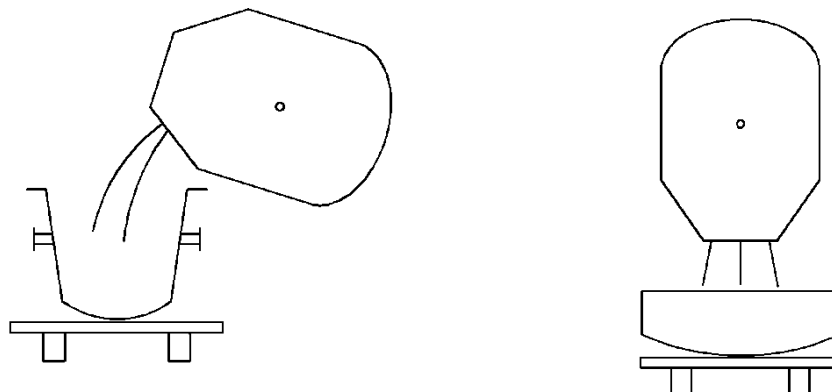
Опускають кисневу фурму і здійснюють продувку. В процесі кисневої продувки відбувається окислення домішок чавуну з утворенням відповідних оксидів і виділенням теплоти реакцій:



Під час продувки виділяється конвертерний газ: $CO \leq 90 \%$, $t_g \leq 1600 - 1800 \text{ }^\circ\text{C}$, запиленість $\leq 250 \text{ г / м}^3$. Тривалість продувки близько 15 хв.

Після продувки здійснюють випуск плавки:

випуск сталі ($t_{ст} \sim 1540 - 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) і вивантаження шлаку ($t_{шл} \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$):



Після випуску плавки цикл виплавки сталі повторюється. Загальна тривалість циклу становить до 45-50 хв.

3.1 Тепловий баланс конвертерної плавки і загальна характеристика ВЕР киснево-конвертерного виробництва сталі

Орієнтовний тепловий баланс киснево-конвертерної плавки:

Прихід теплоти	Витрати теплоти
Теплота чавуну ($Q_{ч} \sim 50\%$)	Теплота рідкої сталі ($Q_{ст} \sim 50\%$)
Теплота екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну ($Q_{екз} \sim 50\%$)	Теплота шлаку ($Q_{шл} \sim 5\%$)
	Теплота конвертерного газу ($Q_{к.г.} \sim 40\%$), в тому числі: фізична теплота конвертерного газу ($Q_{к.г.}^{\phi} \sim 8\%$) хімічна енергія конвертерного газу ($Q_{к.г.}^x \sim 32\%$)
	Втрати теплоти ($Q_{вт} \sim 5\%$)
Всього 100%	Всього 100%

З видаткової частини теплового балансу впливає, що частка ВЕР становить близько 95 % від загальної витрати теплоти, витраченої на процес, в тому числі, частка паливних ВЕР (хімічна енергія конвертерного газу) – 32 %,

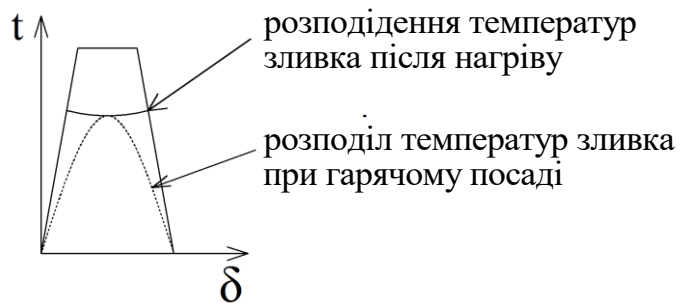
а частка теплових ВЕР (фізична теплота сталі, шлаку і конвертерного газу) – 63 %.

3.2 Використання теплоти сталі

Використання фізичної теплоти конвертерної сталі залежить від способу розливання сталі: у виливниці або на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

1. При розливанні сталі у виливниці теплоту сталі використовують шляхом гарячого посаду зливків у нагрівальні колодязі.

При гарячому посаді в нагрівальні колодязі слід нагріти тільки периферію зливка, що скорочує час нагрівання і, відповідно, витрати палива приблизно в два рази. При гарячому посаді значно зменшується утворення окалини внаслідок скорочення часу нагріву.



Шляхом гарячого посаду вдається використовувати близько 50 % теплоти сталі.

Складність реалізації гарячого посаду полягає в складності узгодження роботи конвертерного і прокатного цехів.

2. При розливанні сталі на МБЛЗ теплоту сталі можна використовувати шляхом вироблення теплової енергії у вигляді нагрітої води чи пари (див. рис. 3.1).

Вироблення пари досягається шляхом обладнання кристалізатора МБЛЗ системою випарного охолодження (СВО). Для нагріву води використовують нагріте повітря після повітряного охолодження заготовок, отриманих на МБЛЗ. Схема, наведена на рисунку 3.1, забезпечує комбінацію вироблення пари та нагріву води при використанні теплоти сталі.

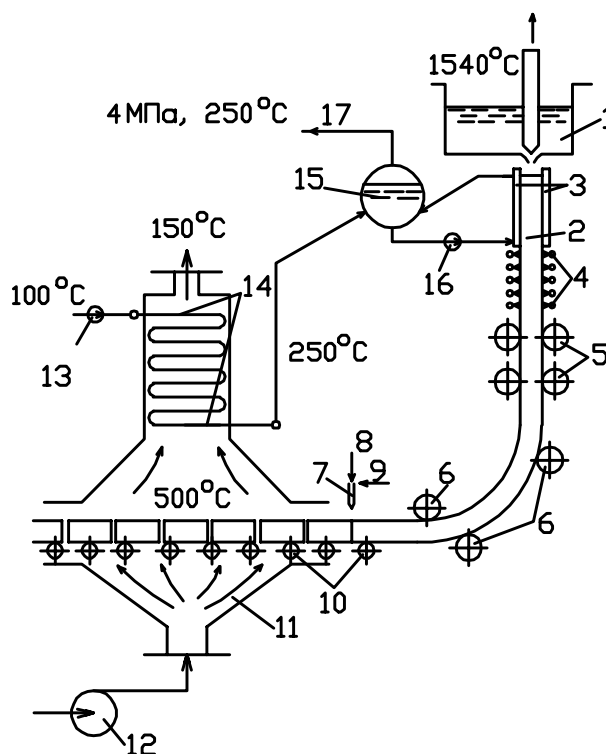


Рисунок 3.1. - Принципова схема МБЛЗ з використанням теплоти сталі для виробництва пари

Позначення до рисунка 3.1:

- 1 – накопичувальний ківш;
- 2 – кристалізатор;
- 3 – сорочка кристалізатора, обладнана системою випарного охолодження (СВО);
- 4 – зрошуючий холодильник;
- 5 – витягальні ролики;
- 6 – згинальні ролики;
- 7 – різак;
- 8 – подача вуглеводневого палива;
- 9 – подача кисню;
- 10 – роликівий конвеєр (рольганг);
- 11 – камера повітряного охолодження заготовок;
- 12 – повітрорудувка;
- 13 – живильний насос;
- 14 – водогрійний пакет, що виконує функцію економайзера;
- 15 – барабан-сепаратор СВО;
- 16 – циркуляційний насос;

17 – подача пари споживачеві.

Таким чином, схема, наведена на рисунку 3.1, включає два ступені утилізації теплоти сталі:

1. Вироблення насиченої пари в СВО на стадії кристалізації сталі.
2. Нагрівання води, яка використовується як живильна вода в СВО, при повітряному охолодженні заготовок.

