

Промышленная теплоэнергетика

Утилизация теплоты отходящих
дымовых газов

Методы утилизации теплоты

Методы утилизации теплоты:

- С возвратом части теплоты, отобранного у дымовых газов, обратно в печь;
- Без возврата этого теплоты в печь.

Методы утилизации теплоты

Для осуществления первого метода необходимо теплоту, отобранную у дыма, передать идущим в печь газу и воздуху (или только воздуху). Для этого широко используют теплообменники рекуперативного и регенеративного типов, применение которых позволяет повысить к. п. д. печного агрегата, увеличить температуру горения и сэкономить топливо.

При втором методе утилизации теплота отходящих дымовых газов используется в теплосиловых котельных и турбинных установках, чем достигается существенная экономия топлива.

Методы утилизации теплоты

Часто оба метода утилизации теплоты используются одновременно. Это делается тогда, когда температура дымовых газов после теплообменников остается достаточно высокой и целесообразна дальнейшая утилизация теплоты в теплосиловых установках (Например, в котлах-утилизаторах).

Методы утилизации теплоты

Утилизация теплоты отходящих дымовых газов позволяет достичь экономии топлива, которая зависит от степени утилизации тепла дымовых газов:

$$R = I_v/I_d,$$

где I_v , I_d - соответственно энтальпия подогретого воздуха и отходящих из рабочего пространства дымовых газов, кВт, или кДж/период.

Степень утилизации теплоты может быть также названа к. п. д. рекуператора (регенератора):

$$\text{к.п.д.} = (I_v/I_d) 100\%.$$

Методы утилизации теплоты

Снижение расхода топлива в результате использования теплоты отходящих дымовых газов дает значительный экономический эффект и является одним из путей снижения затрат на нагрев металла в промышленных печах.

Кроме экономии топлива, применение подогрева воздуха (газа) сопровождается увеличением калориметрической температуры горения T_k , что может являться основной целью рекуперации при отоплении печей топливом с низкой теплотой сгорания.

Методы утилизации теплоты

Утилизация не может быть полной, т.е. всегда $R < 1$. Это объясняется тем, что увеличение поверхности нагрева рационально только до определенных пределов, после которых оно уже приводит к очень незначительному выигрышу в экономии тепла.

Характеристика теплообменных устройств

Утилизацию теплоты отходящих газов с возвратом их в печь можно осуществить в теплообменных устройствах регенеративного и рекуперативного типов.

Регенеративные теплообменники работают при нестационарном состоянии, рекуперативные — при стационарном.

Классификация теплообменников

В поверхностных теплообменниках в передаче теплоты участвует поверхность твердого тела.

В смесительных теплообменниках теплоносители непосредственно контактируют друг с другом.

Поверхностные теплообменники подразделяют на *рекуперативные* и *регенеративные*.

В рекуперативных теплообменниках теплота от одного носителя к другому передается через разделяющую их стенку.

В регенеративных теплообменниках вначале с горячим теплоносителем контактирует твердое тело, которое принимает от него теплоту, при этом нагреваясь, затем это тело вступает в контакт с холодным теплоносителем и отдает ему полученную теплоту.

Характеристика теплообменных устройств

Теплообменники регенеративного типа имеют следующие недостатки:

- 1) не могут обеспечить постоянную температуру подогрева воздуха или газа, которая падает по мере остывания кирпичей насадки;
- 2) прекращение питания печи теплом при перекидке клапанов;
- 3) при подогреве топлива имеет место вынос газа через дымовую трубу;
- 4) большие объем и масса регенераторов.

Характеристика теплообменных устройств

Несмотря на эти недостатки, рекуперативные теплообменники иногда еще применяют на высокотемпературных печах (мартеновских и доменных печах, в нагревательных колодцах). Это объясняется тем, что регенераторы могут работать при весьма высокой температуре дымовых газов (1500-1600 °С). При такой температуре рекуператоры работать устойчиво не могут.

Характеристика теплообменных устройств

Рекуперативный принцип утилизации тепла отходящих дымовых газов более прогрессивен и совершенен.

