

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ**



**Ю.А. Гичёв**

**ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
Часть II**

**Днепропетровск НМетАУ 2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ**

**Ю.А. Гичёв**

**ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
Часть II**

Утверждено на заседании Ученого совета академии  
в качестве конспекта лекций. Протокол № 1 от 30.01.2012

**Днепропетровск НМетАУ 2012**

УДК 669.1(07)

Гичёв Ю.А. Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий. Часть II: Конспект лекций - Днепропетровск: НМетАУ, 2012. – 54 с.

Рассмотрены вторичные энергоресурсы (ВЭР) основных металлургических переделов: доменного, сталеплавильного и прокатного. Учен опыт по созданию и эксплуатации теплоутилизационного оборудования на отечественных и зарубежных предприятиях чёрной металлургии.

Рассмотрены перспективные технологические решения по утилизации ВЭР, которые пока не нашли широкого применения.

Предназначен для студентов направления 6.050601 – теплоэнергетика.

Илл. 26. Библиогр.: 5 наим.

Ответственный за выпуск М.В. Губинский, д-р техн. наук, проф.

Рецензенты: В.А. Габринец, д-р техн. наук, проф. (ДНУЖТ)

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

© Национальная металлургическая академия  
Украины, 2012

© Гичёв Ю.А., 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	6
1.1 Тепловой баланс доменного процесса и общая характеристика	
1.2 ВЭР доменного производства.....	6
1.3 Использование доменного газа в качестве топлива .....	7
1.4 Использование избыточного давления доменного газа.....	9
1.5 Использование физической теплоты доменного газа .....	13
1.6 Использование теплоты чугуна.....	13
1.7 Использование теплоты шлака.....	14
1.8 Использование теплоты охладителя элементов конструкции доменной печи.....	17
1.9 Использование теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей.....	21
2 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ МАРТЕНОВСКОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ.....	22
2.1 Тепловой баланс мартеновской печи и общая характеристика ВЭР мартеновского производства стали.....	22
2.2 Использование теплоты отходящих газов.....	25
2.3 Использование теплоты охладителя элементов конструкции мартеновской печи.....	28
3 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ.....	30
3.1 Тепловой баланс конвертерной плавки и общая характеристика ВЭР кислородно-конвертерного производства стали.....	31
3.2 Использование теплоты стали.....	32
3.3 Использование теплоты шлака.....	34
3.4 Использование конвертерного газа.....	36
3.4.1 Способы отвода конвертерного газа.....	36
3.4.2 Использование конвертерного газа для производства пара.....	38
3.4.3 Использование конвертерного газа в качестве топлива.....	40
3.5 Использование теплоты охлаждения кессона.....	43

4	ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА....	44
4.1	Общая характеристика ВЭР прокатного производства.....	44
4.2	Использование теплоты отходящих газов.....	45
4.3	Использование теплоты охлаждения элементов конструкции нагревательных печей.....	48
4.4	Комплексные теплоутилизационные установки.....	50
4.5	Теплоутилизационная электростанция (ТУЭС).....	52
	ЛИТЕРАТУРА.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

В первой части конспекта лекций по дисциплине «Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий» представлены общие сведения о вторичных энергоресурсах (ВЭР) и дана характеристика основным направлениям использования ВЭР: использование горючих ВЭР в качестве топлива, применение котлов-утилизаторов для получения пара или нагретой воды путем утилизации теплоты отходящих газов технологических печей и агрегатов и применение систем испарительного охлаждения (СИО). В первой части конспекта лекций рассмотрена также тема «Вторичные энергоресурсы коксохимического производства» и приведен пример поверочного теплового расчета водотрубного котла-утилизатора.

Во второй части конспекта рассмотрены ВЭР основных металлургических переделов: доменного, сталеплавильного и прокатного. Анализ ВЭР по отдельным переделам представлен в виде тепловых балансов технологических процессов, на основе которых уточняются ВЭР тех или иных технологических процессов, а затем рассматриваются способы использования отдельных ВЭР.

Сведения, изложенные по использованию ВЭР в доменном, сталеплавильном и прокатном производствах, учитывают производственный опыт по созданию и эксплуатации теплоутилизационного оборудования на отечественных и зарубежных предприятиях черной металлургии, а также рассматривают наиболее перспективные технические решения по утилизации ВЭР, которые пока не нашли широкого применения в промышленности.

Дисциплина «Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий» тесно взаимосвязана с рядом других дисциплин, читаемых студентам специальности 7.05060101 – теплоэнергетика: «Топливо и его сжигание», «Котельные установки», «Нагнетатели и тепловые двигатели», «Источники теплоснабжения» и прочие.

Конспект лекций составлен в соответствии с рабочей программой и учебным планом дисциплины «Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий». Материал, изложенный в конспекте, может быть использован при выполнении научно-исследовательских работ студентов, курсовых проектов, выпускных работ бакалавров, дипломных проектов специалистов и выпускных работ магистров.

# 1 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1.1 Тепловой баланс доменного процесса и общая характеристика ВЭР доменного производства

Доменное производство является крупнейшим потребителем топлива в черной металлургии (до 50 – 60% от общего потребления топлива) и, соответственно, крупнейшим источником ВЭР.

Ориентировочно тепловой баланс доменной плавки имеет вид:

<i>Приход теплоты</i>	<i>Расход теплоты</i>
Теплота кокса ( $Q_k \sim 73\%$ )	Теплота, затраченная на технологию: нагрев, плавление, восстановление и проч. ( $Q_{техн} \sim 30\%$ )
Теплота заменителей кокса: природный газ, угольная пыль, мазут и проч. ( $Q_{з.к.} \sim 12\%$ )	Теплота жидкого чугуна ( $Q_{ч} \sim 6\%$ )
Теплота высокотемпературного воздушного дутья ( $Q_{в.д.} \sim 13\%$ )	Теплота жидкого шлака ( $Q_{шл} \sim 5\%$ )
Теплота экзотермических реакций, например, реакции шлакообразования ( $Q_{экз} \sim 2\%$ )	Химическая энергия доменного газа ( $Q_{д.г.}^x \sim 44\%$ )
	Физическая теплота доменного газа ( $Q_{д.г.}^ф \sim 4\%$ )
	Теплота охлаждения элементов конструкции печи ( $Q_{охл} \sim 4\%$ )
	Прочие расходы и потери теплоты ( $Q_{пр} \sim 7\%$ )
Всего: 100%	Всего: 100%

Из расходной части теплового баланса следует, что доменный процесс является источником:

- тепловых ВЭР, составляющих 19% от общего расхода теплоты (теплота жидкого чугуна  $\sim 6\%$ , теплота шлака  $\sim 5\%$ , физическая теплота доменного газа  $\sim 4\%$  и теплота охлаждения элементов конструкции доменной печи  $\sim 4\%$ );
- топливного ВЭР, составляющего 44% от общего расхода теплоты (химическая энергия доменного газа).

Всего на долю ВЭР приходится  $\sim 63\%$  от общего расхода теплоты.

Из расходной части теплового баланса следует, что крупнейшим ВЭР в доменном производстве является доменный газ (48% от общего расхода теплоты по тепловому балансу). Доменный газ является также ВЭР избыточного давления, что не отражено в тепловом балансе. В целом доменный газ - комбинированный ВЭР, т.е. тепловой, топливный и избыточного давления.

Кроме тепловых ВЭР, указанных в тепловом балансе доменной плавки, к ВЭР доменного производства относится также теплота отходящих газов доменных воздухонагревателей, которая составляет около 20% от расхода теплоты на подогрев воздушного дутья.

Распределение различных ВЭР в общем объеме ВЭР доменного производства составит:

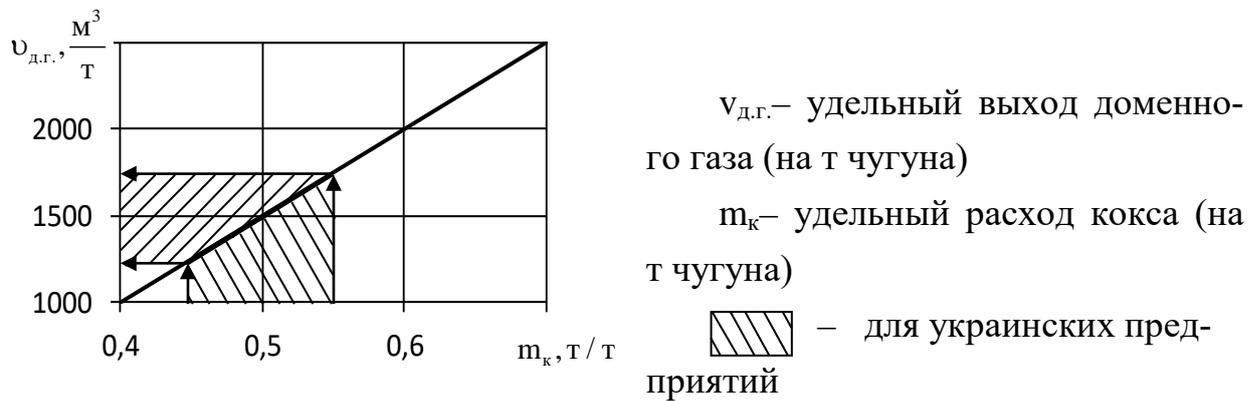
<i>Наименование ВЭР</i>	<i>Доля в общем объеме, %</i>
Химическая энергия доменного газа	75
Физическая теплота доменного газа	4
Избыточное давление доменного газа	4
Теплота жидкого чугуна	5
Теплота шлака	4
Теплота охладителя	4
Теплота отходящих газов доменных воздухонагревателей	4
Всего	100

## **1.2 Использование доменного газа в качестве топлива**

В топливном газовом балансе предприятий черной металлургии доля доменного газа составляет 30 – 40%, что указывает на большое значение доменного газа в топливообеспечении предприятий.

Выход и теплота сгорания доменного газа в значительной степени определяются расходом кокса.

Ориентировочно зависимость между выходом доменного газа и расходом кокса имеет следующий вид:



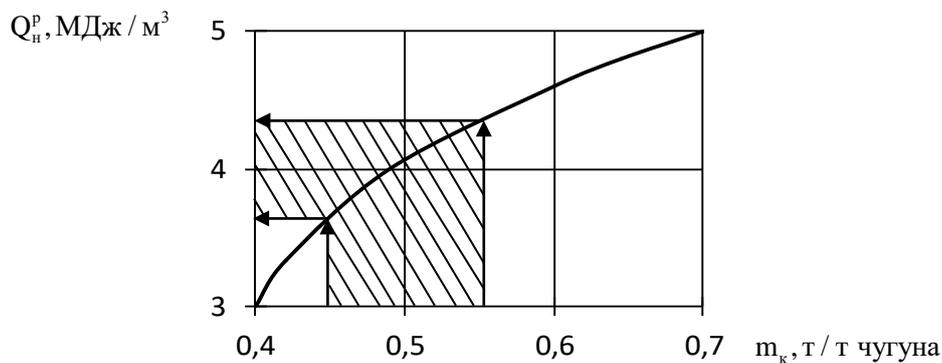
Помимо расхода кокса, выход доменного газа зависит также от ряда других технологических показателей, влияние которых учитывается путем статистической обработки опытных данных по доменной плавке:

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

где  $A, A_1 \dots A_7$  – коэффициент уравнения регрессии;

$\phi_1 \dots \phi_7$  – факторы, влияющие на выход доменного газа:  $\phi_1$  – расход агломерата;  $\phi_2$  – расход окатышей;  $\phi_3$  – расход шлакообразующих;  $\phi_4$  – расход заменителей кокса;  $\phi_5$  – концентрация кислорода в дутье;  $\phi_6$  – температура воздушного дутья;  $\phi_7$  – выход шлака.

Ориентировочно зависимость теплоты сгорания доменного газа  $Q_{н}^p$  от удельного расхода кокса  $m_k$  имеет следующий вид:



В расчетах топливных балансов предприятий используют приведенную теплоту сгорания доменного газа - 4,2 МДж/м<sup>3</sup>.

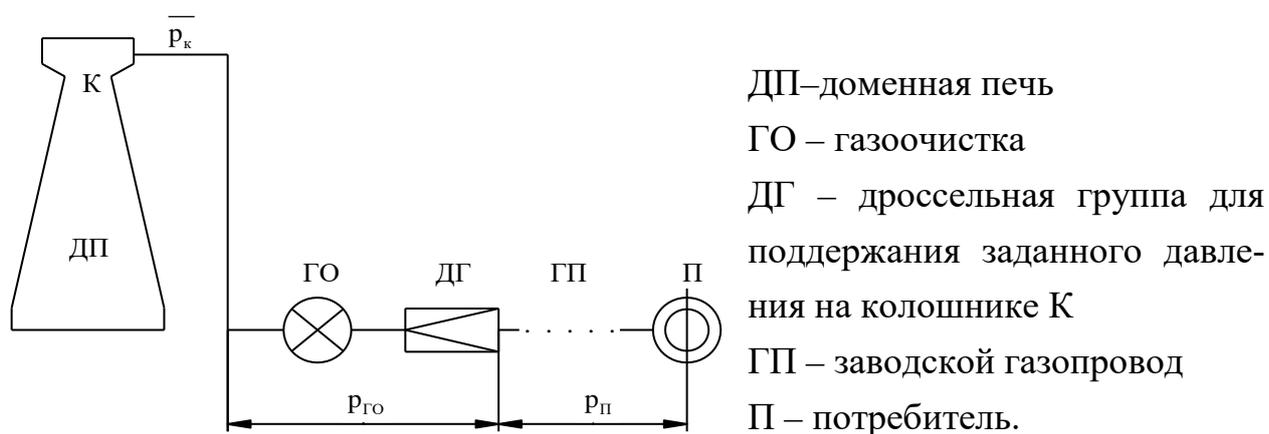
Основными потребителями доменного газа являются:

- доменные воздухонагреватели ~35%;
- котлы ТЭЦ ~30%;
- коксохимическое производство ~25%;
- нагревательные печи прокатных цехов ~10%.

### 1.3 Использование избыточного давления доменного газа

На украинских предприятиях давление доменного газа на колошниках печей  $p_k$  составляет  $0,18 \div 0,34$  МПа (среднее значение  $\overline{p_k} = 0,26$  МПа), на зарубежных печах  $p_k \leq 0,5$  МПа.

С учетом необходимого давления для очистки, транспортировки и использования доменного газа у потребителей появляется нереализованное избыточное давление.



В соответствии с балансом давления доменного газа нереализованное избыточное давление составит:

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

где  $p_{\text{го}}$  – потери давления на газоочистке ( $p_{\text{го}} = 0,02$  МПа);

$p_{\text{п}}$  – давление, необходимое для транспортировки доменного газа к потребителю и использования газа у потребителя ( $p_{\text{п}} = 0,01$  МПа).

Нереализованное избыточное давление доменного газа используют для производства электроэнергии в ГУБТ – газовые утилизационные бескомпрессорные турбины.

Перед подачей доменного газа в ГУБТ после мокрой очистки его следует нагревать до температуры  $250 \div 600$  °С. Нижний предел обеспечивает выход газа из турбины при температуре  $60 \div 80$  °С, что исключает конденсацию влаги, а в случае отрицательных температур газа – обмерзание проточной части турбины. Верхний предел обусловлен термостойкостью сталей, целесообразных с экономической точки зрения для изготовления ротора турбин данного класса.

В зависимости от способа подогрева доменного газа ГУБТ разделяют на 3 группы:

1)ГУБТ с двухступенчатым регенеративным и рекуперативным подогревом: ГУБТ-6 (6-установленная мощность турбогенератора, МВт);

2)ГУБТ с подогревом доменного газа путем смешивания его с высокотемпературными продуктами сгорания: ГУБТ-8и ГУБТ-12;

3)ГУБТ без подогрева, путем применения сухих методов очистки доменного газа, например, в металлокерамических или тканевых фильтрах, что исключает насыщение газа влагой, а, следовательно, исключает конденсацию влаги при охлаждении газа в турбинах.

Рассмотрим принципиальную схему ГУБТ с двухступенчатым регенеративным и рекуперативным подогревом доменного газа (см. рис.1.1).