Питома паропродуктивність складає 0,20 - 0,25 т пари / т сталі.

3.3 Використання теплоти шлаку

Теплота шлаку обумовлена температурою на випуску 1450 - 1550 °С. Питомий вихід шлаку - 0,1 т шлаку / т сталі.

Відомі кілька промислових установок по використанню теплоти шлаку, які відрізняються конструктивно, але включають дві аналогічні технологічні операції:

1. Повітряна грануляція шлаку, що супроводжується нагріванням повітря при грануляції до температури ~ 900 °С.
2. Використання нагрітого повітря для вироблення пари в котлах-утилізаторах.

На рисунку 3.2 показаний один з варіантів установки для використання теплоти шлаку.

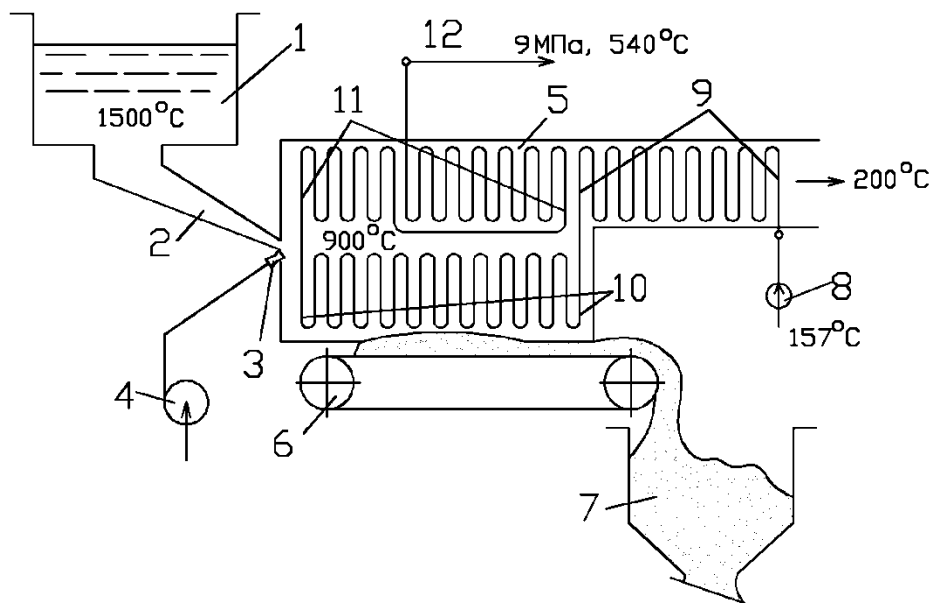


Рисунок 3.2. - Принципова схема установки для використання теплоти шлаку (Японія)

Позначення до рисунка 3.2:

1 – накопичувач шлаку;

2 – шлакова льотка;

3 – сопло для подачі повітря на грануляцію шлаку;

4 – повітродувка;

5 – камера повітряної грануляції, в робочому об'ємі якої розміщені поверхні нагріву котла-утилізатора;

6 – транспортер;

7 – бункер для гранульованого шлаку;

8 – живильний насос;

9 – економайзер;

10 – випарні поверхні нагрівання;

11 – пароперегрівач;

12 – подача перегрітої пари споживачеві.

Особливість установки, схема якої наведена на рисунку 3.2, полягає в застосуванні прямооточного котла-утилізатора.

Шлак самопливом надходить в зону повітряного струменя від сопла 3. У потоці повітря шлак диспергується і гранулюється. У нижній частині камери 5 гранульований шлак утворює шар гранул, які під дією транспортера 6 переміщуються в бункер гранульованого шлаку 7.

Повітря, нагріте при грануляції до температур близько 900 °С, передає теплоту поверхням нагріву котла-утилізатора. У нижній частині камери 5, де шлак переміщається в шаровому режимі, передача теплоти поверхням нагріву 10 відбувається шляхом безпосереднього контакту шлаку з поверхнями нагріву.

Живильна вода надходить від деаератора підвищеного тиску (0,6 МПа) з температурою 157 °С, параметри одержуваної пари: 9 МПа і 540 °С.

Технічна характеристика установки для киснево-конвертерного цеху продуктивністю 2,5 млн. т сталі на рік:

- продуктивність по гранульованому шлаку - 0,24 млн.т / рік;
- питома витрата повітря для грануляції - 1 м³ / кг шлаку;
- паропроductивність - 8 т / год;
- питомий вихід пари - 0,1 т пари / т шлаку.

3.4 Використання конвертерного газу

3.4.1 Способи відведення конвертерного газу

Використання конвертерного газу залежить від способу відведення газу з конвертера. Можливі три способи: з повним допалюванням СО конвертерного газу, з частковим допалюванням та без допалювання.

Спалювання газу відбувається за рахунок підсосу повітря в зазор між горловиною конвертера і кесоном (див. рис. 3.3).