Достоинства рекуператоров:

- обеспечивают постоянную температуру подогрева воздуха или газа;
- не требуют никаких перекидных устройств;
- обеспечивается большая возможность для автоматизации и контроля тепловой работы печи;
- в рекуператорах отсутствует вынос газа в дымовую трубу;
- они меньшего объема и массы.

Недостатки:

- низкая огнестойкость (металлических рекуператоров);
- низкая газоплотность (керамических рекуператоров).

Характеристика теплообменных устройств

Регенератор представляет, собой камеру, заполненную многорядной решеткой (насадкой), выложенной из огнеупорных кирпичей. Сначала через регенератор пропускают дым, а затем в обратном направлении воздух или газообразное топливо. В этот период регенеративная насадка отдает воздуху (газу) ранее аккумулированное тепло.

Характеристика теплообменных устройств

Существует оптимальное в теплотехническом отношении время между перекидкой клапанов, т. е, между следующими друг за другом изменениями поступления газообразных сред.

У воздухонагревателей доменных печей длительность воздушного t_v и дымового t_d периодов связана следующим образом:

$$t_v = (t_d + t_n)/(n - 1),$$

где t_n - длительность перекидки клапанов; n — число воздухонагревателей на одну печь.

Характеристика теплообменных устройств

Для мартеновских и нагревательных печей $t_v = t_d$, причем и в том и другом случае продолжительность периодов лежит чаще всего в пределах от 5 до 15 мин и определяется особенностями работы регенеративной насадки в целом и каждого кирпича в отдельности.

В начале дымового периода температура насадки относительно мала и перепад температур между дымовыми газом и кирпичами насадки значительный. Постепенно насадка нагревается, перепад температур уменьшается и наступает такой момент, когда необходима перекидка клапанов. К этому времени насадка настолько нагревается, что температура ее может находиться на пределе стойкости кирпича.

Характеристика теплообменных устройств

Изменение температуры подогрева воздуха (газа) вызвано постепенным охлаждением насадки в течение воздушного (газового) периода.
Наиболее высокая температура подогрева воздуха наблюдается в начале воздушного периода, когда температура насадки максимальна.

Характеристика теплообменных устройств

Кирпич аккумулирует тепло дымовых газов и передает его нагреваемому воздуху, выполняя тем самым роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом.

В течение дымового периода температура поверхности кирпича интенсивно повышается, а температура центра сначала даже несколько понижается, а затем начинает расти.

К концу воздушного периода температура поверхности кирпича становится ниже температуры его центра. При этом наблюдается отток тепла от середины к поверхности кирпича.

В начале дымового периода процесс передачи тепла от центра к поверхности также имеет место до тех пор, пока температура поверхности кирпича не превзойдет температуру центра.

Характеристика теплообменных устройств

Количество тепла, которое кирпич аккумулирует в дымовой период, равно количеству тепла, которое он отдает воздуху в воздушный период.

Внутренние слои кирпича претерпевают значительно меньшие температурные колебания, чем наружные. Поэтому масса кирпича, с точки зрения его аккумулирующей и теплоотдающей способности, работает неодинаково.

Характеристика теплообменных устройств

К насадке предъявляют следующие требования, определяющие ее экономичность и эксплуатационные качества:

- высокий общий коэффициент теплопередачи;
- минимальное аэродинамическое сопротивление;
- максимальная удельная поверхность нагрева;
- минимальная опасность засорения;
- необходимая строительная устойчивость.