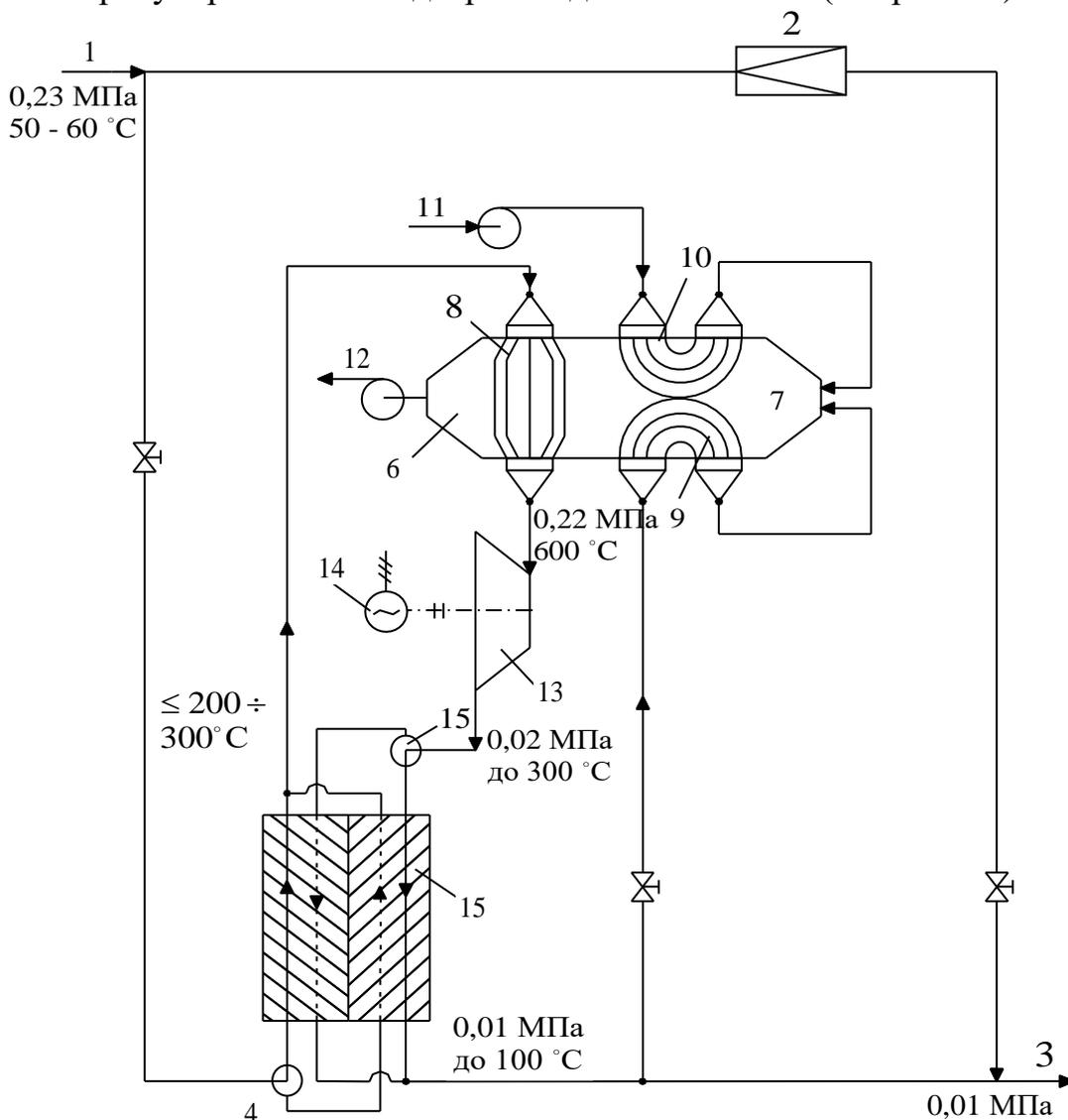


Рисунок 1.1–Принципиальная схема ГУБТ с двухступенчатым регенеративным и рекуперативным подогревом доменного газа

Обозначения к рисунку 1.1:

- 1 – газопровод доменного газа от газоочистки;
- 2 – дроссельная группа, предназначенная для поддержания соответствующего давления на колошнике доменной печи;
- 3 – газопровод доменного газа низкого давления (заводской газопровод);
- 4 – перекидной клапан доменного газа высокого давления;
- 5 – регенеративный теплообменник;
- 6 – комплексный рекуператор, включающий позиции 7 – 12;
- 7 – камера сгорания;
- 8 – рекуператор для подогрева доменного газа высокого давления;
- 9 – рекуператор для подогрева доменного газа низкого давления, идущего на отопление комплексного рекуператора;
- 10 – рекуператор для подогрева воздуха, идущего на сжигание доменного газа низкого давления;
- 11 – дутьевой вентилятор;
- 12 – эксгаустер для отвода продуктов сгорания;
- 13 – газовая турбина;
- 14 – электрогенератор;
- 15 – перекидной клапан доменного газа низкого давления.

Доменный газ высокого давления после газоочистки поступает в разогретую часть насадки регенеративного теплообменника 5, где нагревается до температуры 200–300 °С. Затем газ поступает в подогреватель 8 комплексного рекуператора 6, где нагревается до температуры 600 °С. Потери избыточного давления при подогреве составляют около 0,01 МПа, т.е. в газовую турбину 13 газ поступает с параметрами: 0,22 МПа и 600 °С.

После расширения в турбине параметры доменного газа составят: избыточное давление – 0,02 МПа, температура – ~300 °С. Теплота доменного газа после турбины используется на подогрев насадки регенератора, после которой газ с избыточным давлением 0,01 МПа и температурой до 100 °С направляется в заводской газопровод.

Поочередную работу насадок регенератора в режимах нагрева и охлаждения обеспечивают перекидные клапаны 4 и 15.

Пропускная способность ГУБТ-6 составляет ~150000 м<sup>3</sup>/ч.

Недостатки ГУБТ-6:

- громоздкость вследствие наличия регенеративного теплообменника, требующего для нормальной работы ограниченные скорости газа (до 1 м/с), что увеличивает объемы теплообменника;
- большие капитальные и эксплуатационные затраты вследствие применения двух типов теплообменников и большого объема оборудования;
- расход (сжигание) доменного газа на обслуживание ГУБТ.

Принципиальная схема ГУБТ с использованием смешивающего теплообменника представлена на рисунке 1.2.

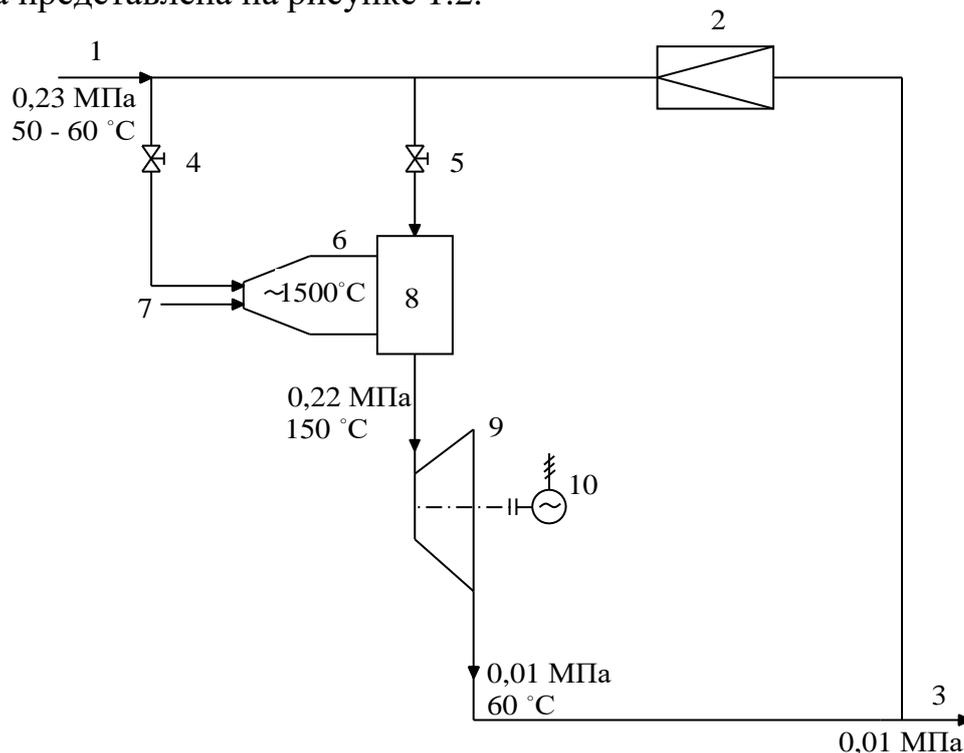


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ГУБТ с подогревом доменного газа путем смешивания с высокотемпературными продуктами сгорания

Обозначения к рисунку 1.2:

- 1 – газопровод доменного газа от газоочистки;
- 2 – дроссельная группа;
- 3 – газопровод доменного газа низкого давления (заводской газопровод);
- 4 – подача доменного газа на сжигание;
- 5 – подача доменного газа на смешивание;
- 6 – камера сгорания;
- 7 – подача сжатого воздуха;
- 8 – камера смешивания;
- 9 – газовая турбина;
- 10 – электрогенератор.

Преимущества по сравнению с ГУБТ-6:

- простота, компактность оборудования и, соответственно, значительно меньшие капитальные затраты;
- более эффективное использование избыточного давления газа за счет отсутствия теплообменников, вызывающих потери давления газа.

Недостаток: снижение теплоты сгорания доменного газа вследствие балластирования продуктами сгорания.

#### **1.4 Использование физической теплоты доменного газа**

Физическая теплота доменного газа, обусловленная температурой на колошнике  $150 \div 350$  °С, не используется по следующим причинам:

- вследствие практически полной потери теплоты газа при мокрой очистке, которая доминирует в доменных цехах;
- вследствие невысокой температуры доменного газа, что делает нецелесообразным использование традиционных поверхностных теплообменников.

Решение проблемы использования физической теплоты доменного газа осуществляется в следующих направлениях:

- применение сухой очистки газа с последующим использованием газа в ГУБТах;
- использование неочищенного доменного газа до газоочистки для подогрева очищенного газа после газоочистки с последующим использованием очищенного газа в ГУБТах;
- использование доменного газа до газоочистки для подогрева сетевой воды в системах теплоснабжения;
- применение контактных теплообменников.

#### **1.5 Использование теплоты чугуна**

Физическая теплота чугуна, обусловленная температурой на выпуске из доменной печи  $1350 \div 1400$  °С, используется в сталеплавильном переделе путем заливки чугуна в жидком виде в сталеплавильные агрегаты: мартеновские печи, конвертера и в электросталеплавильные печи.

В зависимости от соотношения передельного и товарного чугуна на предприятиях в сталеплавильных агрегатах используют 50 ÷ 90% теплоты жидкого чугуна.

### 1.6 Использование теплоты шлака

Удельный выход шлака составляет 0,6 ÷ 0,8 т/т чугуна с температурой выпуска из доменной печи 1450 – 1550 °С, что делает теплоту шлака достаточно значительным тепловым ВЭР.

Использование теплоты шлака зависит от способа его грануляции, которая может быть водяной или воздушной. Гранулированный шлак находит широкое применение в качестве строительного материала.

При **водяной грануляции** теплоту шлака используют для производства пара или нагретой воды в системах теплоснабжения (см. рис. 1.3).

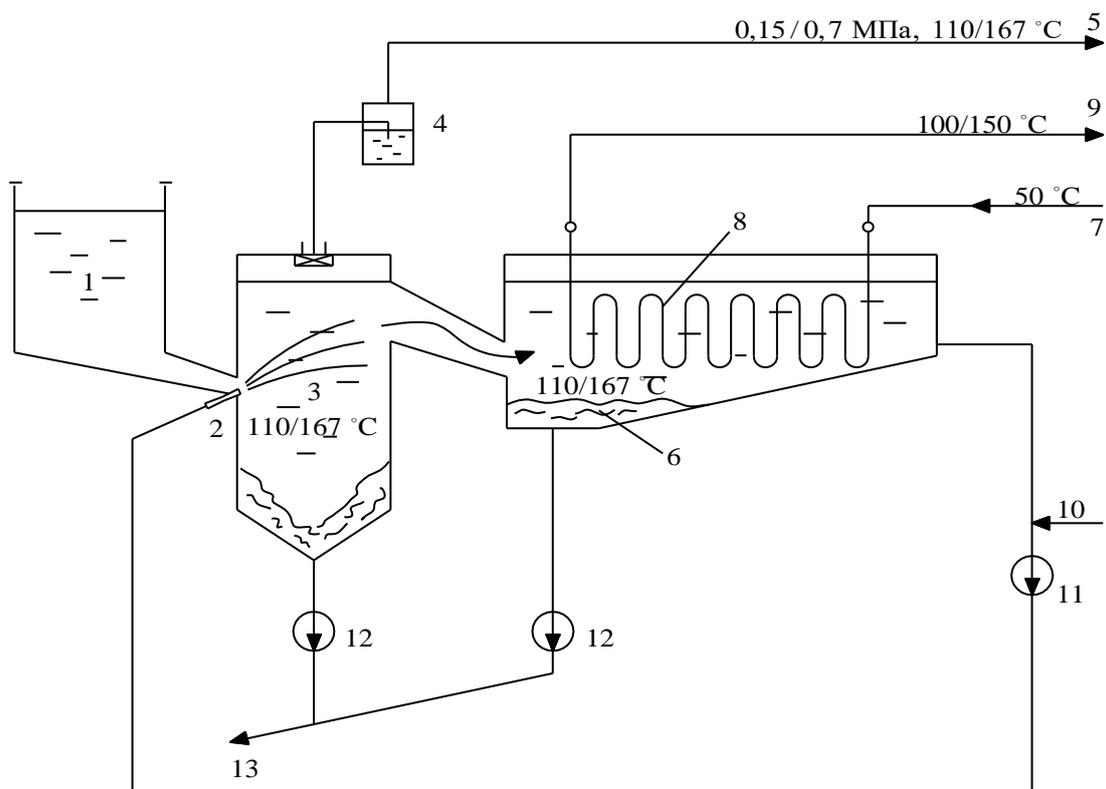


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема использования теплоты доменного шлака при водяной грануляции

Обозначения к рисунку 1.3:

1 – накопитель шлака;

- 2 – сопло для подачи воды на грануляцию;
- 3 – гранулятор, выполняющий также функцию контактного парогенератора и первичного отстойника гранулированного шлака;
- 4 – барботажная очистка пара от серы;
- 5 – подающий паропровод системы теплоснабжения;
- 6 – вторичный отстойник гранулированного шлака, выполняющий также функцию сетевого подогревателя;
- 7 – обратная линия тепловой сети;
- 8 – поверхности нагрева сетевого подогревателя;
- 9 – подающая линия тепловой сети;
- 10 – добавка воды, компенсирующая испарение и потери воды;
- 11 – циркуляционный насос;
- 12 – багерные насосы для транспортировки гидрошлаковой смеси;
- 13 – подача гидрошлаковой смеси на склад.

Жидкий шлак, поступающий самотеком в гранулятор 3, диспергируется и гранулируется в потоке воды из сопла 2. Грануляция шлака сопровождается вскипанием воды. Образующийся пар после сероочистки 4 поступает в подающий паропровод 5 системы теплоснабжения.

Давление в грануляторе поддерживается 0,15 или 0,7 МПа, что приводит к получению насыщенного пара с температурой, соответственно, 110 °С или 167 °С.

Подогрев сетевой воды происходит во вторичном отстойнике 6 до температуры 110 °С или 150 °С в зависимости от температуры воды, перетекающей из первичного отстойника.

Установка позволяет сэкономить значительное количество топлива в отопительный период за счет сокращения сжигаемого топлива в котельных.

Недостатки:

- сезонный характер использования полученной теплоты при утилизации теплоты шлака;
- сернокислотная коррозия конструкций установки и поверхностей нагрева сетевого подогревателя вследствие перехода соединений серы из шлака в воду;
- необходимость тщательной очистки пара от соединения серы;

- необходимость периодической ревизии и чистки от загрязнений коммуникаций установки мелкодисперсным шлаком.

При **воздушной грануляции** теплота нагретого воздуха в результате грануляции шлака используется для производства пара в котле-утилизаторе (см. рис. 1.4).