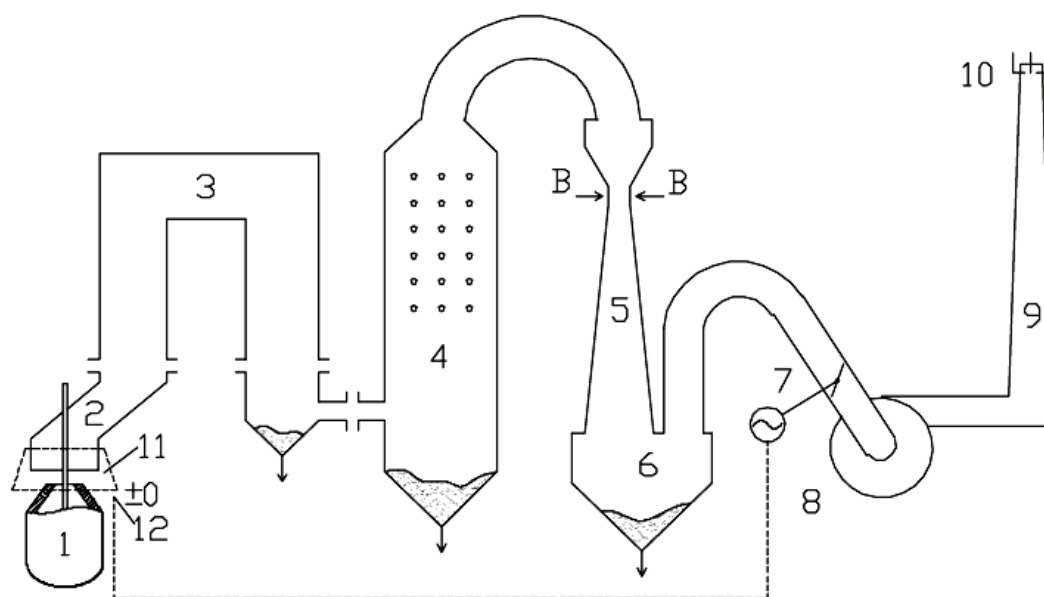


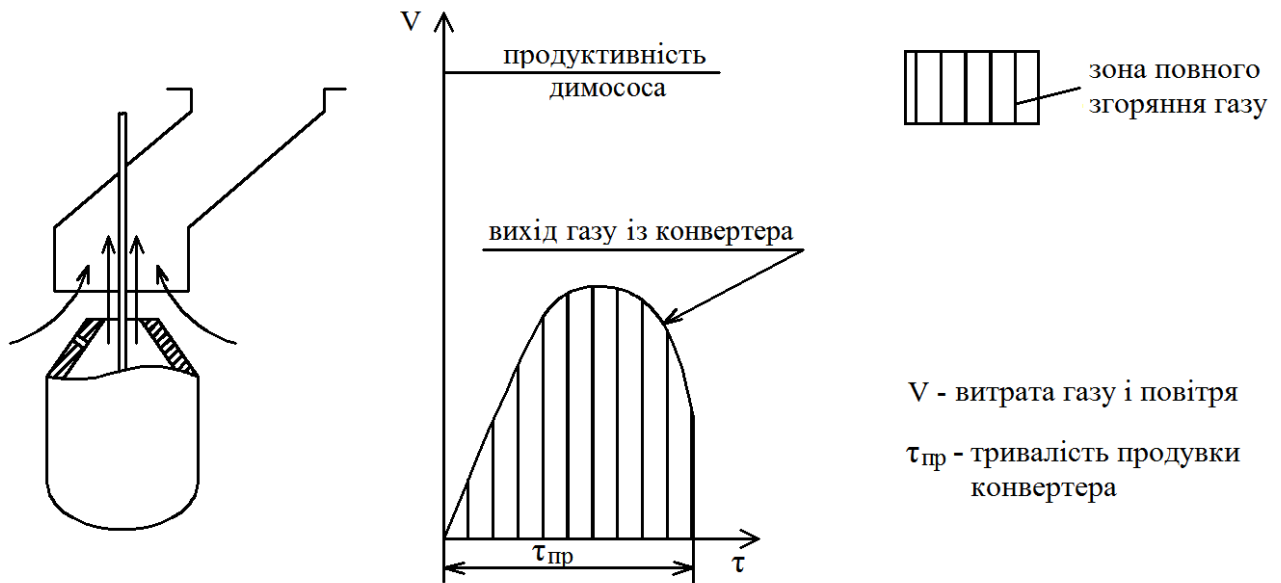
Рисунок 3.3. - Принципова схема газовідвідного тракту конвертера

Позначення до рисунка 3.3:

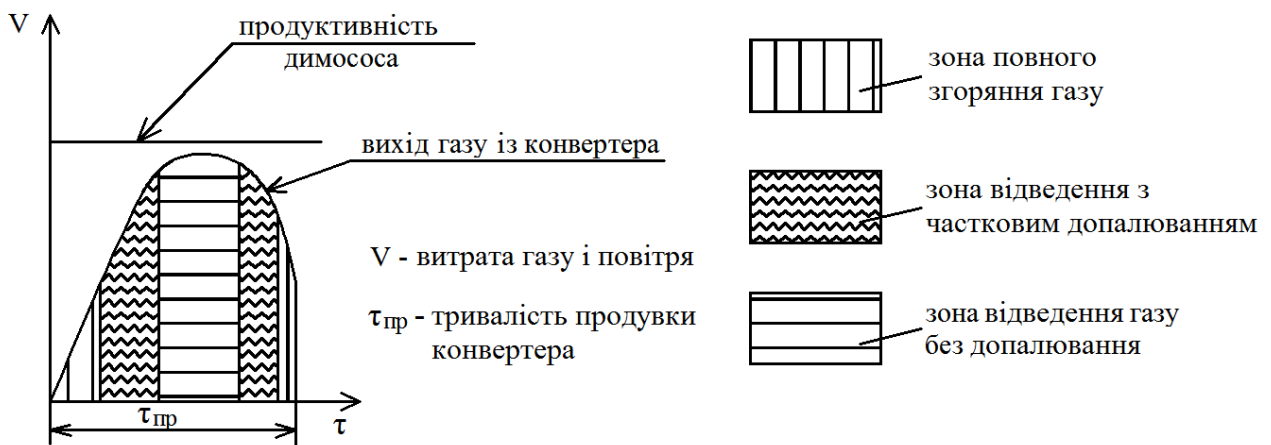
- 1 – конвертер;
- 2 – кесон;
- 3 – ОКГ;
- 4 – скруббер;
- 5 – труба Вентурі (В - подача води);
- 6 – осушувач;
- 7 – клапан, який регулює продуктивність димососа;
- 8 – димосос;
- 9 – димова труба;
- 10 – допалюючий пристрій;
- 11 – ущільнювач зазору між горловиною конвертера і кесоном;
- 12 – зазор між кесоном та горловиною конвертера.

12 – датчик нульового тиску в зазорі між конвертером і кесоном, що дає імпульс для регулювання продуктивності димососа.

При відведенні газу з **повним допалюванням** димосос працює на продуктивності, що значно перевищує вихід конвертерного газу, а ущільнювач зазору між горловиною конвертера і кесоном відсутній. Це забезпечує, крім відведення газу, підсос повітря в зазор між горловиною конвертера і кесоном в кількості, достатній для повного спалювання газу навіть в момент максимального виходу газу. Коефіцієнт витрати повітря при спалюванні становить до 1,5-2,5.



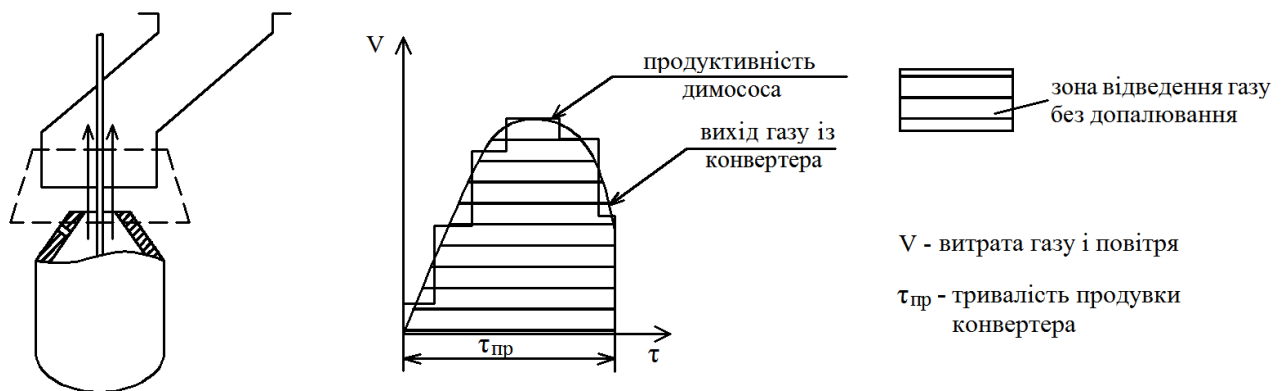
При відведенні газу з **частковим допалюванням** димосос працює на продуктивності, що відповідає максимальному виходу газу.



При цьому на початку і в кінці продувки газ повністю згорає. В середині продувки допалювання газу незначне. У проміжках газ згорає частково. В

середньому коефіцієнт витрати повітря за продувку становить близько 0,6. Часткове спалювання газу дає в продуктах згорання менше 25-30 % CO. При такій концентрації CO насичений вологою конвертерний газ не допалюється на допалюючих пристроях димової труби, що робить спосіб з частковим допалюванням вкрай небажаним з екологічної точки зору. Питомі викиди CO в атмосферу становлять до $2-5 \text{ м}^3 / \text{т}$ сталі.