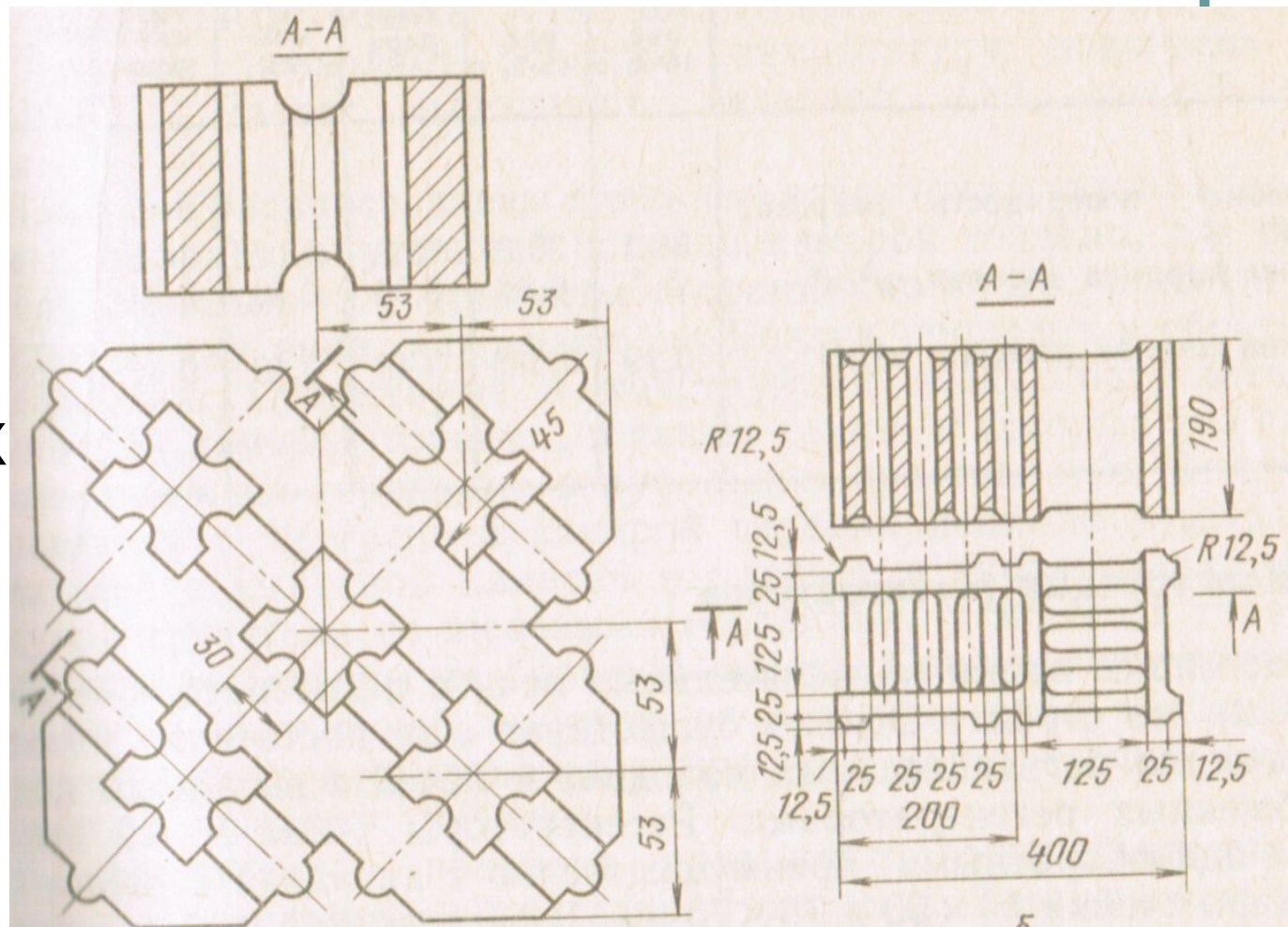
Характеристика теплообменных устройств

Материал, из которого выполняют насадку, должен характеризоваться:

- соответствующей огнеупорностью,
- термостойкостью,
- обладать определенным сопротивлением деформации под нагрузкой при повышенных температурах.