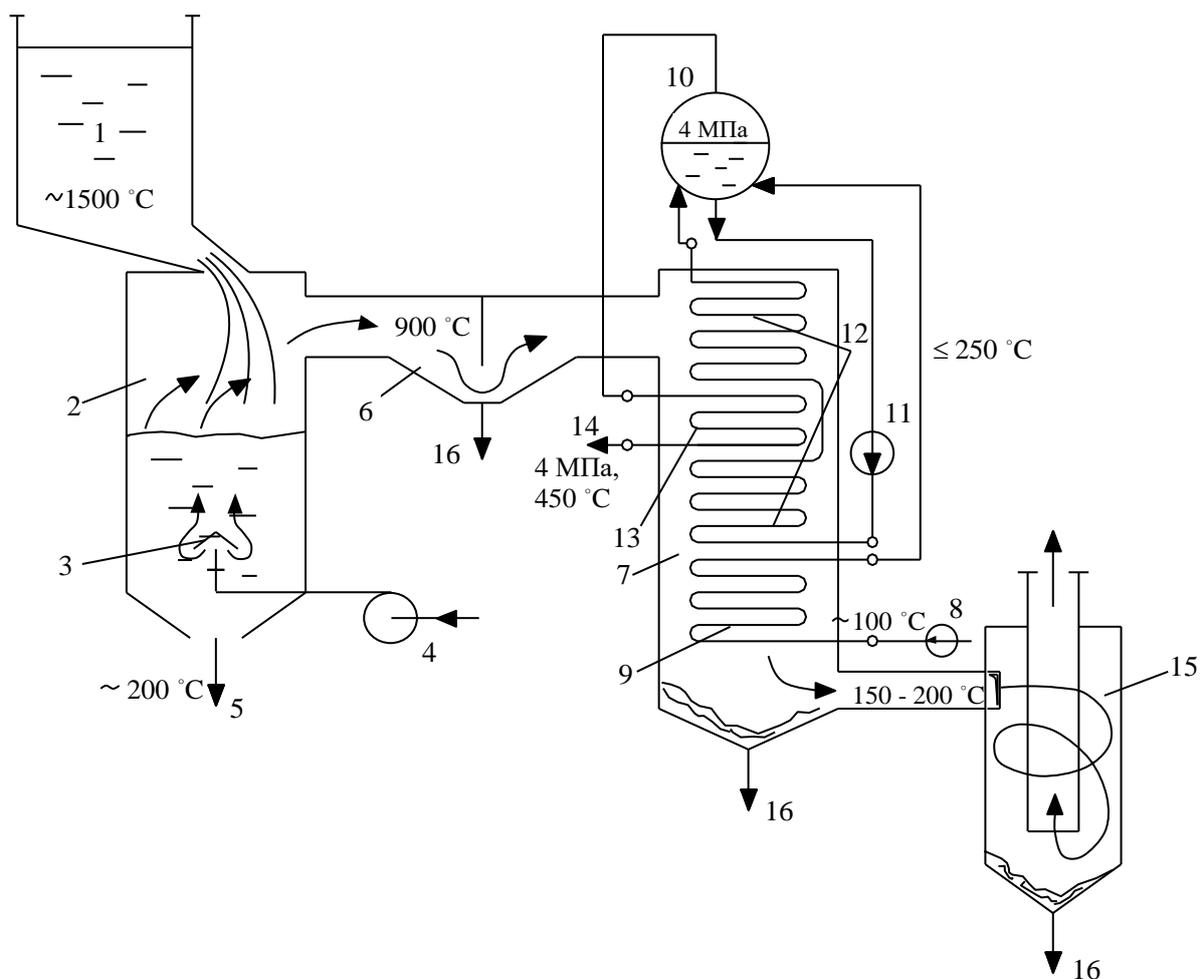


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема использования теплоты доменного шлака при воздушной грануляции

Обозначения к рисунку 1.4:

- 1 – накопитель шлака;
- 2 – шахта воздушного гранулятора;
- 3 – воздухораспределительное устройство;
- 4 – воздуходувка;
- 5 – отвод гранулированного шлака;
- 6 – пылесадительная камера;

- 7 – котел-утилизатор, включающий позиции 8 – 13;
- 8 – питательный насос;
- 9 – экономайзер;
- 10 – барабан-сепаратор;
- 11 – циркуляционный насос;
- 12 – испарительные поверхности нагрева;
- 13 – пароперегреватель;
- 14 – выход перегретого пара;
- 15 – пылеосадительный циклон;
- 16 – отвод мелкодисперсного шлака.

Жидкий шлак самотеком поступает в шахту воздушного гранулятора 2, где гранулируется встречным потоком воздуха. Гранулированный шлак в нижней части шахты охлаждается в слоевом режиме.

Нагретый до 900 °С воздух в результате грануляции шлака после пылеосадительной камеры 6 поступает в котел-утилизатор 7, где, охлаждаясь до 150 – 200 °С, передает теплоту на производство пара.

Преимуществом такой установки по сравнению с предыдущей является получение пара энергетических параметров, который можно направить в ТЭЦ для выработки электроэнергии в турбогенераторах.

Недостатки:

- абразивный износ элементов установки и поверхностей нагрева котла-утилизатора вследствие запыленности воздуха шлаковой пылью;
- сернокислотная коррозия хвостовых поверхностей нагрева котла-утилизатора (при грануляции соединения серы в шлаке частично переходят в воздух);
- необходимость доочистки воздуха после пылеосадительного циклона.

### **1.7 Использование теплоты охладителя элементов конструкции доменной печи**

Использование теплоты охладителя элементов конструкции доменной печи зависит от способа охлаждения: водяное или испарительное.

При **водяном охлаждении** теплоту нагретой до 50 – 55°С воды можно использовать для выработки электроэнергии в паросиловых установках, работа-

ющих на низкокипящих жидкостях, например, фреонах с температурой кипения в пределах  $24 \div 30^\circ\text{C}$  (см. рис. 1.5).

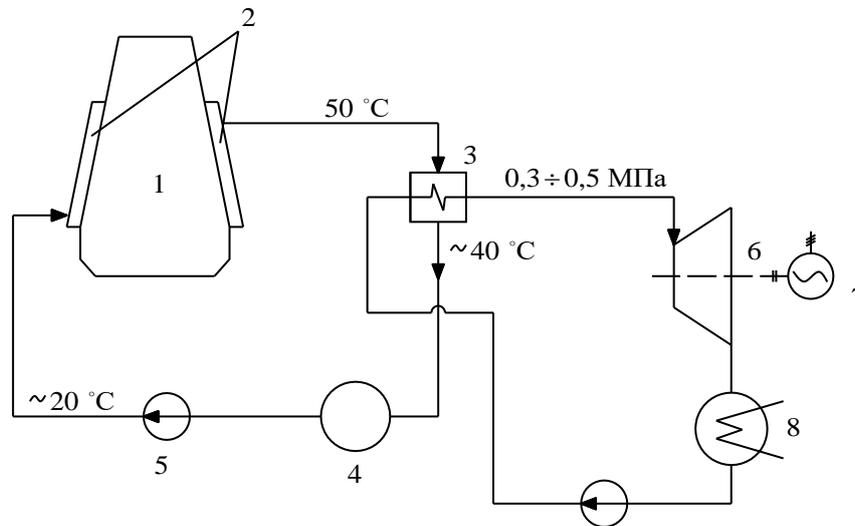


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема установки для использования теплоты водяного охлаждения доменной печи

Обозначения к рисунку 1.5:

- 1 – доменная печь;
- 2 – холодильники шахты доменной печи;
- 3 – испаритель фреона;
- 4 – охлаждающее устройство обратной системы водоснабжения (градирня);
- 5 – циркуляционный насос обратной системы;
- 6 – фреоновая турбина;
- 7 – электрогенератор;
- 8 – конденсатор фреона;
- 9 – фреоновый насос.

Установка, приведенная на рисунке 1.5, включает фреоновые турбогенераторы мощностью  $2 \div 10$  тыс. кВт. Давление фреона на входе в турбину составляет  $0,3 \div 0,5$  МПа.

Достоинства установки:

- высокая надежность работы вследствие невысоких давлений и температур фреона;
- возможность получения электроэнергии непосредственно в доменном цехе и использование ее для собственных нужд цеха.

Недостатки:

- невысокая энергетическая эффективность паросиловой установки, к.п.д. которой определяется произведением:

$$\eta_{уст} = \eta_{исп} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{эм}, \quad (1.3)$$

где  $\eta_{исп}$  - тепловой к.п.д. испарителя фреона,  $\eta_{исп} \approx 0,33$ ;

$\eta_t$  - термический к.п.д. цикла,  $\eta_t \approx 0,30$ ;

$\eta_{oi}$  - внутренний относительный к.п.д. турбины,  $\eta_{oi} \approx 0,85$ ;

$\eta_{эм}$  - электромеханический к.п.д. турбогенератора,  $\eta_{эм} \approx 0,98$ .

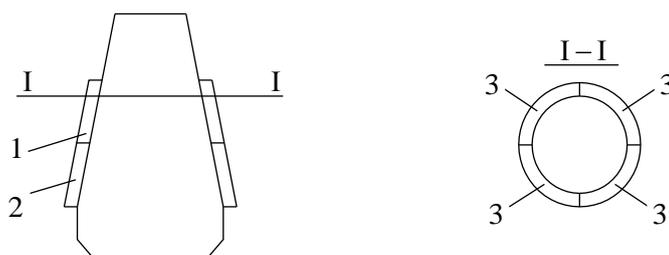
$$\eta_{уст} = 0,33 \cdot 0,30 \cdot 0,85 \cdot 0,98 \approx 0,08, \text{ т.е. } 8\%;$$

- негативное влияние фреона на экологию (образование озоновых дыр в атмосфере).

При **испарительном охлаждении** теплоту охлаждения получают в виде насыщенного водяного пара.

Рассмотрим систему испарительного охлаждения (СИО) холодильников шахты доменной печи, через которые отводится основное количество теплоты охлаждения.

Для обеспечения надежной циркуляции холодильники шахты доменной печи разделяют по высоте на зоны (верхняя и нижняя), а по периметру на секции (2 ÷ 4 секций).



1 – верхняя зона; 2 – нижняя зона; 3 – секции

Каждая секция оборудуется автономной системой испарительного охлаждения (см. рис. 1.6).

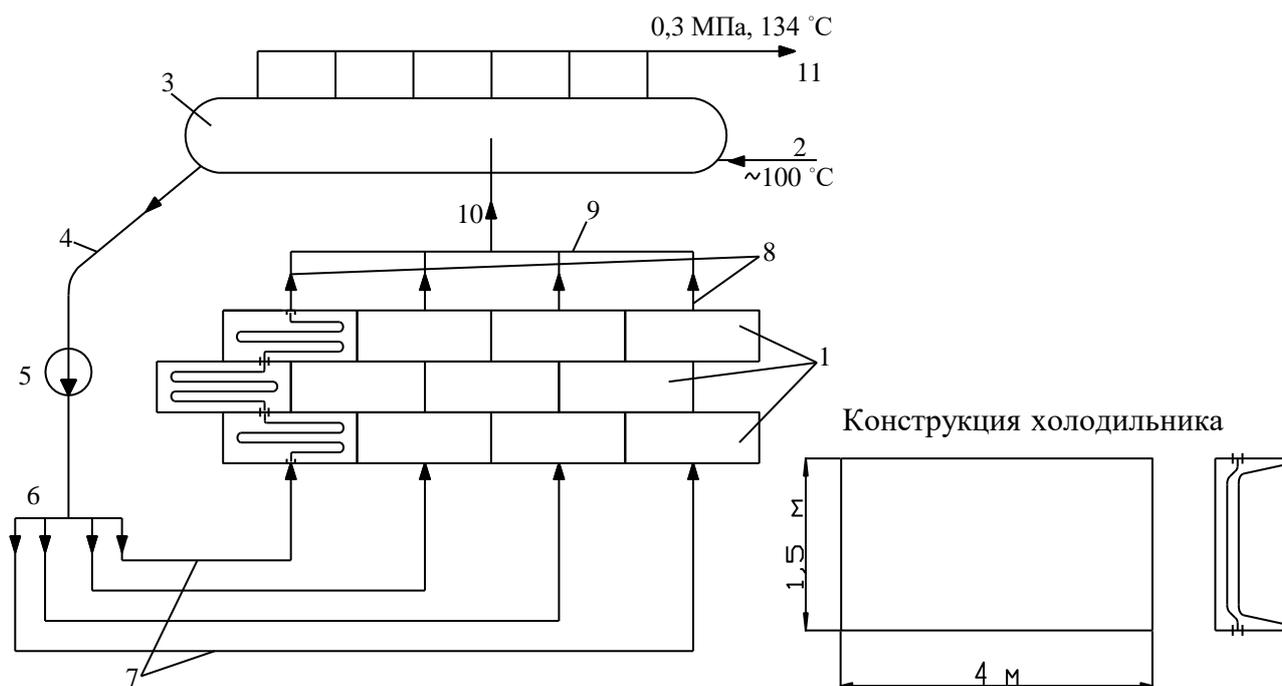


Рисунок 1.6 – Схема СИО секции холодильников шахты доменной печи

Обозначения к рисунку 1.6:

- 1 – холодильники шахты доменной печи;
- 2 – подача питательной воды;
- 3 – барабан-сепаратор;
- 4 – опускная труба;
- 5 – циркуляционный насос;
- 6 – коллектор опускной трубы;
- 7 – индивидуальные подводящие трубы;
- 8 – индивидуальные отводящие трубы;
- 9 – коллектор подъемной трубы;
- 10 – подъемная труба;
- 11 – выход насыщенного пара.

Холодильники шахты доменной печи выполнены в виде чугунного литья с вмонтированными в литье трубами поверхностей нагрева. Составленные друг над другом холодильники образуют автономный контур циркуляции (см. рис. 1.6).

Недостатком СИО холодильников шахты доменной печи является невысокое давление получаемого пара (0,2 – 0,3МПа), что ограничивает возможности его применения.

Работа СИО холодильников шахты доменной печи позволяет судить о равномерности теплового режима в печи.

## 1.8 Использование теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей

Теплота отходящих газов доменных воздухонагревателей, обусловленная температурой на выходе  $150 \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$ , может быть использована в двух направлениях:

- для подогрева сетевой воды в системах теплоснабжения (утилизация теплоты);
- для подогрева воздуха, идущего на сжигание топлива, при нагреве насадки воздухонагревателя (рекуперация теплоты).

Для подогрева воздуха наиболее рационально применение теплообменников с промежуточным теплоносителем, который позволяет компактно разместить теплообменники без крупногабаритных коробов для подвода воздуха и отвода отходящих газов (см. рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема использования теплоты отходящих газов доменных воздухонагревателей

В качестве промежуточного теплоносителя применяют воду, масло, органические соединения (дифенол, дифенолоксид, доутерм). При нагреве воздуха до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  экономия топлива в доменных воздухонагревателях составляет 4 –

5%. При использовании в качестве топлива доменного газа целесообразным является также нагрев газа.

## 2 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ МАРТЕНОВСКОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

### 2.1 Тепловой баланс мартеновской печи и общая характеристика ВЭР мартеновского производства стали

В мировом производстве стали на долю мартеновской стали приходится около 30%. В Украине доля мартеновской стали составляет до 40 %.

Выплавка мартеновской стали включает завалку шихты, нагрев, плавление, доводку и выпуск плавки. Продолжительность цикла плавки 4 ÷ 9 часов.

При отоплении мартеновской печи с определенным интервалом времени осуществляют перекидку клапанов (10 – 15 мин), что изменяет направление движения продуктов сгорания и обеспечивает поочередный нагрев насадок регенератора. Поочередное охлаждение насадок регенератора осуществляется воздухом, идущим на горение топлива (см. рис. 2.1).

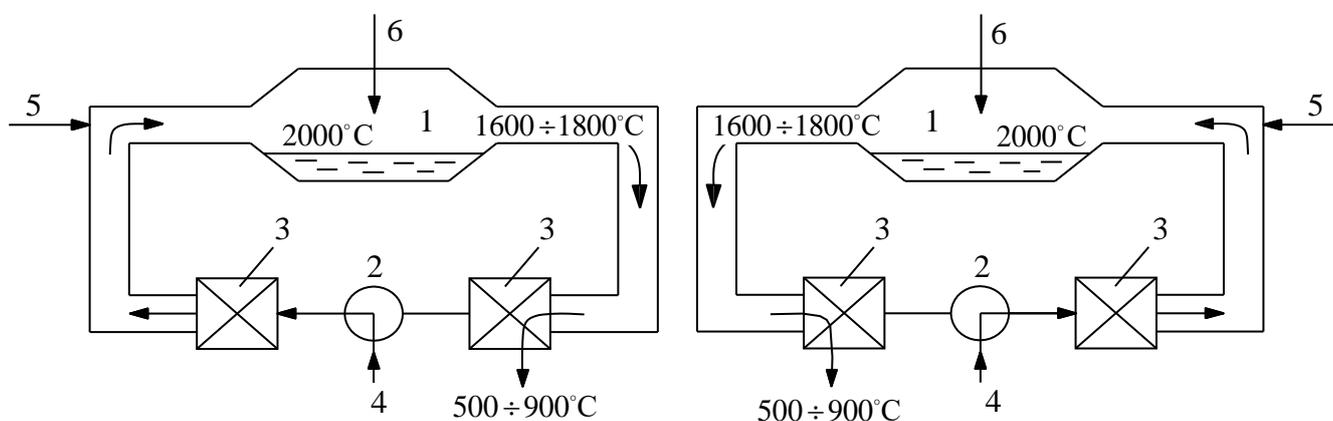


Рисунок 2.1 – Схема работы мартеновской печи

Обозначения к рисунку 2.1:

- 1 – ванна печи;
- 2 – перекидной клапан;
- 3 – регенераторы;
- 4 – подвод воздуха;
- 5 – подача топлива;

б – кислородная фурма

В качестве топлива используют природный газ, коксодоменную смесь, мазут и проч. При доводке стали применяют кислородную продувку, которая существенно сокращает продолжительность плавки.