При відведенні газу **без допалювання** газовідвідний тракт конвертера (див. рис. 3.3) обладнують додатковими пристроями: ущільнювачем зазору 11 між горловиною конвертера і кесоном і датчиком нульового тиску 12;



Під ущільнювач зазору 11 подають для герметизації інертний газ. Надмірний тиск у нижній частині ущільнювального зазору підтримують таким, що дорівнює 0. У тому випадку, якщо тиск стає позитивним, продуктивність димососа збільшують, а при негативному тиску - зменшують. В результаті відбувається поетапне регулювання продуктивності димососа. Коефіцієнт витрати повітря становить до 0,05-0,10, що практично виключає допалювання газу внаслідок підсмоктування повітря в зазор між горловиною конвертера і кесоном. У тому випадку, якщо не передбачено використання хімічної енергії конвертерного газу, газ допалюють на димовій трубі газовідвідного тракту.

У використанні конвертерного газу застосовують в основному два напрями: використання газу для виробництва пари і як паливо.

3.4.2 Використання конвертерного газу для виробництва пари

При відведенні газу з повним допалюванням виробництво пари відбувається в ОКГ, яким обладнано більшість газовідвідних трактів

конвертерів. При цьому використовується як фізична, так і хімічна теплота конвертерного газу.

При відведенні газу без допалювання в ОКГ використовується тільки фізична теплота газу. Для використання хімічної енергії газу котел-утилізатор розміщують поза газовідвідного тракту конвертера. Проблема періодичності виходу газу може бути вирішена шляхом застосування теплоаккумуляторів, наприклад, у вигляді регенеративних теплообмінників (див. рис. 3.4).

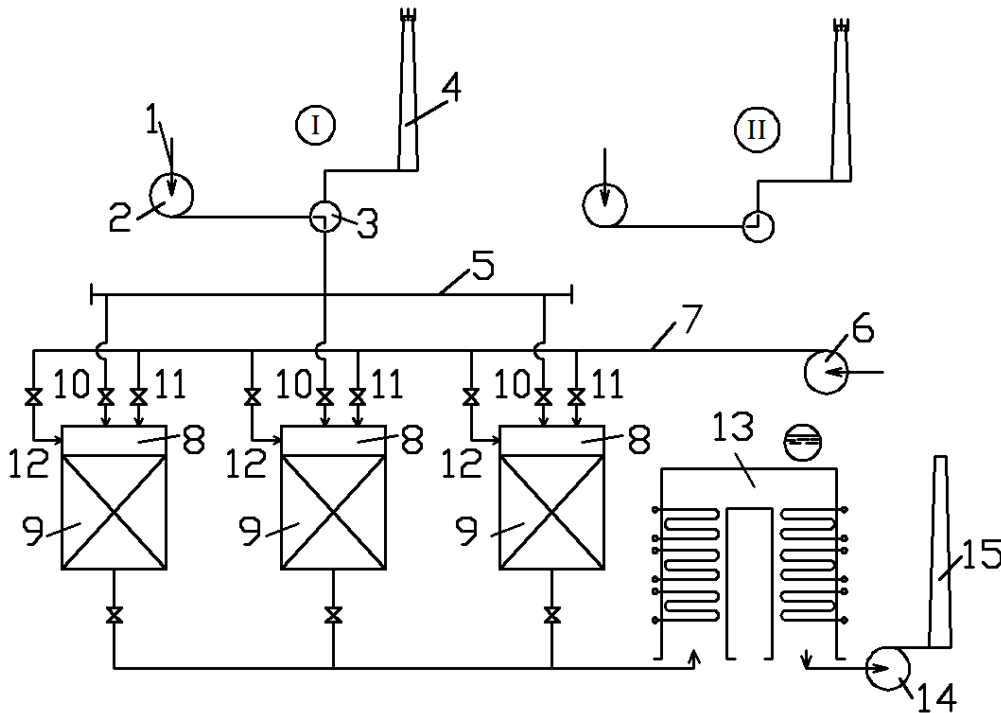


Рисунок 3.4. - Схема використання теплоти конвертерного газу для виробництва пари із застосуванням регенеративних теплоаккумуляторів

Позначення до рисунка 3.4:

- 1 – газохід від газоочистки;
- 2 – димосос газовідвідного тракту конвертера;
- 3 – перекидний клапан;
- 4 – димова труба з допалюючим пристроєм (свічка);
- 5 – колектор конвертерного газу;
- 6 – повітродувка;
- 7 – повітряний колектор;
- 8 – камера згоряння;
- 9 – насадка регенератора;
- 10 – подача конвертерного газу на спалювання;

- 11 – подача повітря для спалювання конвертерного газу;
- 12 – подача повітря на охолодження насадки;
- 13 – котел-утилізатор;
- 14 і 15 – димосос і димова труба теплоутилізаційної установки.

Виробництво пари за схемою, представленою на рисунку 3.4, включає дві стадії:

1. В період виходу газу з конвертера під час продувки очищений і охолоджений газ, що відводиться з конвертера без допалювання, спалюють в камерах згоряння 8. Продукти згоряння розігрівають насадку регенератора, а залишок теплоти продуктів згоряння після регенераторів (залишкова температура продуктів згоряння 800-900 °С) використовується в котлі-утилізаторі для вироблення пари.

2. В міжпродувочний період перекидний клапан встановлюють в позицію II (див. рис. 3.4). Димосос працює на зниженій продуктивності, а повітря, яке просмоктується через газовідвідний тракт, направляють на свічку.

Через насадки регенератора, по черзі, пропускають повітря від повітродувки. Повітря нагрівається до 800-900 °С і направляється в котел-утилізатор, де його теплота використовується для вироблення пари.

Таким чином досягається постійна і безперервна паропроодуктивність котла-утилізатора.

Кількість теплоаккумуляторів (n) відповідає відношенню:

$n = \tau_{\text{мп}} / \tau_{\text{пр}}$, де $\tau_{\text{мп}}$ - час міжпродувочного періоду;

$\tau_{\text{пр}}$ - час продувки.

Наприклад: $n = \tau_{\text{мп}} / \tau_{\text{пр}} = 45\text{мін} / 15\text{мін} = 3$ теплоаккумулятора.

Переваги схеми: рішення проблеми періодичності і можливість стабільного вироблення пари енергетичних параметрів для приводу турбогенераторів або турбоповітродувок на ТЕЦ-ПВС.

Недоліки: великі капітальні витрати, пов'язані із застосуванням громіздких регенеративних теплообмінників.

3.4.3 Використання конвертерного газу як палива

При використанні конвертерного газу як палива проблема періодичності виходу конвертерного газу може бути вирішена двома способами:

1. Подача конвертерного газу в період його виходу з конвертера в мережу іншого газу, наприклад, доменного (див. рис. 3.5).

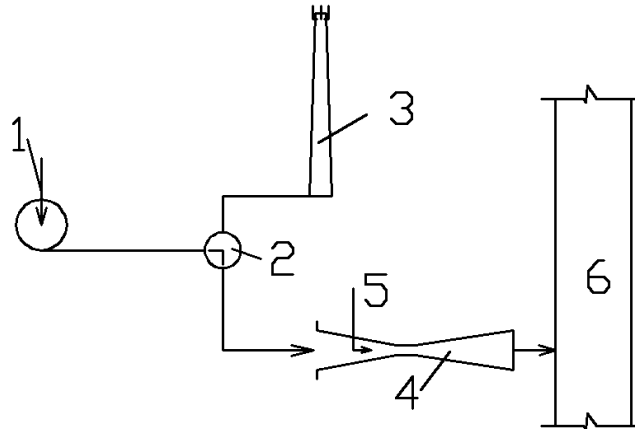


Рисунок 3.5. - Схема подачі конвертерного газу в мережу доменного газу

Позначення до рисунка 3.5:

- 1 – газохід від газоочистки;
- 2 – перекидний клапан;
- 3 – димова труба з допалюючим пристроєм (свічка);
- 4 – ежектор для ежекції конвертерного газу і підвищення його тиску;
- 5 – ежекуючий газ високого тиску, наприклад, природний газ;
- 6 – газопровід доменного газу.