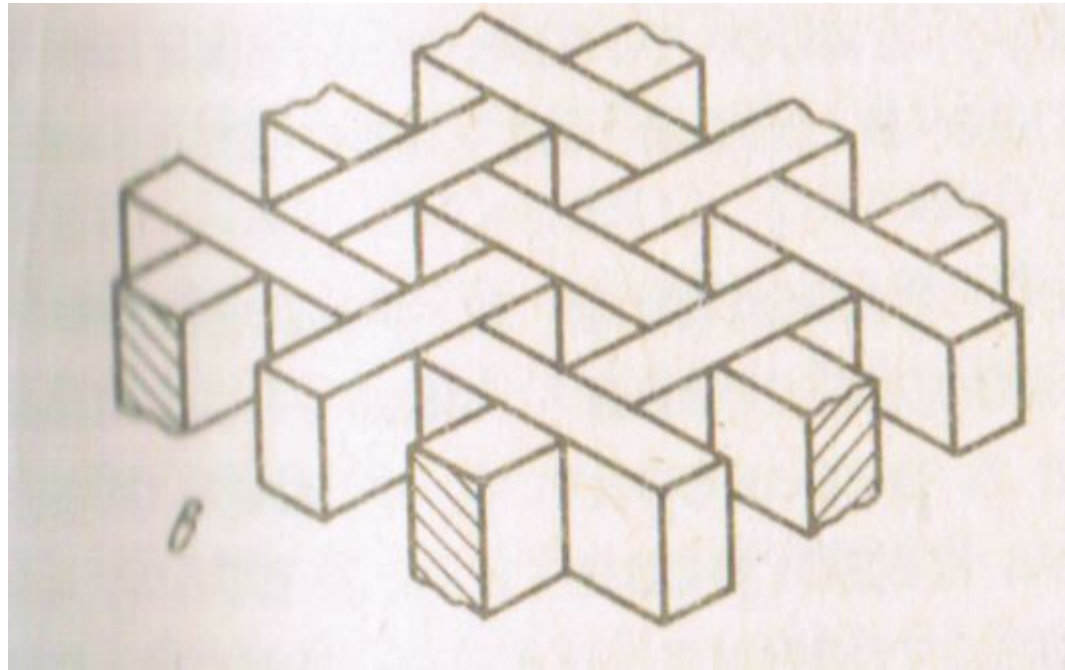
Характеристика теплообменных устройств

Блочная насадка для доменных воздухонагревателей



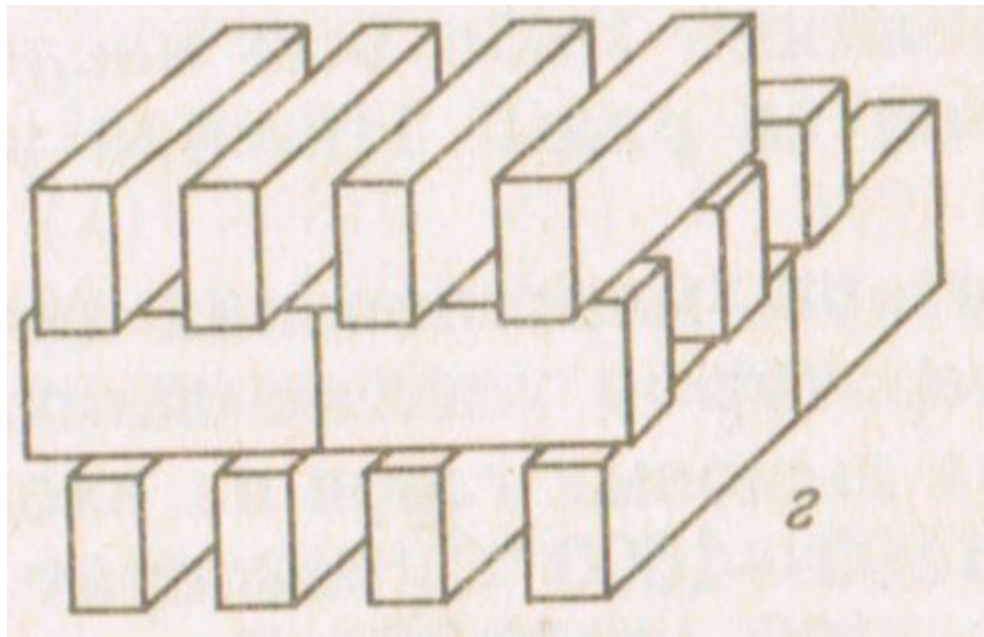
Характеристика теплообменных устройств

Насадка Каупера



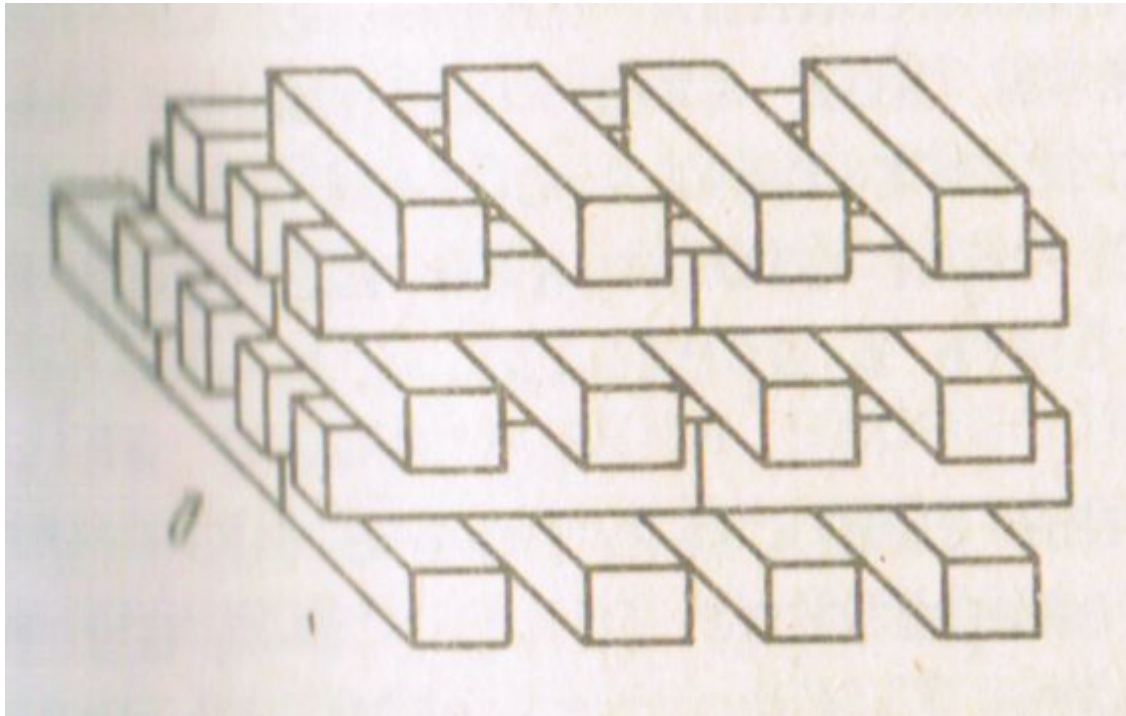
Характеристика теплообменных устройств

Насадка Сименса



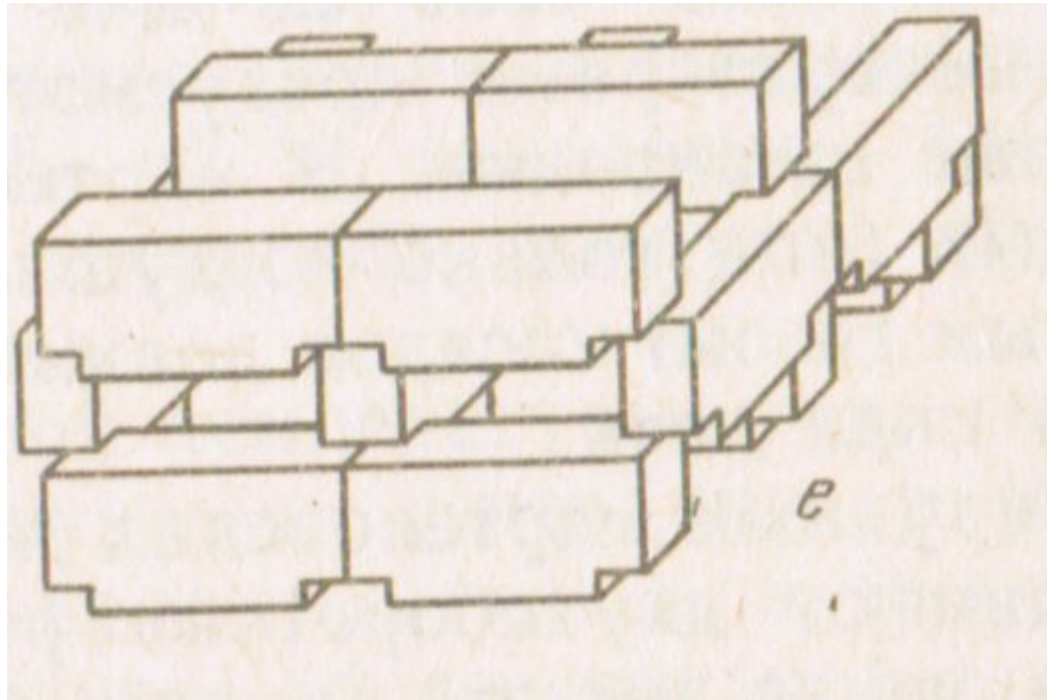
Характеристика теплообменных устройств

Брусковая насадка



Характеристика теплообменных устройств

Насадка Петерсона



Характеристика теплообменных устройств

Рекуперативные теплообменники

Рекуператор работает в стационарном режиме.

Теплота передается от остывающих дымовых газов к нагреваемому воздуху (газу) через разделительную стенку. На дымовой стороне рекуператора теплота от дымовых газов к стенке передается конвекцией и излучением. Внутри стенки теплота передается теплопроводностью. На противоположной стороне стенки теплота к воздуху передается только конвекцией, а при нагреве газа – конвекцией и излучением.

Характеристика теплообменных устройств

К конструкциям рекуператоров предъявляют следующие требования:

- обеспечение максимальной степени утилизации теплоты дымовых газов;
- достаточная стойкость против воздействия дымовых газов с высокой температурой;
- максимальная компактность, т. е. высокая удельная поверхность нагрева на 1 м³ рекуперативной насадки;
- наивысший суммарный коэффициент теплопередачи, что также способствует достижению компактности рекуператора;