Выплавка мартеновской стали является весьма энергоемким процессом: удельный расход топлива около 100 кг условного топлива на т стали.

Тепловой баланс мартеновской печи зависит от вида процесса: рудный, скрап-рудный или скрап-процесс. В рудном процессе основная металлошххта – жидкий чугун ( $t_{\text{ч}} = 1340 - 1360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), в скрап-рудном процессе – жидкий чугун и металлолом, в скрап-процессе – металлолом.

Ориентировочный тепловой баланс мартеновской печи при скрап-рудном процессе:

<i><b>Приход теплоты</b></i>	<i><b>Расход теплоты</b></i>
Теплота жидкого чугуна ( $Q_{\text{ч}} \sim 10\%$ )	Теплота жидкой стали ( $Q_{\text{ст}} \sim 20\%$ )
Теплота топлива ( $Q_{\text{т}} \sim 50\%$ )	Теплота шлака ( $Q_{\text{шл}} \sim 5\%$ )
Теплота нагретого воздуха ( $Q_{\text{н.в.}} \sim 25\%$ )	Теплота эндотермических реакций, связанных с технологией выплавки стали ( $Q_{\text{энд}} \sim 10\%$ )
Теплота экзотермических реакций окисления примесей чугуна ( $Q_{\text{экз}} \sim 15\%$ )	Теплота отходящих газов ( $Q_{\text{отх}} \sim 45\%$ )
	Теплота охладителя элементов конструкции печи ( $Q_{\text{охл}} \sim 10\%$ )
	Потери теплоты ( $Q_{\text{пот}} \sim 10\%$ )
Всего: 100%	Всего: 100%

Реконструкция мартеновского производства стали осуществлялась путем переоборудования обычных мартеновских печей в двухванные сталеплавильные агрегаты (ДСПА), что позволяет увеличить мощность сталеплавильного агрегата при минимальных капитальных затратах (см. рис. 2.2).

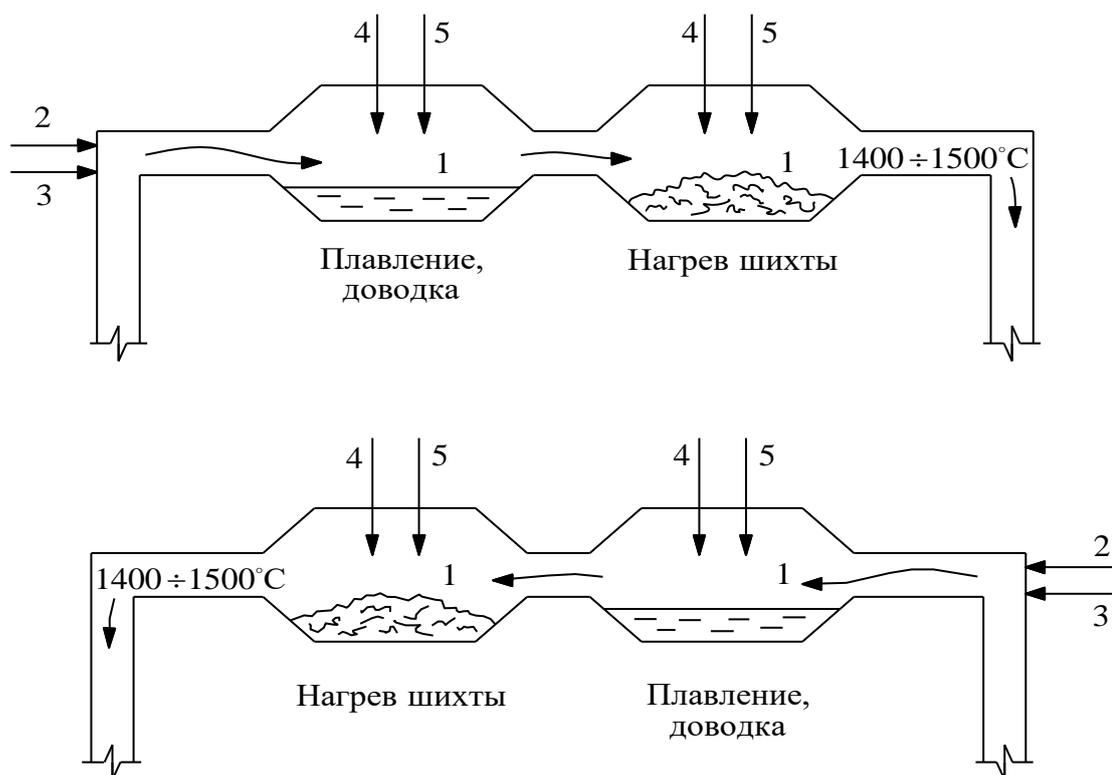


Рисунок 2.2 – Схема двухванного сталеплавильного агрегата (ДСПА)

Обозначения к рисунку 2.2:

- 1 – ванны сталеплавильного агрегата;
- 2 – подача топлива;
- 3 – подача воздуха;
- 4 – кислородная фурма;
- 5 – газокислородная фурма.

В одной из ванн ДСПА осуществляется нагрев шихты, в другой – плавление и доводка.

Агрегат работает без регенераторов на холодном воздухе, перекидка клапанов осуществляется два раза за плавку.

Отходящие газы после плавления и доводки используются для нагрева шихты. Дефицит теплоты при подогреве и плавлении шихты компенсируется дополнительным сжиганием топлива через газокислородную фурму.

## Ориентировочный тепловой баланс ДСПА:

<i>Приход теплоты</i>	<i>Расход теплоты</i>
Теплота жидкого чугуна ( $Q_{\text{ч}} \sim 20\%$ )	Теплота жидкой стали ( $Q_{\text{ст}} \sim 40\%$ )
Теплота топлива ( $Q_{\text{т}} \sim 20\%$ )	Теплота шлака ( $Q_{\text{шл}} \sim 10\%$ )
Теплота экзотермических реакций окисления примесей чугуна ( $Q_{\text{экз}} \sim 60\%$ )	Теплота эндотермических реакций, связанных с технологией выплавки стали ( $Q_{\text{энд}} \sim 10\%$ )
	Теплота отходящих газов ( $Q_{\text{отх}} \sim 20\%$ )
	Теплота охладителя элементов конструкции печи ( $Q_{\text{охл}} \sim 10\%$ )
	Потери теплоты ( $Q_{\text{пот}} \sim 10\%$ )
Всего: 100%	Всего: 100%

Из расходной части тепловых балансов мартеновской печи и ДСПА следует, что оба процесса являются источниками тепловых ВЭР, на которые приходится около 90 % теплоты в расходной части тепловых балансов (теплота стали, шлака, отходящих газов и охладителя элементов конструкции печей).

### 2.2 Использование теплоты отходящих газов

Теплота отходящих газов мартеновских печей в значительной степени используется для подогрева воздуха в регенераторах. После регенераторов температура отходящих газов составляет  $500 \div 900$  °С. Теплота отходящих газов после регенераторов используется в котлах-утилизаторах (см. рис. 2.3).

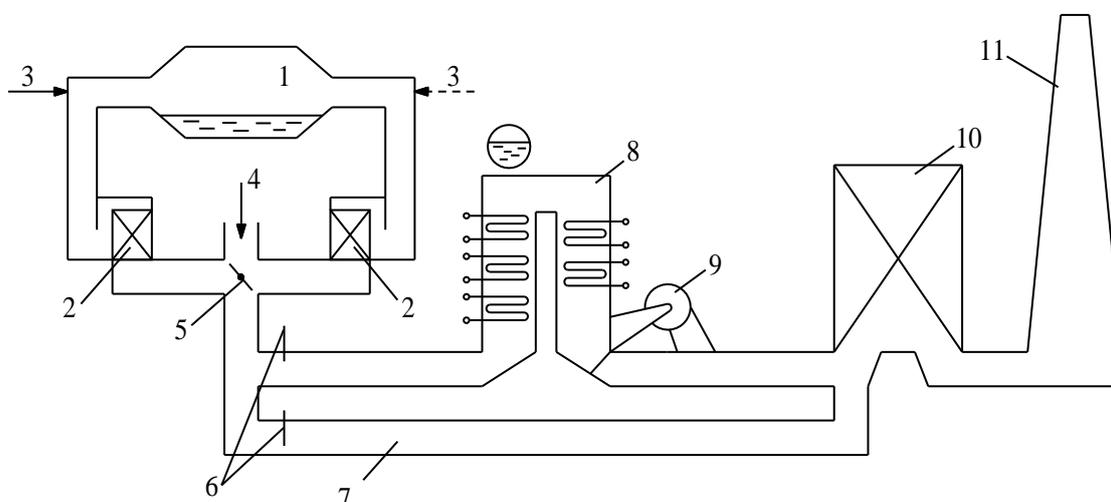


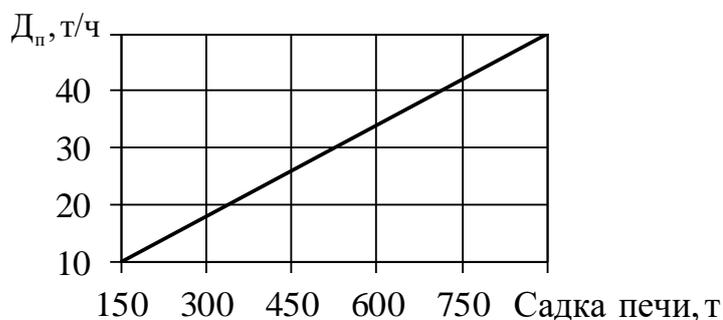
Рисунок 2.3 – Схема размещения котла-утилизатора на газоотводящем тракте мартеновской печи

Обозначения к рисунку 2.3:

- 1 – мартеновская печь;
- 2 – регенераторы;
- 3 – подача топлива;
- 4 – подача воздуха;
- 5 – перекидной клапан;
- 6 – шибер;
- 7 – обводной газоход;
- 8 – котел-утилизатор;
- 9 – дымосос;
- 10 – газоочистка;
- 11 – дымовая труба.

За мартеновскими печами устанавливают водотрубные конвективные котлы-утилизаторы. Параметры получаемого пара: давление  $p_p \leq 4,5$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} \leq 450$  °С. Удельная паропроизводительность составляет около 0,4 т пара/т стали.

Зависимость паропроизводительности котла-утилизатора  $D_n$  от садки мартеновской печи:



Установка котлов-утилизаторов за мартеновскими печами снижает температуру отходящих газов до 150 – 200 °С, что позволяет установить дымосос, обеспечить принудительную тягу и увеличить производительность печи.

Использование отходящих газов за ДСПА путем установки серийных котлов-утилизаторов требует решение следующих проблем:

**1.** Снижение температуры отходящих газов. Температура отходящих газов за ДСПА составляет 1400 – 1500 °С, что исключает непосредственно применение серийных водотрубных котлов-утилизаторов.

2. Дожигание СО, концентрация которого в отходящих газах ДСПА значительно выше, чем в отходящих газах мартеновских печей, вследствие более интенсивной кислородной продувки.

Возможное решение этих задач иллюстрируется на схеме размещения котла-утилизатора за ДСПА (см. рис. 2.4).

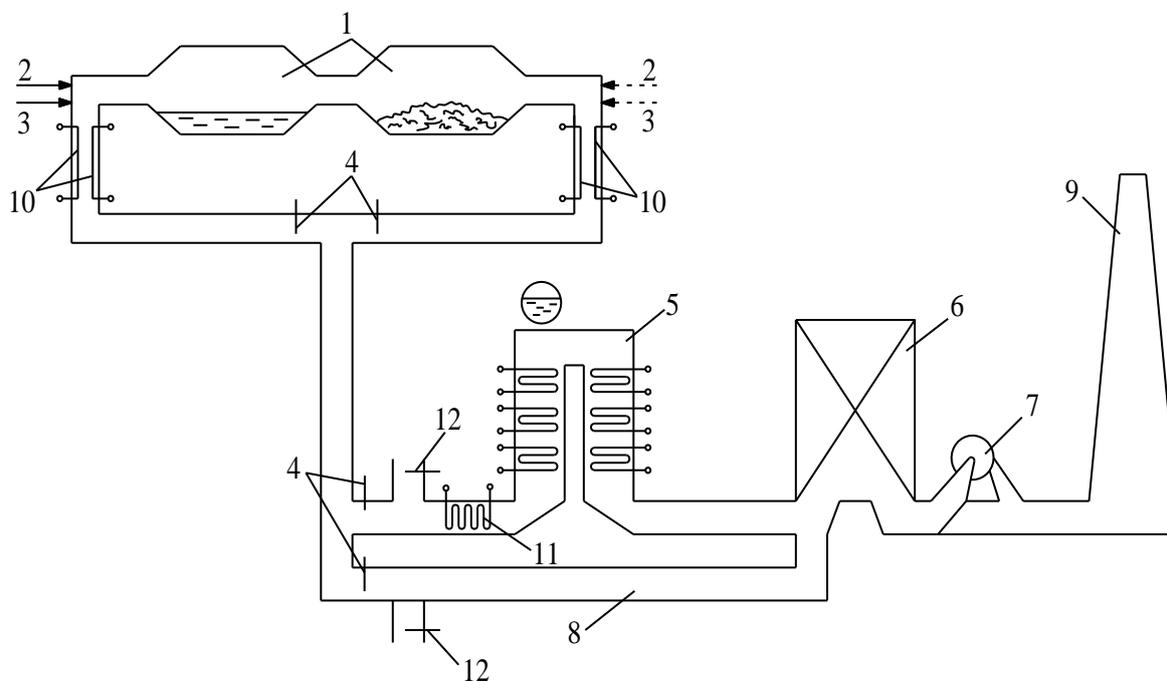


Рисунок 2.4 – Схема размещения котла-утилизатора на газоотводящем тракте ДСПА

Обозначения к рисунку 2.4:

- 1 – сталеплавильные ванны;
- 2 и 3 – подача топлива и воздуха;
- 4 – шиберы каналов и газоходов печи;
- 5 – котел-утилизатор;
- 6 – газоочистка;
- 7 – дымосос;
- 8 – обводной газоход;
- 9 – дымовая труба;
- 10 – радиационные поверхности нагрева, выполненные в виде экранов вертикальных газоходов ДСПА;
- 11 – предвключенные испарительные поверхности нагрева;
- 12 – клапан для подачи воздуха с целью дожигания СО.

Охлаждение отходящих газов достигается установкой радиационных экранов 10 в вертикальных газоходах ДСПА и предвключенной секцией испарительных поверхностей нагрева 11. Дожигание СО осуществляется подсосом воздуха через клапан 12.

### 2.3 Использование теплоты охладителя элементов конструкции мартеновской печи

Использование теплоты охладителя элементов конструкции мартеновской печи возможно при оборудовании печи системой испарительного охлаждения (СИО). Большинство мартеновских печей оборудовано СИО, которая обеспечивает охлаждение около 25 элементов печи: кессоны газовых пролетов, пятовые балки главного свода печи, столбики передних стенок, рамы завалочных окон, форсунки, перекидные клапаны и проч. (см. рис. 2.5).