Подача конвертерного газу в газопровід доменного газу відбувається під час виходу газу з конвертера. Перевага газопроводу доменного газу обумовлена великими обсягами газопроводу, а, отже, його високою акумулюючою здатністю.

Недолік схеми полягає в періодичному коливанні тиску і теплоти згорання газу в газопроводі доменного газу, що вимагає передбачити додаткові пристрої для стабілізації роботи пальникових пристроїв споживачів палива.

2. Подача конвертерного газу в період його виходу з конвертера в газгольдер (див. рис. 3.6).

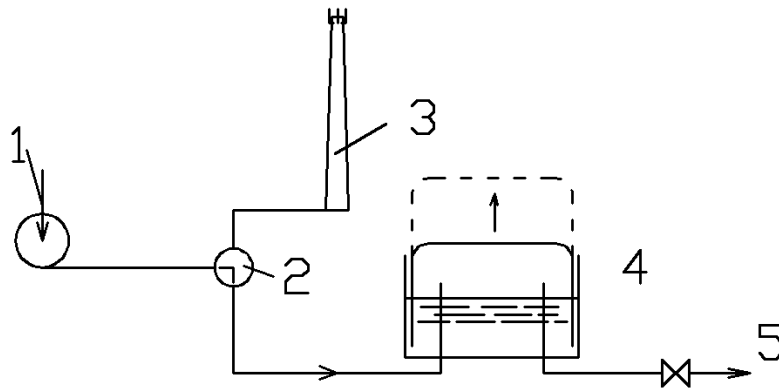


Рисунок 3.6. - Схема подачі конвертерного газу в газгольдер

Позначення до рисунка 3.6:

- 1-3 – те саме, що на попередньому рисунку;
- 4 – газгольдер мокрого типу;
- 5 – подача конвертерного газу споживачеві.

Конвертерний газ надходить в газгольдер під час продувки конвертера. Витрачається газ з газгольдера як під час продувки, так і в міжпродувочний період.

Перевага схеми: можливість широкого діапазону використання конвертерного газу як палива.

Недоліки:

1. Великі капітальні витрати на спорудження газгольдерів. До схеми, представленої на рисунку 3.6, варто додати пристрій для доочистки конвертерного газу, нагнітачі для підвищення тиску газу і складну систему автоматики, що забезпечує надійність функціонування схеми.

2. Великі розміри газгольдерів, що вимагають, крім великих капітальних витрат, великі виробничі площі для розміщення газгольдерів на території підприємства. Діаметри газгольдерів для сучасних киснево-конвертерних цехів складають до 60-80 м.

3. Вибухонебезпечність газгольдерів, що вимагає створення навколо газгольдерів охоронної зони, яка займає додаткові виробничі площі для розміщення газгольдерів.

4. Недостатня надійність роботи газгольдерів мокрого типу при негативних температурах зовнішнього повітря, що характерно за кліматичними умовами для всіх підприємств України, які мають киснево-конвертерні цехи.

3.5 Використання теплоти охолодження кесона

Кесон - перша по ходу конвертерного газу водоохолоджувальна ділянка газоходу (див. рис. 3.3), що сприймає дію найбільш високих температур конвертерного газу, випромінювання з горловини конвертера і бризок розплаву. Допустима температура нагріву води при охолодженні кесона не перевищує 40 °С.

Використання теплоти охолоджувальної води при такій температурі можливо для вироблення електроенергії в паросилових установках, що працюють на низькокиплячих рідинах, наприклад, фреонах (температура кипіння до 30 °С).

Принципова схема одного з варіантів такої установки представлена на рисунку 3.7.

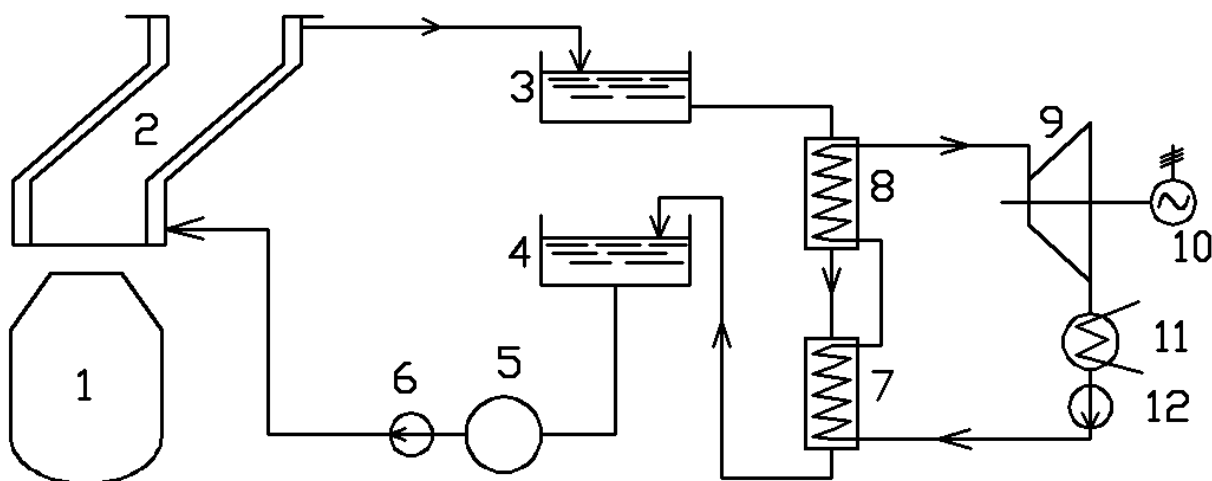


Рисунок 3.7. - Принципова схема використання теплоти охолодження кесона в паросиловій установці (Японія)

Позначення до рисунка 3.7:

- 1 – конвертер;
- 2 – кесон, обладнаний водоохолоджувальною сорочкою;
- 3 та 4 – верхній і нижній резервуари охолоджувальної води;
- 5 – охолоджувальний пристрій оборотної системи;
- 6 – циркуляційний насос;
- 7 і 8 – нагрівач і випарник фреону;
- 9 – фреонова турбіна;
- 10 – електрогенератор;

11 – конденсатор фреону;

12 – фреоновий насос.

В установці, що представлена на рисунку 3.7, тиск фреону, що надходить в турбогенератор, 0,46 МПа. Потужність турбогенератора - 2900 кВт.

Переваги установки:

1) невисокі температури і тиски забезпечують надійність роботи установки;

2) можливість отримання електроенергії безпосередньо в цеху і використання її на власні потреби цеху.

Недоліки:

1) невисока енергетична ефективність теплоутилізаційних установок (див. 1.7);

2) негативний вплив фреону на екологію.

4 ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1 Загальна характеристика ВЕР прокатного виробництва

Основним джерелом ВЕР в прокатному виробництві є термічні та нагрівальні печі, в числі яких найбільш потужними є методичні нагрівальні печі.