- наименьшее гидравлическое сопротивление;
- Достаточная герметичность.

Характеристика теплообменных устройств

Рекуператоры выполняют из металла и керамических материалов.

Преимущества металлических рекуператоров по сравнению с керамическими:

- более высокий коэффициент теплопередачи и большая удельная поверхность нагрева; это обеспечивает лучшую компактность металлических рекуператоров и, следовательно, меньший объем при одинаковой общей поверхности нагрева;
- нет необходимости в глубоких подземных боровах, можно размещать рекуператоры над печами;
- повышенная герметичность.

Недостатком металлических рекуператоров является их малая стойкость против воздействия высоких температур.

Характеристика теплообменных устройств

Керамические рекуператоры более громоздки, характеризуются меньшим коэффициентом теплопередачи и меньшей удельной поверхностью нагрева. Они мало герметичны и совершенно непригодны для подогрева газа. Размещают керамические рекуператоры только под печами, они занимают много места и требуют устройства подземных боровов.

Однако керамические рекуператоры могут устойчиво работать при температуре дымовых газов $1200-1350^{\circ}\text{C}$, в них обеспечивается подогрев воздуха до $800-850^{\circ}\text{C}$, что позволяет применять их на высокотемпературных печах.

Характеристика теплообменных устройств

Металлические рекуператоры