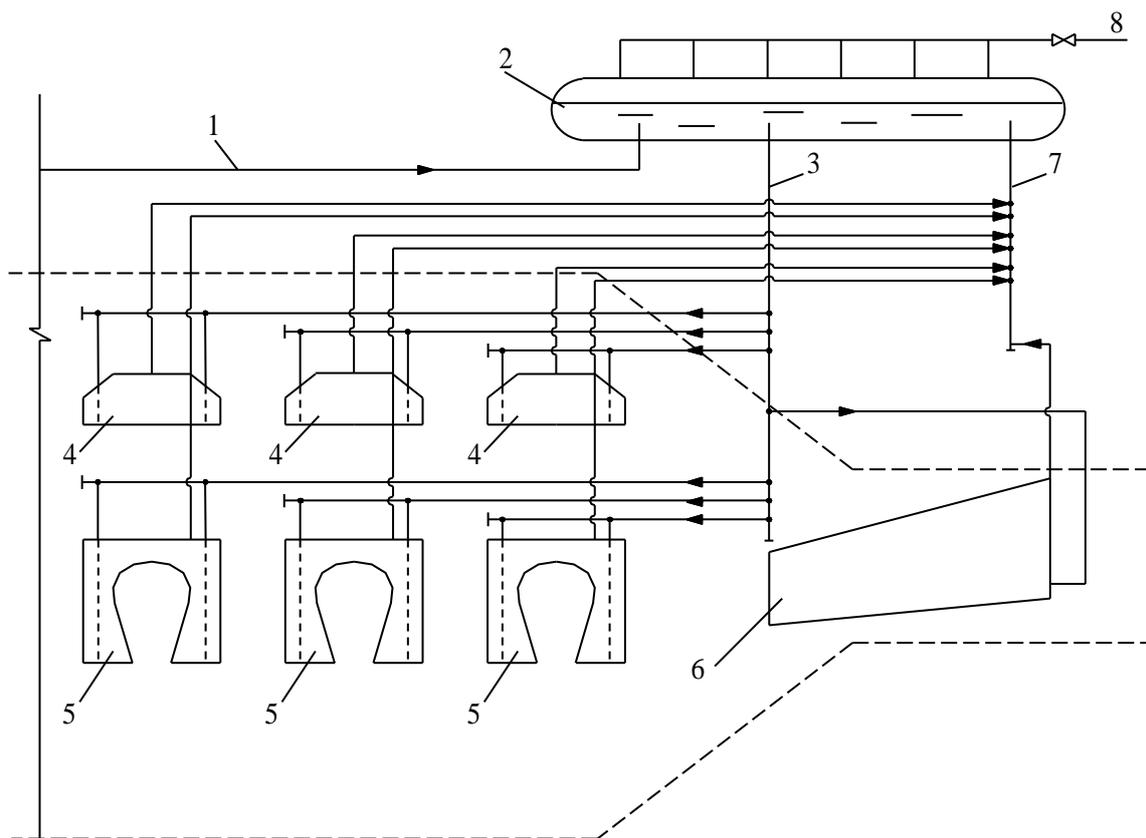


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема СИО с коллекторной разводкой труб

Обозначения к рисунку 2.5:

1 – подача питательной воды;

- 2 – барабан-сепаратор;
- 3 – опускной коллектор;
- 4 – пятовые балки главного свода печи;
- 5 – рамы завалочных окон;
- 6 – кессон газового пролета;
- 7 – подъемный коллектор;
- 8 – подача насыщенного пара потребителю.

На СИО приходится 85 % теплоты, отводимой через системы охлаждения печи. Водяное охлаждение используется только в том случае, если по конструктивным и теплотехническим признакам невозможно использовать СИО. Вместе с этим водяное охлаждение на мартеновских печах остается в качестве резервного.

СИО мартеновских печей выполняется как с коллекторной, так и с индивидуальной разводкой труб, причем, опускная система всегда коллекторная, а подъемная система может быть индивидуальной только в том случае, если разность высот между барабаном и охлаждаемыми элементами не превышает 10 м.

Обычно СИО мартеновских печей состоит из двух автономных и практически симметричных частей. При давлении в барабане до 1,2 МПа охлаждаемые элементы – полые, свыше 1,2 МПа – трубчатые.

Применяют естественную циркуляцию. Максимальное давление – 2,5 МПа. Удельный выход пара около 0,25 т/т стали.

Пар СИО используется:

- в системах коммунально-бытового и технологического теплоснабжения предприятия;
- на ТЭЦ предприятия (подготовка химочищенной воды, деаэрация питательной воды, подача пара в отборы турбин и проч.)

Для расширения диапазона применения пара СИО мартеновских печей пар перегревают в центральных пароперегревателях (см. рис. 4.3).

### 3 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Кислородно-конвертерное производство стали занимает ведущее положение в мировом производстве стали (на долю конвертерной стали приходится около 70%): в отдельных странах кислородно-конвертерное производство стали составляет: США ~ 60%, Германия ~ 70%, Япония ~ 80%, Франция ~ 80%. В Украине на долю конвертерной стали приходится около 60%.

Процесс производства стали в конвертерах – бестопливный. Обеспечение теплотой происходит за счет экзотермических реакций окисления примесей чугуна.

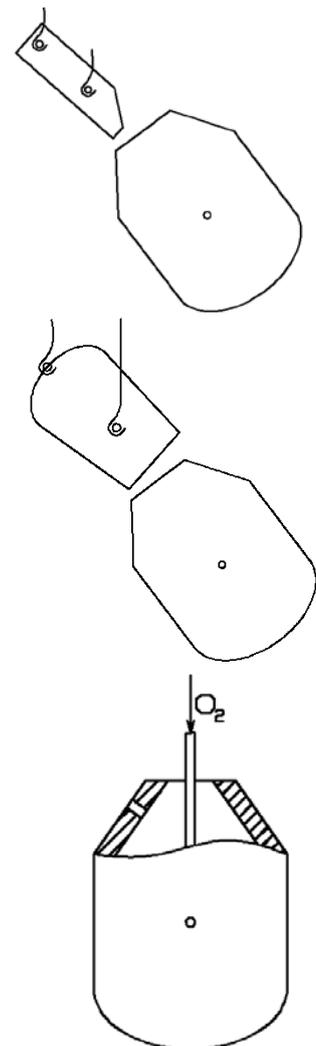
Выплавка стали осуществляется в конвертерах, которые представляют собой бронированные футерованные изнутри реторты с возможностью поворота на 360° вокруг горизонтальной оси.

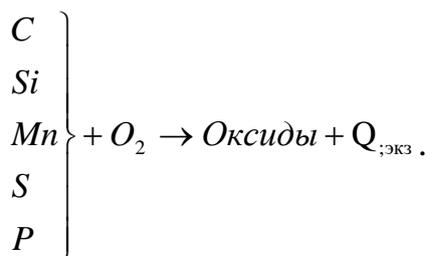
В конвертер загружают лом (до 25% от массы металлошихты) путем поворота конвертера к пролету, который обслуживает мостовой кран. Загрузка осуществляется совками с дозированным количеством лома.

Затем заливают чугун (свыше 75% от массы металлошихты,  $t_{ч} \sim 1340 - 1360 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Заливку чугуна осуществляют чугуновозным ковшом также путем поворота конвертера к пролету, который обслуживается мостовым краном.

После заливки чугуна конвертер устанавливают в вертикальное положение.

Опускают кислородную фурму и осуществляют продувку. В процессе кислородной продувки происходит окисление примесей чугуна с образованием соответствующих оксидов и выделением теплоты реакций:

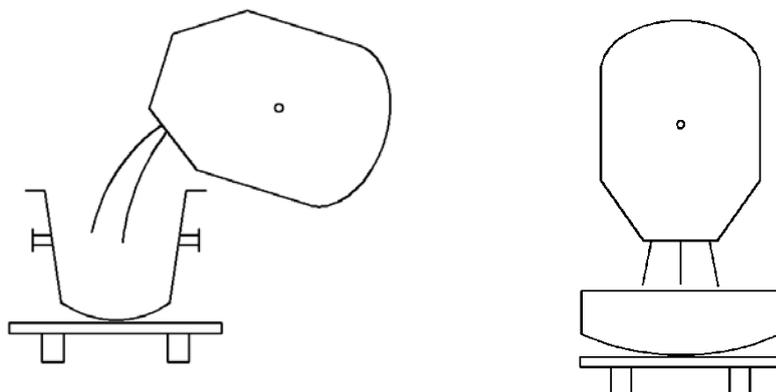




Во время продувки выделяется конвертерный газ:  $CO \leq 90\%$ ,  $t_r \leq 1600 - 1800$  °С, запыленность  $\leq 250$  г/м<sup>3</sup>. Длительность продувки около 15 мин.

После продувки осуществляют выпуск плавки:

выпуск стали ( $t_{ст} \sim 1540 - 1550$  °С) и выгрузку шлака ( $t_{шл} \sim 1500$  °С):



После выпуска плавки цикл выплавки стали повторяется. Общая продолжительность цикла составляет до 45-50 мин.

### 3.1 Тепловой баланс конвертерной плавки и общая характеристика ВЭР кислородно-конвертерного производства стали

Ориентировочный тепловой баланс кислородно-конвертерной плавки:

<b>Приход теплоты</b>	<b>Расход теплоты</b>
Теплота чугуна ( $Q_{ч} \sim 50\%$ )	Теплота жидкой стали ( $Q_{ст} \sim 50\%$ )
Теплота экзотермических реакций окисления примесей чугуна ( $Q_{\text{экз}} \sim 50\%$ )	Теплота шлака ( $Q_{шл} \sim 5\%$ )
	Теплота конвертерного газа ( $Q_{к.г.} \sim 40\%$ ), в том числе:
	физическая теплота конвертерного газа ( $Q_{к.г.}^{\phi} \sim 8\%$ )
	химическая энергия конвертерного газа ( $Q_{к.г.}^x \sim 32\%$ )
	Потери теплоты ( $Q_{\text{пот}} \sim 5\%$ )
Всего 100%	Всего 100%

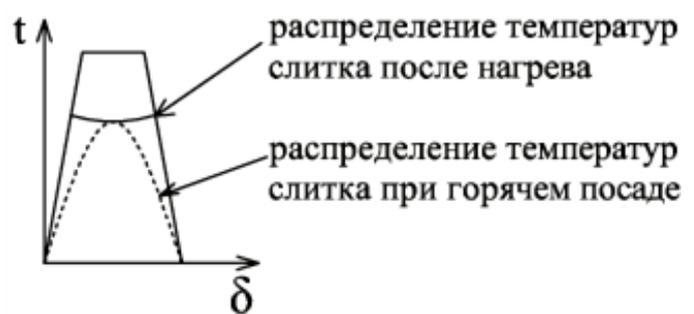
Из расходной части теплового баланса следует, что доля ВЭР составляет около 95% от общего расхода теплоты, затраченной на процесс, в том числе, доля топливных ВЭР (химическая энергия конвертерного газа) – 32%, а доля тепловых ВЭР (физическая теплота стали, шлака и конвертерного газа) – 63%.

### 3.2 Использование теплоты стали

Использование физической теплоты конвертерной стали зависит от способа разливки стали: в изложницы или на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

**1.** При разливке стали в изложницы теплоту стали используют путем горячего посада слитков в нагревательные колодцы.

При горячем посаде в нагревательном колодце следует нагреть только периферию слитка, что сокращает время нагрева и, соответственно, расход топлива примерно в два раза. При горячем посаде



значительно уменьшается образование окалины вследствие сокращения времени нагрева.

Путем горячего посада удастся использовать около 50% теплоты стали.

Сложность реализации горячего посада заключается в сложности согласования работы конвертерного и прокатного цехов.

**2.** При разливке стали на МНЛЗ теплоту стали можно использовать путем выработки тепловой энергии в виде нагретой воды или пара (см. рис. 3.1).

Выработка пара достигается путем оборудования кристаллизатора МНЛЗ системой испарительного охлаждения (СИО). Для нагрева воды используют нагретый воздух после воздушного охлаждения заготовок, полученных на МНЛЗ. Схема, приведенная на рисунке 3.1, обеспечивает комбинацию выработки пара и нагрева воды при использовании теплоты стали.

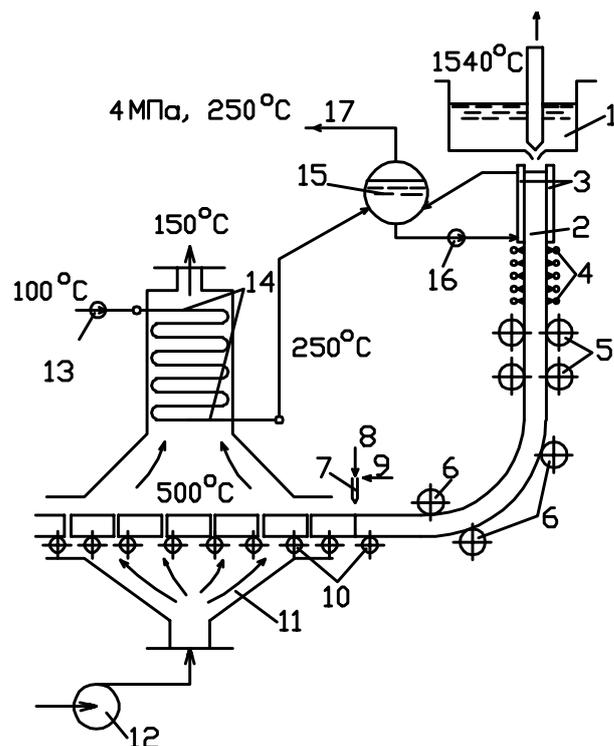


Рисунок 3.1. – Принципиальная схема МНЛЗ с использованием теплоты стали для производства пара

Обозначения к рисунку 3.1:

- 1 – накопительный ковш;
- 2 – кристаллизатор;
- 3 – рубашка кристаллизатора, оборудованная системой испарительного охлаждения (СИО);
- 4 – орошающий холодильник;
- 5 – вытягивающие ролики;
- 6 – изгибающие ролики;
- 7 – резак;
- 8 – подача углеводородного топлива;
- 9 – подача кислорода;
- 10 – роликовый конвейер (рольганг);
- 11 – камера воздушного охлаждения заготовок;
- 12 – воздуходувка;
- 13 – питательный насос;
- 14 – водогрейный пакет, выполняющий функцию экономайзера;
- 15 – барабан–сепаратор СИО;
- 16 – циркуляционный насос;

17 – подача пара потребителю.

Таким образом, схема, приведенная на рисунке 3.1, включает две ступени утилизации теплоты стали:

1. Выработка насыщенного пара в СИО на стадии кристаллизации стали.
2. Нагрев воды, которая используется в качестве питательной воды в СИО, при воздушном охлаждении заготовок.

Удельная паропроизводительность составляет 0,20 – 0,25 т пара / т стали.

### 3.3 Использование теплоты шлака

Теплота шлака обусловлена температурой на выпуске 1450 - 1550 °С. Удельный выход шлака – 0,1 т шлака / т стали.

Известны несколько промышленных установок по использованию теплоты шлака, которые отличаются конструктивно, но включают две аналогичные технологические операции:

1. Воздушная грануляция шлака, сопровождаемая нагревом воздуха при грануляции до температуры ~ 900 °С.
2. Использование нагретого воздуха для выработки пара в котлах-утилизаторах.

На рисунке 3.2 показан один из вариантов установки для использования теплоты шлака.

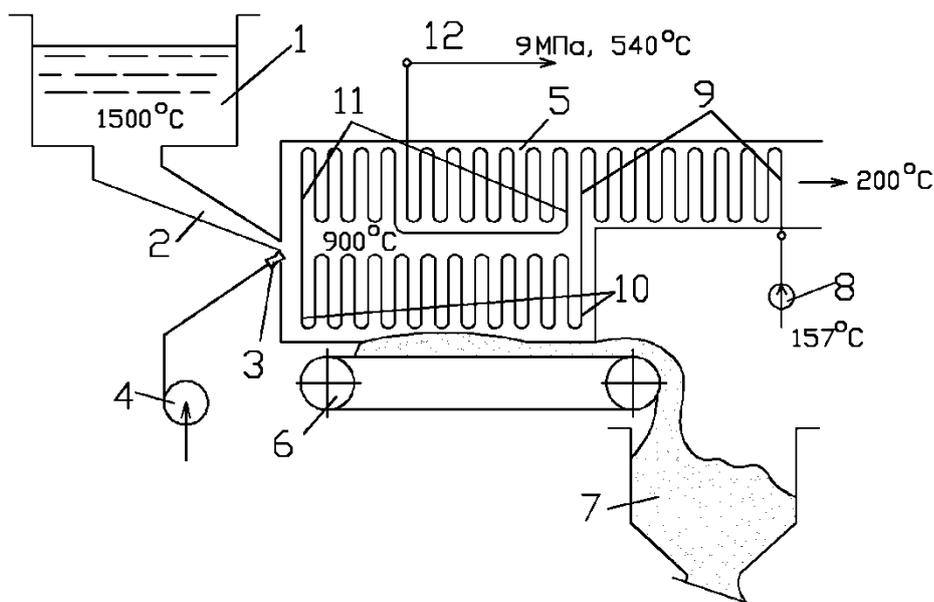


Рисунок 3.2. – Принципиальная схема установки для использования теплоты шлака (Япония)

Обозначения к рисунку 3.2:

- 1 – накопитель шлака;
- 2 – шлаковая летка;
- 3 – сопло для подачи воздуха на грануляцию шлака;
- 4 – воздуходувка;
- 5 – камера воздушной грануляции, в рабочем объеме которой размещены поверхности нагрева котла-утилизатора;
- 6 – транспортер;
- 7 – бункер для гранулированного шлака;
- 8 – питательный насос;
- 9 – экономайзер;
- 10 – испарительные поверхности нагрева;
- 11 – пароперегреватель;
- 12 – подача перегретого пара потребителю.

Особенность установки, схема которой приведена на рисунке 3.2, заключается в применении прямоточного котла-утилизатора.