Орієнтовний тепловий баланс методичної нагрівальної печі:

<i>Прихід теплоти</i>	<i>Витрати теплоти</i>
Теплота згоряння палива ($Q_{\text{п}} \sim 85\%$)	Теплота нагрітого металу ($Q_{\text{м}} \sim 30\%$)
Теплота нагрітого повітря ($Q_{\text{нп}} \sim 12\%$)	Теплота відхідних газів ($Q_{\text{відх}} \sim 45\%$)
Теплота окислення (угару) металу ($Q_{\text{уг}} \sim 3\%$)	Теплота охолодження елементів конструкції печі ($Q_{\text{охол}} \sim 20\%$)
	Втрати теплоти в навколишнє середовище та інші втрати ($Q_{\text{втр}} \sim 5\%$)
Всього 100%	Всього 100%

З витратної частини теплового балансу випливає, що методична піч є джерелом теплових ВЕР (теплота відхідних газів і теплота охолодження елементів конструкції печі), на частку яких припадає 65 % витратної частини теплового балансу.

4.2 Використання теплоти відхідних газів

Використання теплоти відхідних газів частково вирішується рекуперацією теплоти шляхом підігріву повітря, що йде на горіння газу в нагрівальних печах. Залишок теплоти відхідних газів після рекуперації вимагає утилізації, яка зазвичай досягається виробленням енергопродукції: нагрітої води, пари або електроенергії.

У цьому напрямку можна виділити три підходи:

I. Установка котлів-утилізаторів – водотрубних конвективних типу «КУ», пакетно-конвективних, газотрубних.

Узагальнена характеристика котлів-утилізаторів, які встановлюються за нагрівальними печами прокатних цехів:

- пропускна здатність по відхідним газам $V_{\text{відх}} = 16 \div 200$ тис. м³ / год;
- температура відхідних газів $t_{\text{відх}} = 650 \div 1250$ °С;
- параметри одержуваної пари - тиск $p_{\text{п}} \leq 4,5$ МПа, температура перегрітої пари $t_{\text{пг}} \leq 450$ °С.

Котли-утилізатори розміщують за нагрівальними печами за індивідуальною або груповою схемами (див. рис. 4.1).

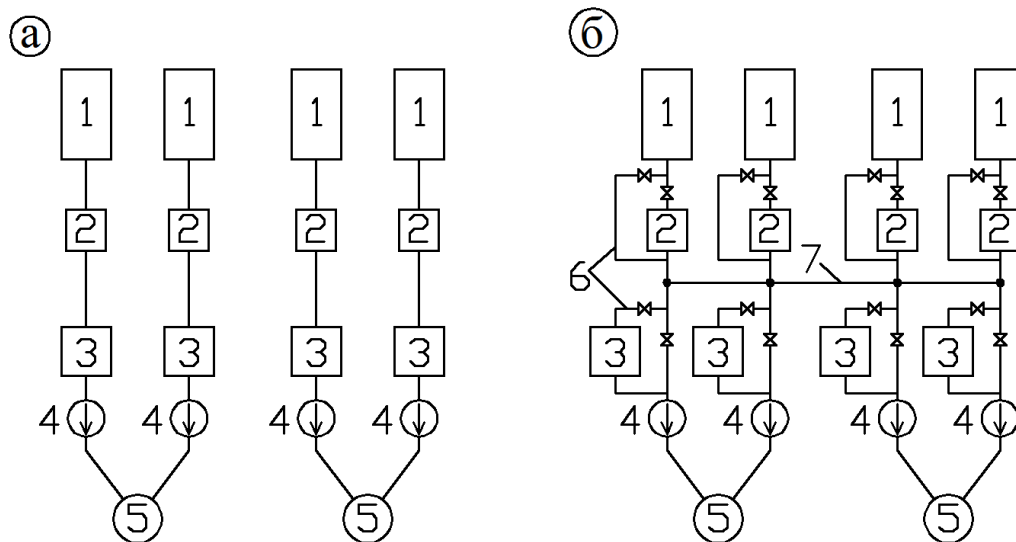


Рисунок 4.1. - Схеми розміщення котлів-утилізаторів за нагрівальними печами: а - індивідуальна схема, б - групова

Позначення до рисунка 4.1:

1 – нагрівальна піч;

- 2 – рекуператор;
- 3 – котел-утилізатор;
- 4 – димосос;
- 5 – димова труба;
- 6 – обвідний газохід (байпас);
- 7 – колекторний газохід.

Перевага групової (колекторної) схеми: більш висока надійність роботи тракту завдяки взаємозамінності ділянок тракту суміжних печей і наявності обвідних газохідів для рекуператорів і котлів-утилізаторів, що дозволяє при необхідності відключити їх з роботи тракту.

Недолік групової схеми: ускладнення тракту, збільшення капітальних витрат на спорудження тракту і ускладнення експлуатації тракту.

II. Розміщення вбудованих водогрійних і випарних пакетів (див. рис. 4.2).

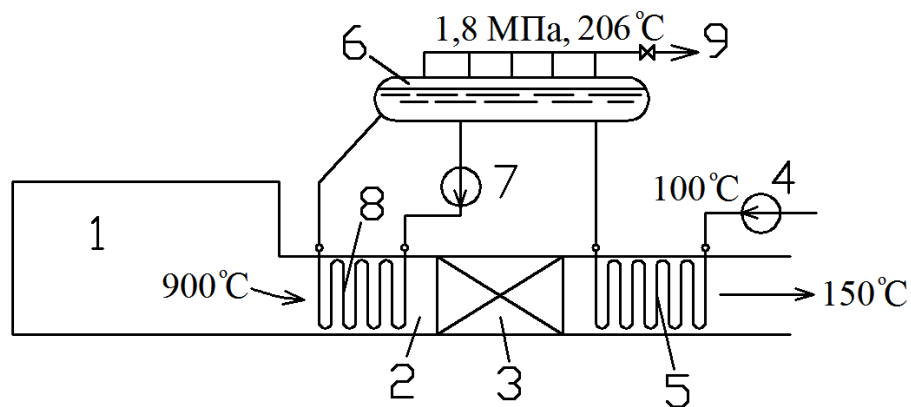


Рисунок 4.2. - Схема розміщення водогрійних і випарних пакетів

Позначення до рисунка 4.2:

- 1 – нагрівальна піч;
- 2 – газохід печі;
- 3 – рекуператор;
- 4 – живильний насос;
- 5 – водогрійний пакет, який виконує функції економайзера;
- 6 – барабан-сепаратор;
- 7 – циркуляційний насос;
- 8 – випарний пакет (випарні поверхні нагрівання);
- 9 – вихід насиченої пари до споживача чи до центрального пароперегрівача.

Схема, представлена на рисунку 4.2, передбачає спільну роботу випарних і водогрійних пакетів, що дозволяє розглядати її як альтернативу котла-утилізатора.

Переваги схеми:

- 1) компактність розміщення обладнання і невисокі капітальні витрати;
- 2) захист рекуператора випарним пакетом від різкого підвищення температури відхідних газів;
- 3) досить високий ступінь утилізації теплоти відхідних газів за рахунок водогрійних пакетів;
- 4) можливість охолодження відхідних газів перед димососом, що полегшує роботу димососа.

III. Застосування вбудованих газотурбінних установок (ВГТУ)

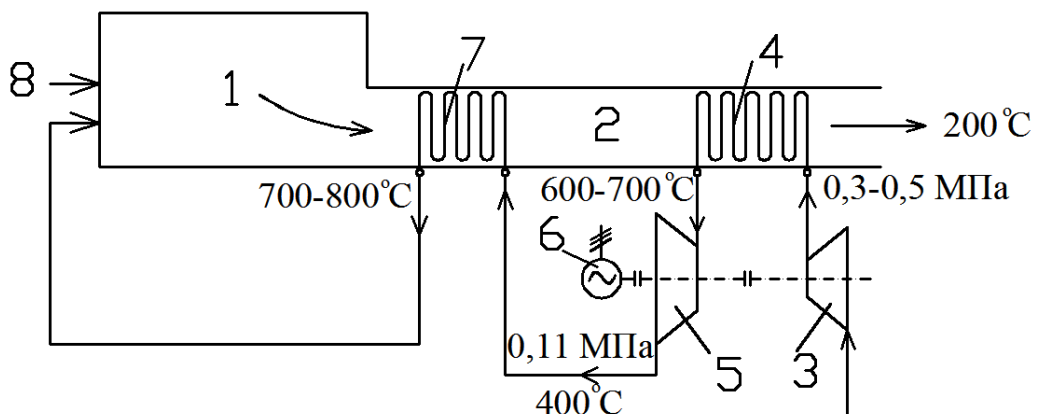


Рисунок 4.3 - Принципова схема вбудованої газотурбінної установки (ВГТУ)

Позначення до рисунка 4.3:

- 1 – нагрівальна піч;
- 2 – газохід печі;
- 3 – компресор;
- 4 – рекуператор компримованого повітря;
- 5 – газова (повітряна) турбіна;
- 6 – електрогенератор;
- 7 – високотемпературний рекуператор
- 8 – подача палива.

Переваги: отримання електроенергії безпосередньо в прокатному цеху і можливість використання її для власних потреб цеху.

Недоліки: невисока частка теплоти відхідних газів, використаної безпосередньо на вироблення електроенергії (до 12-15 %), внаслідок великих витрат енергії на привод компресора.

4.3 Використання теплоти охолодження елементів конструкції нагрівальних печей

Основна кількість теплоти при охолодженні конструкцій методичних печей доводиться на подові труби (поздовжні, поперечні, опорні): близько 90% теплоти відводиться через систему охолодження. Використання теплоти охолодження досягається застосуванням СВО, яка для методичних нагрівальних печей має наступні показники:

- паропроодуктивність $D_{\text{сво}} = 5 \div 60$ т / год в залежності від потужності печі;
- тиск пари $p_{\text{сво}} = 1,2 \div 4,5$ МПа;
- питомий вихід пари $d_{\text{п}} = 0,10 \div 0,15$ т пари / т нагрівається металу.

Цінність пари СВО підвищують шляхом перегріву пари в центральних пароперегрівачах (див. рис. 4.4).

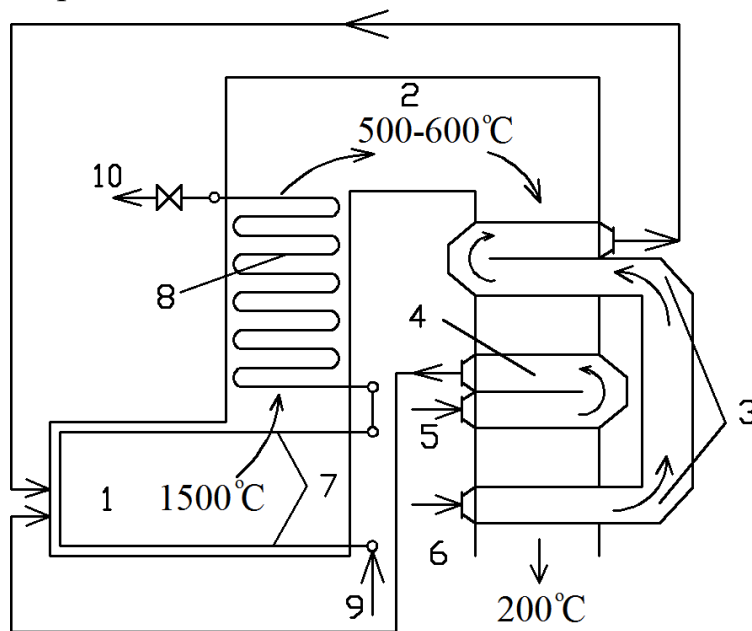


Рисунок 4.4. - Принципова схема центрального пароперегрівача

Позначення до рисунка 4.4:

- 1 – топка центрального пароперегрівача;
- 2 – газохід центрального пароперегрівача;
- 3 – повітрянагрівач;
- 4 – газонагрівач;
- 5 і 6 – подача газу і повітря;
- 7 – радіаційна частина пароперегрівача, виконана у вигляді екранів топки;
- 8 – конвективна частина пароперегрівача;
- 9 – подача насиченої пари;
- 10 – вихід перегрітої пари споживачеві.

Позначення центральних пароперегрівників:

ЦП-60-С-1, 9

ЦП-60-С-4, 5

ЦП - центральний пароперегрівач;

60 - паропродуктивність, т / год;

С - серійний;

1,9 і 4,5 - тиск пари, МПа.

Технічна характеристика центральних пароперегрівників:

Найменування показників	ЦП-60-С-1,9	ЦП-60-С-4,5
Температура пари на вході в пароперегрівач, °С	206	256
Температура перегрітої пари, °С	370	450
Витрата доменного газу, м ³ /ч	4600	6270
Температура підігрітого повітря, °С	285	330
Температура підігрітого газу, °С	170	190

У центральних пароперегрівачах, крім пари СВО, нагрівається також пара від котлів-утилізаторів, якщо в котлах отримують насичений пар.

В якості палива в центральному пароперегрівачі використовується доменний газ, що робить центральний пароперегрівач комплексною установкою для використання ВЕР: перегрівається утилізаційна пара і використовується для цього горючий ВЕР.

4.4 Комплексні теплоутилізаційні установки

Слід виділити два варіанти комплексних установок:

I. Комплексна установка СВО з водогрійними і випарними пакетами (див. рис. 4.5).

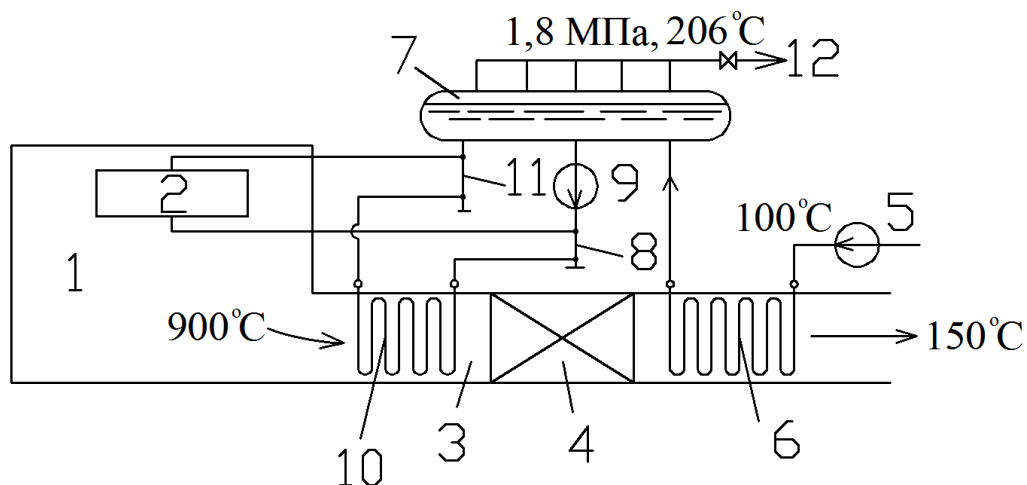


Рисунок 4.5. - Принципова схема комплексної установки СВО з водогрійними і випарними пакетами

Позначення до рисунка 4.5:

- 1 – нагрівальна піч;
- 2 – охолоджуваний елемент печі, обладнаний СВО, наприклад, рама вікна посаду або видачі металу;
- 3 – газохід печі;
- 4 – рекуператор;
- 5 – живильний насос;
- 6 – водогрійний пакет, що виконує функцію економайзера;
- 7 – баран-сепаратор;
- 8 – опускний колектор;
- 9 – циркуляційний насос;
- 10 – випарний пакет;
- 11 – підйомний колектор;
- 12 – подача пари в центральний пароперегрівач або до споживача.