Шлак самотеком поступает в зону воздушной струи от сопла 3. В потоке воздуха шлак диспергируется и гранулируется. В нижней части камеры 5 гранулированный шлак образует слой гранул, которые под действием транспортера 6 перемещаются в бункер гранулированного шлака 7.

Воздух, нагретый при грануляции до температур около 900 °С, передает теплоту поверхностям нагрева котла-утилизатора. В нижней части камеры 5, где шлак перемещается в слоевом режиме, передача теплоты поверхностям нагрева 10 происходит путем непосредственного контакта шлака с поверхностями нагрева.

Питательная вода поступает от деаэратора повышенного давления (0,6 МПа) с температурой 157°С, параметры получаемого пара: 9 МПа и 540°С.

Техническая характеристика установки для кислородно-конвертерного цеха производительностью 2,5 млн. т стали в год:

- производительность по гранулированному шлаку – 0,24 млн.т/год;
- удельный расход воздуха для грануляции – 1 м<sup>3</sup>/кг шлака;
- паропроизводительность – 8 т/ч;
- удельный выход пара – 0,1 т пара/т шлака.

### 3.4 Использование конвертерного газа

#### 3.4.1 Способы отвода конвертерного газа

Использование конвертерного газа зависит от способа отвода газа из конвертера. Возможны три способа: с полным дожиганием CO конвертерного газа, с частичным дожиганием и без дожигания.

Дожигание газа происходит за счет подсоса воздуха в зазор между горловиной конвертера и кессоном (см. рис. 3.3).

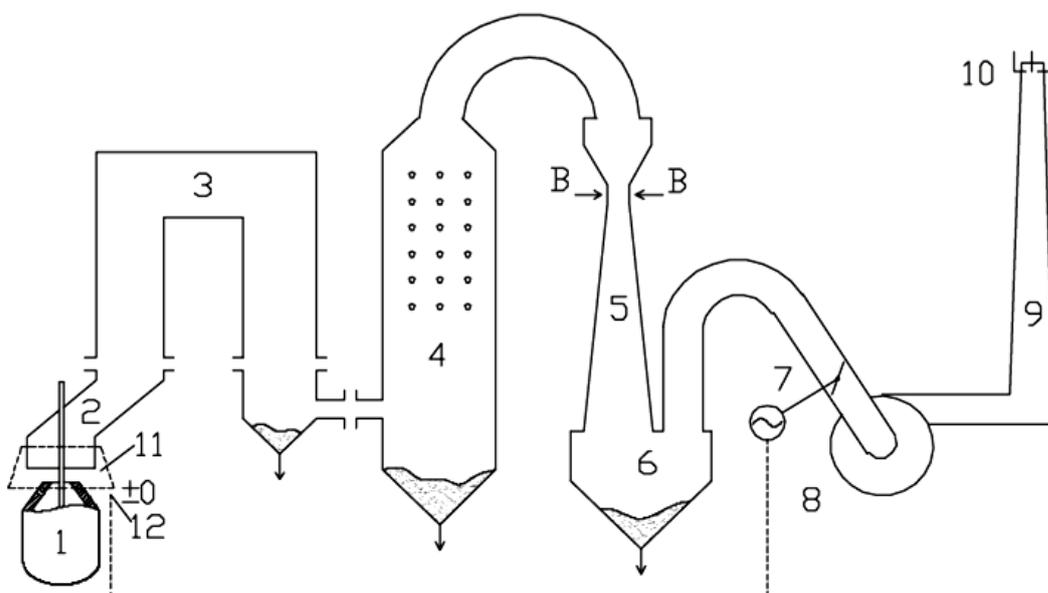
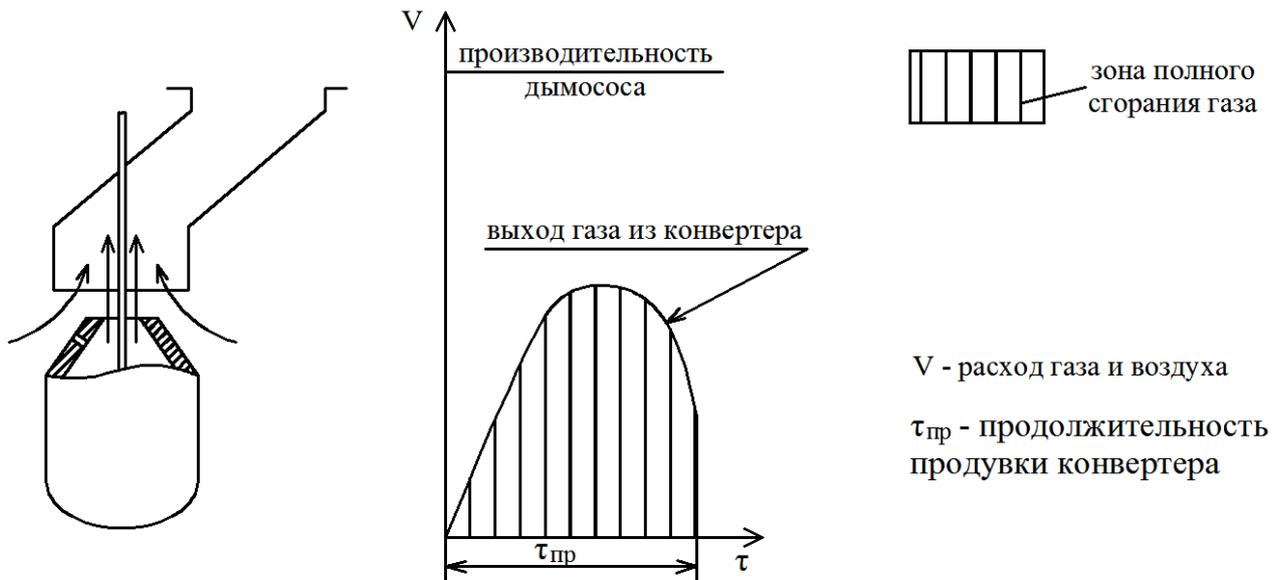


Рисунок 3.3. – Принципиальная схема газоотводящего тракта конвертера.

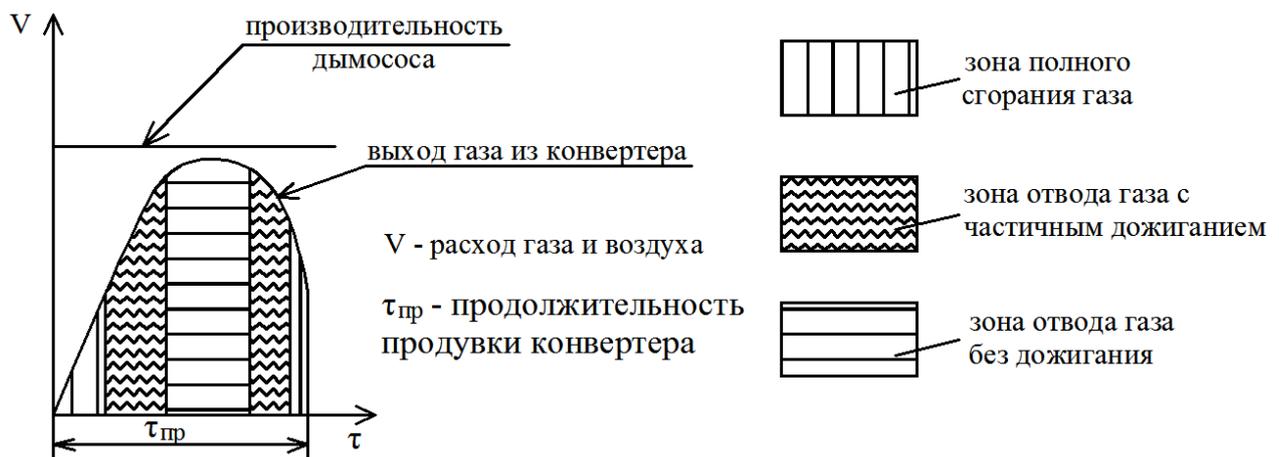
Обозначения к рисунку 3.3:

- 1 – конвертер;
- 2 – кессон;
- 3 – ОКГ;
- 4 – скруббер;
- 5 – труба Вентури (В – подача воды);
- 6 – влагоотделитель;
- 7 – клапан, регулирующий производительность дымососа;
- 8 – дымосос;
- 9 – дымовая труба;
- 10 – дожигающее устройство;
- 11 – уплотнитель зазора между горловиной конвертера и кессоном;
- 12 – датчик нулевого давления в зазоре между конвертером и кессоном, дающий импульс для регулирования производительности дымососа.

При отводе газа **с полным дожиганием** дымосос работает на производительности, значительно превышающей выход конверторного газа, а уплотнитель зазора между горловиной конвертера и кессоном отсутствует. Это обеспечивает, помимо отвода газа, подсос воздуха в зазор между горловиной конвертера и кессоном в количестве, достаточном для полного сжигания газа даже в момент максимального выхода газа. Коэффициент расхода воздуха при сжигании составляет до 1,5-2,5.



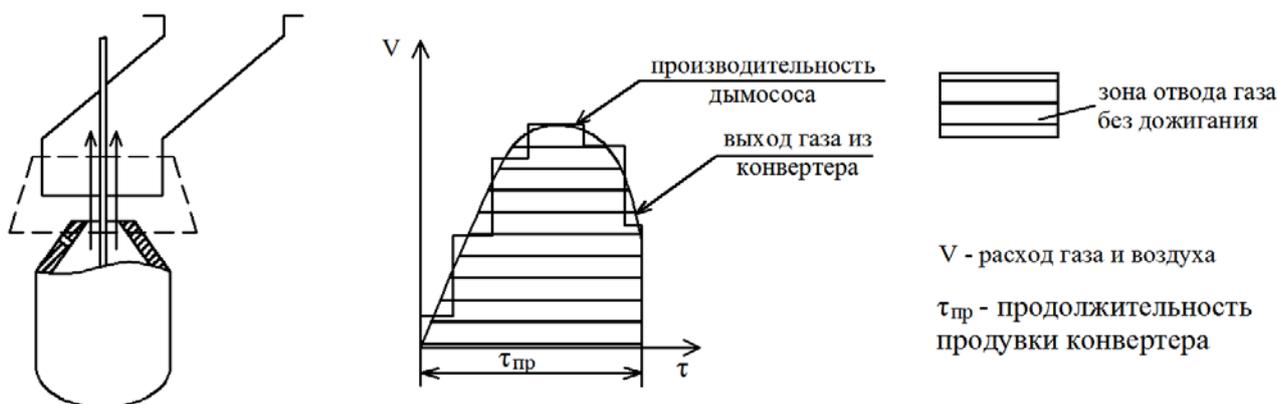
При отводе газа **с частичным дожиганием** дымосос работает на производительности, соответствующей максимальному выходу газа.



При этом в начале и в конце продувки газ полностью сгорает. В середине продувки дожигание газа незначительное. В промежутках газ сгорает частично. В среднем коэффициент расхода воздуха за продувку составляет около 0,6. Частичное сжигание газа дает в продуктах сгорания менее 25-30% CO. При такой концентрации CO насыщенный влагой конвертерный газ не дожигается в

дожигаемом устройстве дымовой трубы, что делает способ с частичным дожиганием крайне нежелательным с экологической точки зрения. Удельные выбросы CO в атмосферу составляют до 2-5 м<sup>3</sup>/т стали.

При отводе газа **без дожигания** газоотводящий тракт конвертера (см. рис. 3.3) оборудуют дополнительными устройствами: уплотнителем зазора 11 между горловиной конвертера и кессоном и датчиком нулевого давления 12;



Под уплотнитель зазора 11 подают для герметизации инертный газ. Избыточное давление в нижней части уплотнительного зазора поддерживают равным 0. В том случае, если давление становится положительным, производительность дымососа увеличивают, а при отрицательном давлении – уменьшают. В результате происходит ступенчатое регулирование производительности дымососа. Коэффициент расхода воздуха составляет до 0,05-0,10, что практически исключает дожигание газа вследствие подсоса воздуха в зазор между горловиной конвертера и кессоном. В том случае, если не предусмотрено использование химической энергии конвертерного газа, газ дожигают на дымовой трубе газоотводящего тракта.

В использовании конвертерного газа применяют в основном два направления: использование газа для производства пара и в качестве топлива.

### 3.4.2 Использование конвертерного газа для производства пара

При отводе газа с полным дожиганием производство пара происходит в ОКГ, которым оборудовано большинство газоотводящих трактов конвертеров. При этом используется как физическая, так и химическая теплота конвертерного газа.

При отводе газа без дожигания в ОКГ используется только физическая теплота газа. Для использования химической энергии газа котел-утилизатор размещают вне газоотводящего тракта конвертера. Проблема периодичности выхода газа может быть решена путем применения теплоаккумуляторов, например, в виде регенеративных теплообменников (см. рис. 3.4).

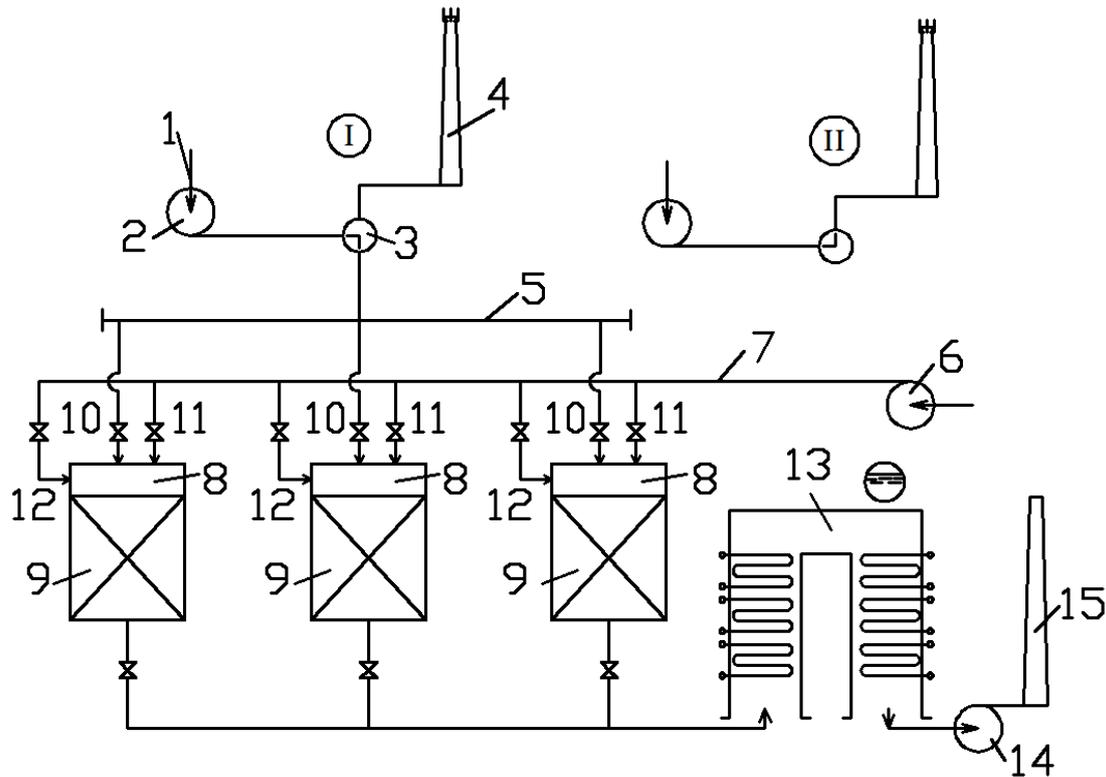


Рисунок 3.4. – Схема использования теплоты конвертерного газа для производства пара с применением регенеративных теплоаккумуляторов

Обозначения к рисунку 3.4:

- 1 – газоход от газоочистки;
- 2 – дымосос газоотводящего тракта конвертера;
- 3 – перекидной клапан;
- 4 – дымовая труба с дожигающим устройством (свеча);
- 5 – коллектор конвертерного газа;
- 6 – воздуходувка;
- 7 – воздушный коллектор;
- 8 – камера сгорания;
- 9 – насадка регенератора;
- 10 – подача конвертерного газа на сжигание;
- 11 – подача воздуха для сжигания конвертерного газа;
- 12 – подача воздуха на охлаждение насадки;

13 – котел-утилизатор;

14 и 15 – дымосос и дымовая труба теплоутилизационной установки.

Производство пара по схеме, представленной на рисунке 3.4, включает две стадии:

1. В период выхода газа из конвертера во время продувки очищенный и охлажденный газ, отводимый из конвертера без дожигания, сжигают в камерах сгорания 8. Продукты сгорания разогревают насадку регенератора, а остаток теплоты продуктов сгорания после регенераторов (остаточная температура продуктов сгорания 800-900 °С) используется в котле-утилизаторе для выработки пара.