II. Комплексна установка СВО з котлом-утилізатором (див. рис. 4.6).

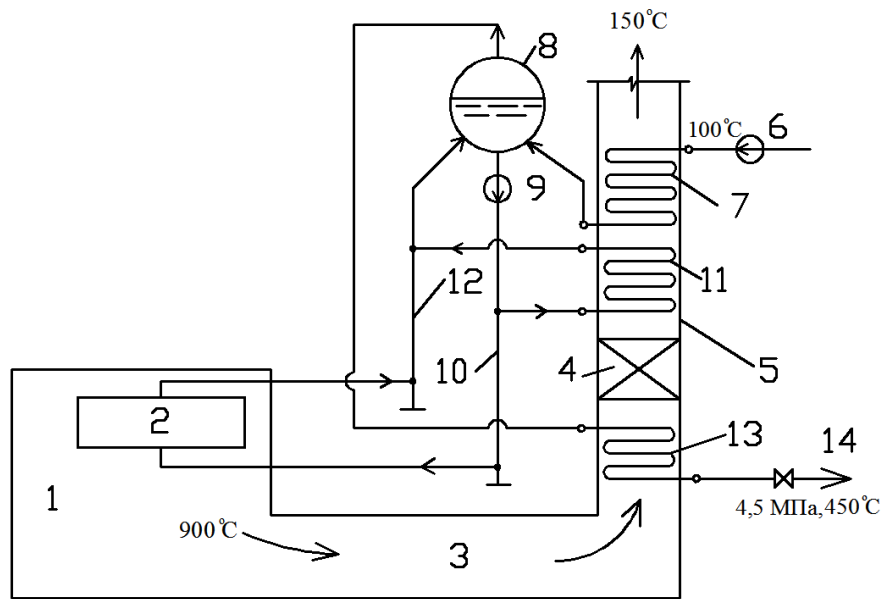


Рисунок 4.6. - Принципова схема комплексної установки СВО з котлом-утилізатором

Позначення до рисунка 4.6:

- 1 – нагрівальна піч;
- 2 – охолоджуємий елемент печі, обладнаний СВО;
- 3 – газохід печі;
- 4 – рекуператор;
- 5 – газохід котла-утилізатора;
- 6 – живильний насос;
- 7 – економайзер;
- 8 – барабан-сепаратор;
- 9 – циркуляційний насос;
- 10 – опускний колектор;
- 11 – випарні поверхні нагрівання;
- 12 – підйомний колектор;
- 13 – пароперегрівач;
- 14 – вихід перегрітої пари до споживача.

В цілому комплексні установки дають наступні переваги в порівнянні з індивідуальними:

- 1) економія капітальних і експлуатаційних витрат за рахунок узагальнення ряду устаткування (живильних насосів, барабанів-сепараторів, циркуляційних насосів, колекторів тощо);

- 2) компактність розміщення теплоутилізаційного обладнання;
- 3) підвищення паропроодуктивності і можливість перегріву пари.

4.5 Теплоутилізаційна електростанція (ТУЕС)

Джерелами пари для ТУЕС може бути СВО, випарні пакети та котли-утилізатори, які працюють в комплексі або індивідуально. На рисунку 4.7 показана схема ТУЕС з котлом-утилізатором.

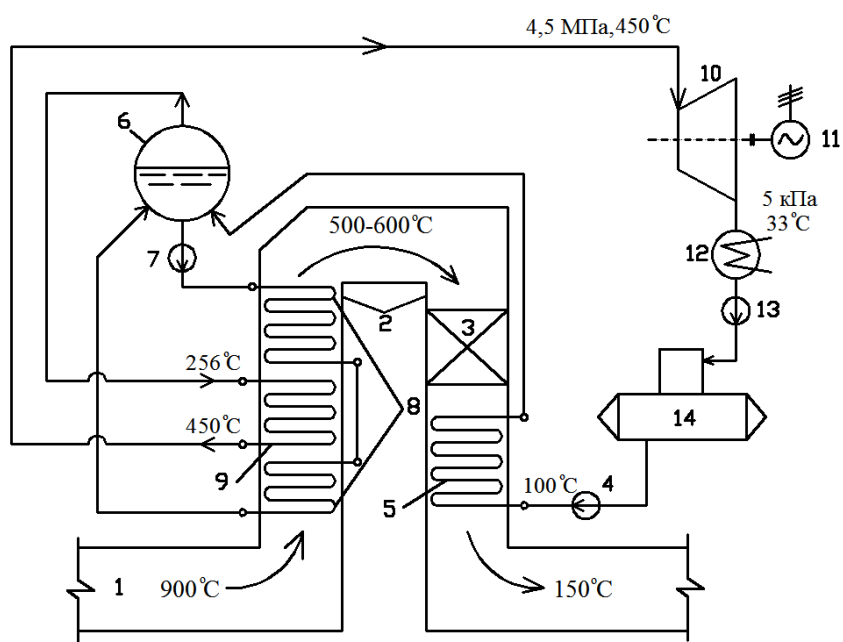


Рисунок 4.7. - Принципова схема теплоутилізаційної електростанції (ТУЕС)

Позначення до рисунка 4.7:

- 1 – газохід від нагрівальної печі;
- 2 – газохід котла-утилізатора;
- 3 – рекуператор;
- 4 – живильний насос;
- 5 – економайзер;
- 6 – барабан-сепаратор;
- 7 – циркуляційний насос;
- 8 – випарні поверхні нагрівання;
- 9 – пароперегрівач;
- 10 – парова турбіна;
- 11 – електрогенератор;

12 – конденсатор парової турбіни;

13 – конденсатний насос;

14 – деаератор.

Можливість розміщення ТУЕС в прокатному цеху викликає інтерес у зв'язку з великим споживанням електроенергії в цеху (привід прокатних станів, мостових кранів тощо). Розміщенню ТУЕС в прокатному цеху сприяє стабільна і тривала робота нагрівальних печей, тобто наявність стабільного джерела теплових ВЕР.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теплоэнергетика металлургических заводов: Учебник для вузов / Ю.И. Розенгарт, З.А. Мурадова, Б.З. Теверовский и др. Под ред. Ю.И. Розенгарта. – М.: Металлургия, 1985. – 303 с.
2. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – К.: Вища школа, 1988. – 328 с.
3. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности: Учебник для вузов / Н.А. Семенов, Л.И. Куперман, С.А. Романовский и др. – К.: Вища школа. 1979. – 296 с.
4. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Воинов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман, Л.Н. Сидельковский. Под ред. Л.Н. Сидельковского – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
5. Гічов Ю.О. Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина I: Конспект лекцій: Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – 57 с.

Навчальне видання

Гічов Юрій Олександрович

ВТОРИННІ ЕНЕРГОРЕСУРСИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Частина II

Тем. план. 2012, поз. 310.

Підписано до друку 12.06.2012. Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір друк. Друк плоский.
Облік.- вид. арк. 3,11. Умов. друк. арк. 3,07. Тираж 100 пр. Замовлення № .

Національна металургійна академія України
49600, г.Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