2. В межпродувочный период перекидной клапан устанавливают в позицию II (см. рис. 3.4). Дымосос работает на пониженной производительности, а воздух, который просасывается через газоотводящий тракт, направляют на свечу.

Через насадки регенератора, поочередно, пропускают воздух от воздуходувки. Воздух нагревается до 800-900 °С и направляется в котел-утилизатор, где его теплота используется для выработки пара.

Таким образом достигается постоянная и непрерывная паропроизводительность котла-утилизатора.

Количество теплоаккумуляторов ( $n$ ) соответствует отношению:

$n = \tau_{\text{мп}}/\tau_{\text{пр}}$ , где  $\tau_{\text{мп}}$  – время межпродувочного периода;

$\tau_{\text{пр}}$  – время продувки.

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

Достоинства схемы: решение проблемы периодичности и возможность стабильной выработки пара энергетических параметров для привода турбогенераторов или турбовоздуходувок на ТЭЦ-ПВС.

Недостатки: большие капитальные затраты, связанные с применением громоздких регенеративных теплообменников.

### **3.4.3 Использование конвертерного газа в качестве топлива**

При использовании конвертерного газа в качестве топлива проблема периодичности выхода конвертерного газа может быть решена двумя способами:

**1.** Подача конвертерного газа в период его выхода из конвертера в сеть другого газа, например, доменного (см. рис. 3.5).

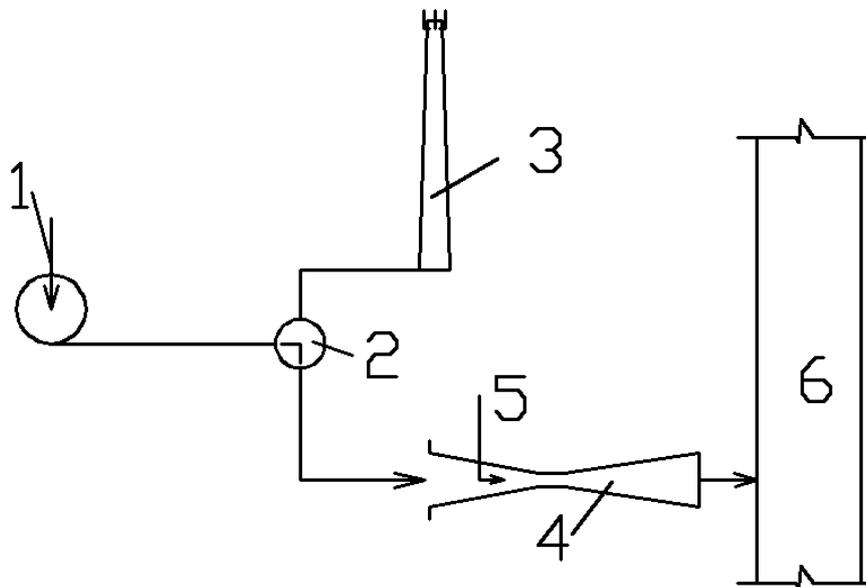


Рисунок 3.5. – Схема подачи конвертерного газа в сеть доменного газа

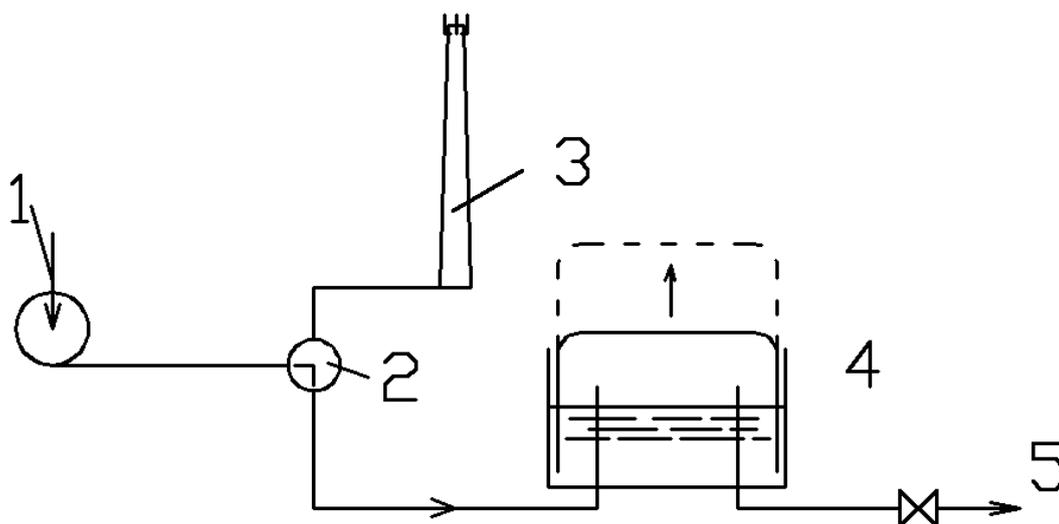
Обозначения к рисунку 3.5:

- 1 – газопровод от газоочистки;
- 2 – перекидной клапан;
- 3 – дымовая труба с дожигающим устройством (свеча);
- 4 – эжектор для эжекции конвертерного газа и повышения его давления;
- 5 – эжектирующий газ высокого давления, например, природный газ;
- 6 – газопровод доменного газа.

Подача конвертерного газа в газопровод доменного газа происходит во время выхода газа из конвертера. Предпочтение газопроводу доменного газа обусловлено большими объемами газопровода, а, следовательно, его высокой аккумулирующей способностью.

Недостаток схемы заключается в периодическом колебании давления и теплоты сгорания газа в газопровode доменного газа, что требует предусмотреть дополнительные устройства для стабилизации работы горелочных устройств потребителей топлива.

**2.** Подача конвертерного газа в период его выхода из конвертера в газгольдер (см. рис. 3.6).



1-3 – то же, что на предыдущем рисунке, 4 – газгольдер мокрого типа, 5 – подача конвертерного газа потребителю.

Рисунок 3.6. – Схема подачи конвертерного газа в газгольдер

Конвертерный газ поступает в газгольдер во время продувки конвертера. Расходуется газ из газгольдера как во время продувки, так и в межпродувочный период.

Достоинство схемы: возможность широкого диапазона использования конвертерного газа в качестве топлива.

Недостатки:

1. Большие капитальные затраты на сооружение газгольдеров. К схеме, представленной на рисунке 3.6, следует добавить устройство для доочистки конвертерного газа, нагнетатели для повышения давления газа и сложную систему автоматики, обеспечивающую надежность функционирования схемы.

2. Большие размеры газгольдеров, что требует, помимо больших капитальных затрат, большие производственные площади для размещения газгольдеров на территории предприятия. Диаметры газгольдеров для современных кислородно-конвертерных цехов составляют до 60-80 м.

3. Взрывоопасность газгольдеров, требующая создания вокруг газгольдеров охранной зоны, что занимает дополнительные производственные площади для размещения газгольдеров.

4. Недостаточная надежность работы газгольдеров мокрого типа при отрицательных температурах наружного воздуха, что характерно по климатическим условиям для всех предприятий Украины, располагающих кислородно-конвертерными цехами.

### 3.5 Использование теплоты охлаждения кессона

Кессон – первый по ходу конвертерного газа водоохлаждаемый участок газохода (см. рис. 3.3), воспринимающий действие наиболее высоких температур конвертерного газа, излучения из горловины конвертера и брызг расплава. Допустимая температура нагрева воды при охлаждении кессона не превышает 40 °С.

Использование теплоты охлаждающей воды при такой температуре возможно для выработки электроэнергии в паросиловых установках, работающих на низкокипящих жидкостях, например, фреонах (температура кипения до 30 °С).

Принципиальная схема одного из вариантов такой установки представлена на рисунке 3.7.

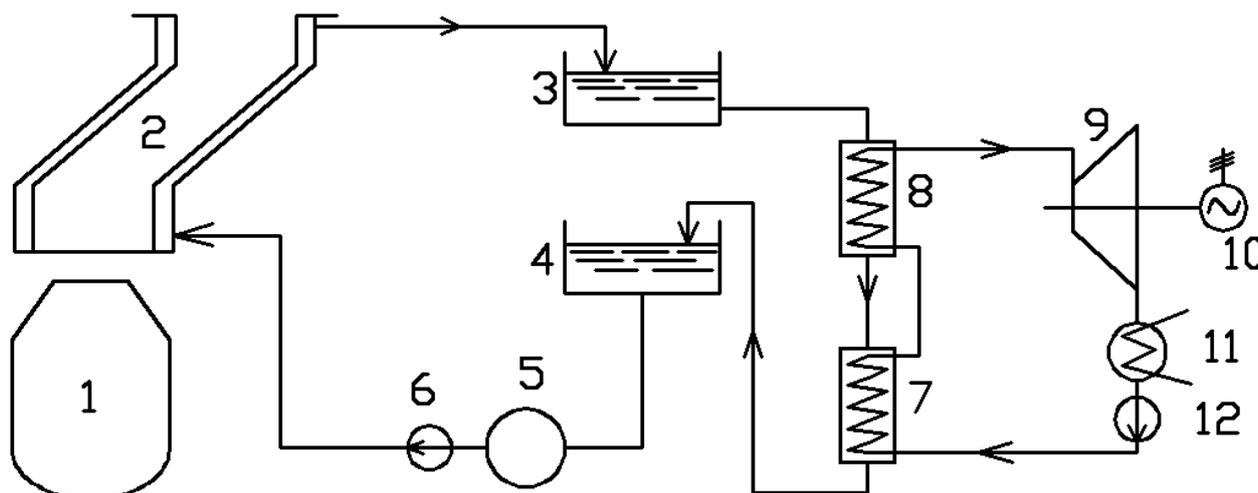


Рисунок 3.7. – Принципиальная схема использования теплоты охлаждения кессона в паросиловой установке (Япония)

Обозначения к рисунку 3.7:

- 1 – конвертер;
- 2 – кессон, оборудованный водоохлаждаемой рубашкой;
- 3 и 4 – верхний и нижний резервуары охлаждающей воды;
- 5 – охлаждающее устройство обратной системы;
- 6 – циркуляционный насос;
- 7 и 8 – нагреватель и испаритель фреона;
- 9 – фреоновая турбина;
- 10 – электрогенератор;
- 11 – конденсатор фреона;

12 – фреоновый насос.

В установке, представленной на рисунке 3.7, давление фреона, поступающего в турбогенератор, 0,46 МПа. Мощность турбогенератора – 2900 кВт.

Достоинства установки:

1. Невысокие температуры и давления обеспечивают надежность работы установки.

2. Возможность получения электроэнергии непосредственно в цехе и использование ее на собственные нужды цеха.

Недостатки:

1. Невысокая энергетическая эффективность теплоутилизационной установки (см. 1.7).

2. Негативное влияние фреона на экологию.

## 4 ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 4.1 Общая характеристика ВЭР прокатного производства

Основным источником ВЭР в прокатном производстве являются термические и нагревательные печи, в числе которых наиболее мощными являются методические нагревательные печи.

Ориентировочный тепловой баланс методической нагревательной печи:

<i>Приход теплоты</i>	<i>Расход теплоты</i>
Теплота сгорания топлива ( $Q_T \sim 85\%$ )	Теплота нагретого металла ( $Q_M \sim 30\%$ )
Теплота нагретого воздуха ( $Q_{НВ} \sim 12\%$ )	Теплота отходящих газов ( $Q_{Отх} \sim 45\%$ )
Теплота окисления (угара) металла ( $Q_{Уг} \sim 3\%$ )	Теплота охлаждения элементов конструкции печи ( $Q_{Охл} \sim 20\%$ )
	Потери теплоты в окружающую среду и прочие потери ( $Q_{Пот} \sim 5\%$ )
Всего 100%	Всего 100%

Из расходной части теплового баланса следует, что методическая печь является источником тепловых ВЭР (теплота отходящих газов и теплота охлаждения элементов конструкции печи), на долю которых приходится 65% расходной части теплового баланса.

## 4.2 Использование теплоты отходящих газов

Использование теплоты отходящих газов частично решается рекуперацией теплоты путем подогрева воздуха, идущего на горение газа в нагревательных печах. Остаток теплоты отходящих газов после рекуперации требует утилизации, которая обычно достигается выработкой энергопродукции: нагретой воды, пара или электроэнергии.

В этом направлении можно выделить три подхода:

**I.** Установка котлов-утилизаторов – водотрубных конвективных типа «КУ», пакетно-конвективных, газотрубных.

Обобщенная характеристика котлов-утилизаторов, устанавливаемых за нагревательными печами прокатных цехов:

- пропускная способность по отходящим газам  $V_{отх} = 16 \div 200$  тыс. м<sup>3</sup>/ч;
- температура отходящих газов  $t_{отх} = 650 \div 1250$  °С;
- параметры получаемого пара – давление  $p_p \leq 4,5$  МПа, температура перегретого пара  $t_{пп} \leq 450$  °С.

Котлы-утилизаторы размещают за нагревательными печами по индивидуальной или групповой схемам (см. рис. 4.1).

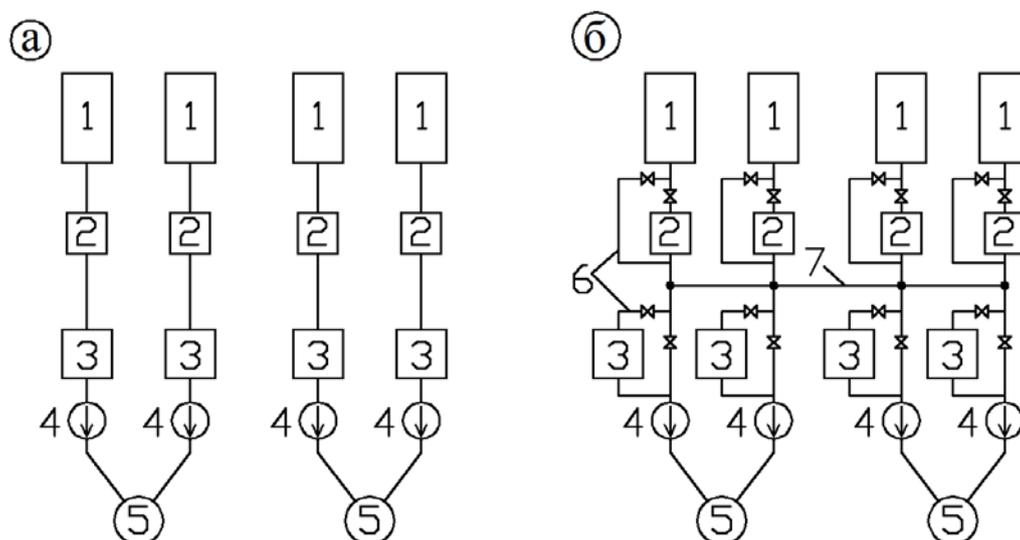


Рисунок 4.1. – Схемы размещения котлов-утилизаторов за нагревательными печами: а – индивидуальная схема, б – групповая

Обозначения к рисунку 4.1:

1 – нагревательная печь;

2 – рекуператор;

- 3 – котел-утилизатор;
- 4 – дымосос;
- 5 – дымовая труба;
- 6 – обводной газоход (байпас);
- 7 – коллекторный газоход.

Преимущество групповой (коллекторной) схемы: более высокая надежность работы тракта благодаря взаимозаменяемости участков тракта смежных печей и наличия обводных газоходов для рекуператоров и котлов-утилизаторов, что позволяет при необходимости отключить их из работы тракта.

Недостаток групповой схемы: усложнение тракта, увеличение капитальных затрат на сооружение тракта и усложнение эксплуатации тракта.

## II. Размещение встроенных водогрейных и испарительных пакетов (см. рис. 4.2).

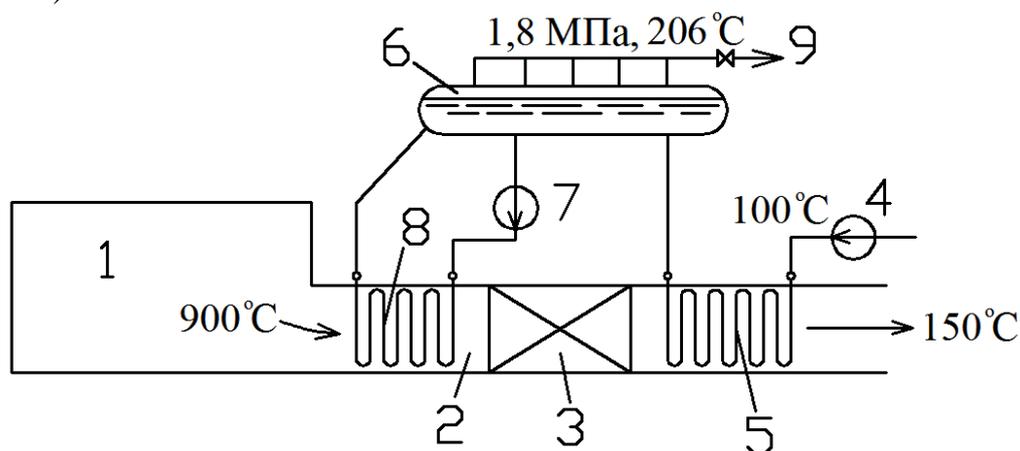


Рисунок 4.2. – Схема размещения водогрейных и испарительных пакетов

Обозначение к рисунку 4.2:

- 1 – нагревательная печь;
- 2 – газоход печи;
- 3 – рекуператор;
- 4 – питательный насос;
- 5 – водогрейный пакет, выполняющий функции экономайзера;
- 6 – барабан-сепаратор;
- 7 – циркуляционный насос;
- 8 – испарительный пакет (испарительные поверхности нагрева);

9 – выход насыщенного пара к потребителю или к центральному пароперегревателю.

Схема, представленная на рисунке 4.2, предполагает совместную работу испарительных и водогрейных пакетов, что позволяет рассматривать ее как альтернативу котлу-утилизатору.

Достоинства схемы:

1. Компактность размещения оборудования и невысокие капитальные затраты.

2. Защита рекуператора испарительным пакетом от резкого повышения температуры отходящих газов.

3. Достаточно высокая степень утилизации теплоты отходящих газов за счет водогрейных пакетов.

4. Возможность охлаждения отходящих газов перед дымососом, что облегчает работу дымососа.

### III. Применение встроенных газотурбинных установок (ВГТУ).

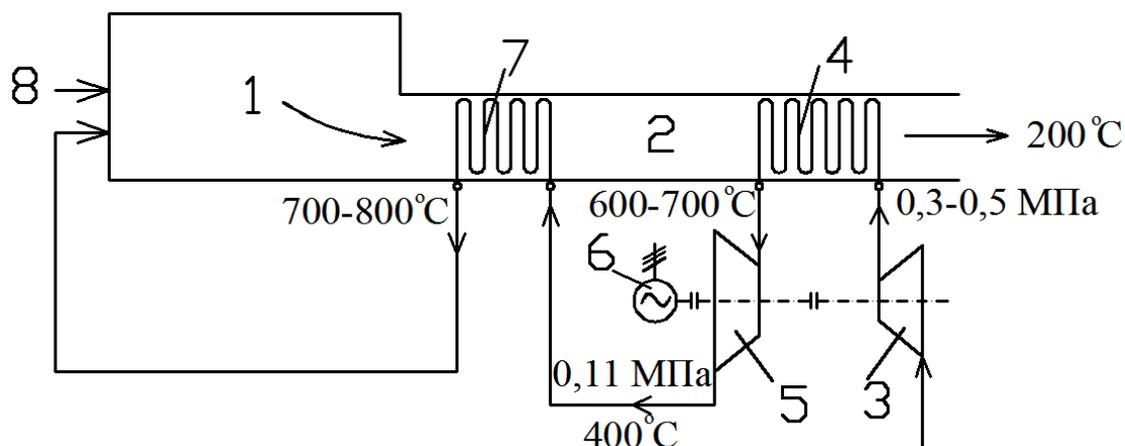


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема встроенной газотурбинной установки (ВГТУ)

Обозначения к рисунку 4.3:

1 – нагревательная печь;

2 – газоход печи;

3 – компрессор;

4 – рекуператор компремированного воздуха;

5 – газовая (воздушная) турбина;

6 – электрогенератор;

7 – высокотемпературный рекуператор

8 – подача топлива.

Достоинства: получение электроэнергии непосредственно в прокатном цехе и возможность использования ее для собственных нужд цеха.

Недостатки: невысокая доля теплоты отходящих газов, использованной непосредственно на выработку электроэнергии (до 12-15%), вследствие больших затрат энергии на привод компрессора.

### 4.3 Использование теплоты охлаждения элементов конструкции нагревательных печей

Основное количество теплоты при охлаждении конструкций методических печей приходится на подовые трубы (продольные, поперечные, опорные): около 90% теплоты, отводимой через систему охлаждения. Использование теплоты охлаждения достигается применением СИО, которая для методических нагревательных печей имеет следующие показатели:

- паропроизводительность  $D_{\text{СИО}} = 5 \div 60$  т/ч в зависимости от мощности печи;
- давление пара  $p_{\text{СИО}} = 1,2 \div 4,5$  МПа;
- удельный выход пара  $d_{\text{п}} = 0,10 \div 0,15$  т пара/ т нагреваемого металла.

Ценность пара СИО повышают путем перегрева пара в центральных пароперегревателях (см. рис. 4.4).

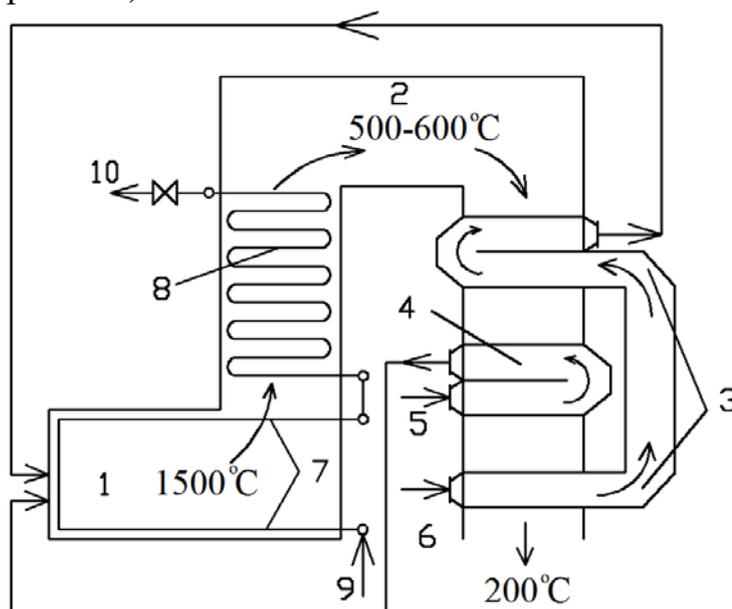


Рисунок 4.4. – Принципиальная схема центрального пароперегревателя

Обозначения к рисунку 4.4:

- 1 – топка центрального пароперегревателя;
- 2 – газоход центрального пароперегревателя;
- 3 – воздухонагреватель;
- 4 – газонагреватель;
- 5 и 6 – подача газа и воздуха;
- 7 – радиационная часть пароперегревателя, выполненная в виде экранов топки;
- 8 – конвективная часть пароперегревателя;
- 9 – подача насыщенного пара;
- 10 – выход перегретого пара потребителю.

Обозначение центральных пароперегревателей:

**ЦП-60-С-1,9**

**ЦП-60-С-4,5**

**ЦП** – центральный пароперегреватель;

**60** – паропроизводительность, т/ч;

**С** – серийный;

**1,9** и **4,5** – давление пара, МПа.

Техническая характеристика центральных пароперегревателей:

Наименование показателей	ЦП-60-С-1,9	ЦП-60-С-4,5
Температура пара на входе в пароперегреватель, °С	206	256
Температура перегретого пара, °С	370	450
Расход доменного газа, м <sup>3</sup> /ч	4600	6270
Температура подогретого воздуха, °С	285	330
Температура подогретого газа, °С	170	190

В центральных пароперегревателях, кроме пара СИО, нагревается также пар от котлов-утилизаторов, если в котлах получают насыщенный пар.

В качестве топлива в центральном пароперегревателе используется доменный газ, что делает центральный пароперегреватель комплексной установкой для использования ВЭР: перегревается утилизационный пар и используется для этого горючий ВЭР.

## 4.4 Комплексные теплоутилизационные установки

Следует выделить два варианта комплексных установок:

**I.** Комплексная установка СИО с водогрейными и испарительными пакетами (см. рис. 4.5).

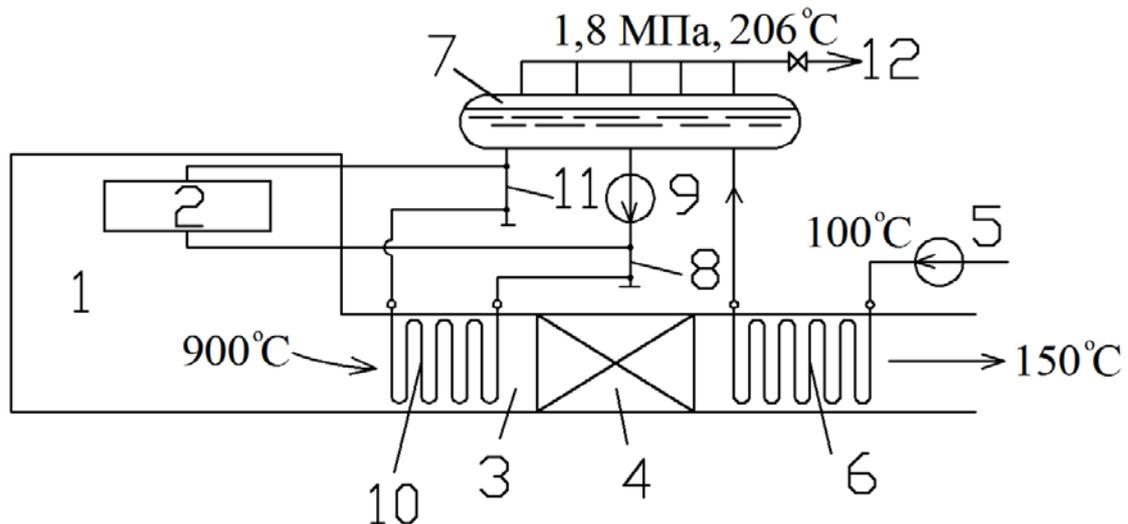


Рисунок 4.5. – Принципиальная схема комплексной установки СИО с водогрейными и испарительными пакетами

Обозначения к рисунку 4.5:

- 1 – нагревательная печь;
- 2 – охлаждаемый элемент печи, оборудованный СИО, например, рама окна по-сада или выдачи металла;
- 3 – газоход печи;
- 4 – рекуператор;
- 5 – питательный насос;
- 6 – водогрейный пакет, выполняющий функцию экономайзера;
- 7 – баран-сепаратор;
- 8 – опускной коллектор;
- 9 – циркуляционный насос;
- 10 – испарительный пакет;
- 11 – подъемный коллектор;
- 12 – подача пара в центральный пароперегреватель или к потребителю.

**II.** Комплексная установка СИО с котлом-утилизатором (см. рис. 4.6).

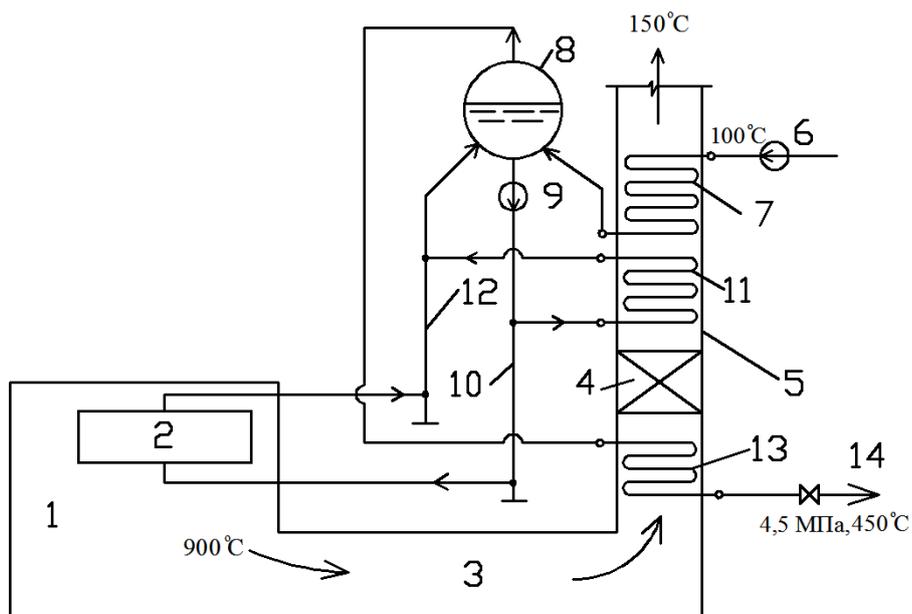


Рисунок 4.6. – Принципиальная схема комплексной установки СИО с котлом-утилизатором

Обозначения к рисунку 4.6:

- 1 – нагревательная печь;
- 2 – охлаждаемый элемент печи, оборудованный СИО;
- 3 – газоход печи;
- 4 – рекуператор;
- 5 – газоход котла-утилизатора;
- 6 – питательный насос;
- 7 – экономайзер;
- 8 – барабан-сепаратор
- 9 – циркуляционный насос;
- 10 – опускной коллектор;
- 11 – испарительные поверхности нагрева;
- 12 – подъемный коллектор;
- 13 – пароперегреватель;
- 14 – выход перегретого пара к потребителю.

В целом комплексные установки дают следующие преимущества по сравнению с индивидуальными:

- 1) экономия капитальных и эксплуатационных затрат за счет обобщения ряда оборудования (питательных насосов, барабанов-сепараторов, циркуляционных насосов, коллекторов и пр.).

- 2) компактность размещения теплоутилизационного оборудования;
- 3) повышение паропроизводительности и возможность перегрева пара.

#### 4.5 Теплоутилизационная электростанция (ТУЭС)

Источниками пара для ТУЭС может быть СИО, испарительные пакеты и котлы-утилизаторы, работающие в комплексе или индивидуально. На рисунке 4.7 показана схема ТУЭС с котлом-утилизатором.

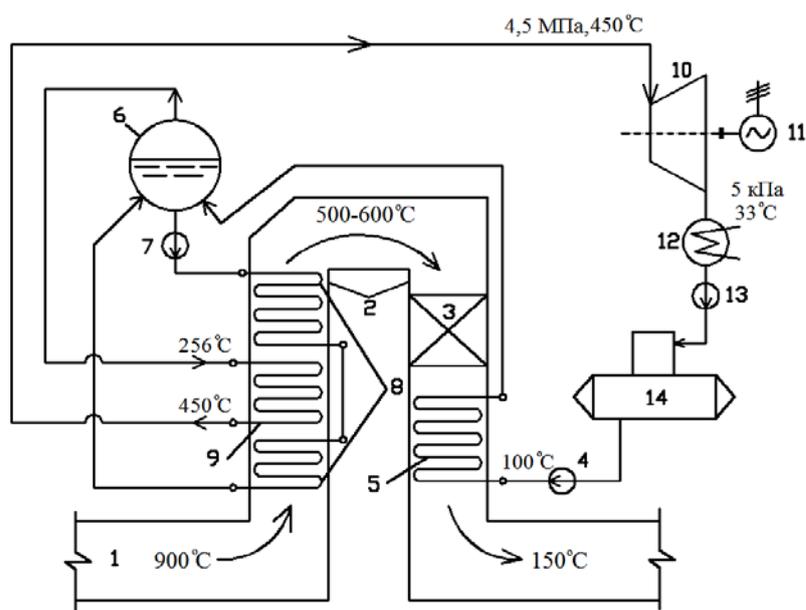


Рисунок 4.7. – Принципиальная схема теплоутилизационной электростанции (ТУЭС)

Обозначения к рисунку 4.7:

- 1 – газоход от нагревательной печи;
- 2 – газоход котла-утилизатора;
- 3 – рекуператор;
- 4 – питательный насос;
- 5 – экономайзер;
- 6 – барабан-сепаратор;
- 7 – циркуляционный насос;
- 8 – испарительные поверхности нагрева;
- 9 – пароперегреватель;
- 10 – паровая турбина;
- 11 – электрогенератор;

- 12 – конденсатор паровой турбины;
- 13 – конденсатный насос;
- 14 – деаэратор.

Возможность размещения ТУЭС в прокатном цехе вызывает интерес в связи с большим потреблением электроэнергии в цехе (привод прокатных станов, мостовых кранов и пр.). Размещению ТУЭС в прокатном цехе способствует стабильная и продолжительная работа нагревательных печей, т.е. наличие стабильного источника тепловых ВЭР.

## ЛИТЕРАТУРА

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. Семененко, 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. Гичев Ю.А. Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий. Часть I: Конспект лекций: Днепропетровск: НМетАУ, 2012. – 57 с.

Учебное издание

Гичёв Юрий Александрович

# **ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

## **Часть II**

Тем. план. 2012, поз. 310.

Подписано к печати 12.06.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типогр. Печать плоская. Уч.-изд. л. 3,17. Усл. печ. л. 3,13. Тираж 100экз. Заказ № .

Национальная металлургическая академия Украины  
49600, г.Днепропетровск-5, пр. Гагарина, 4

---

Редакционно-издательский отдел НМетАУ