Металл рекуператоров работает в условиях высоких температур при окисляющем действии дымовых газов. Стойкость металла определяет работоспособность рекуператора.

Для изготовления рекуператоров применяют обыкновенные углеродистые стали, легированные стали и чугуны.

Углеродистые стали могут работать при температуре стенки 450-500°С и обеспечивают подогрев воздуха до 250-300°С, а серые чугуны – при температуре стенки 500-550°С. Температура дымовых газов на входе в рекуператор не должна превышать 700-750°С.

Характеристика теплообменных устройств

В металлургии применяют:

- конвективные,
- радиационные,
- комбинированные конвективно-радиационные металлические рекуператоры.

Конвективные металлические рекуператоры могут быть игольчатые (иглы служат для увеличения поверхности теплообмена) и трубчатые.

Наибольшее распространение получили трубчатые сварные рекуператоры, т.к. игольчатые не обеспечивают должной герметичности.

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Энергетическое хозяйство металлургического предприятия предназначено для выработки и распределения энергии или энергоносителей разных видов. К основным энергетическим объектам предприятия относятся:

- тепловая электрическая станция (ТЭЦ);
- паро-воздуходувная станция (ПВС);
- кислородный цех;
- теплосилового цех;
- цех тепловых и газовых сетей и др.

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Кроме электроэнергии на предприятии вырабатываются энергоносители:

- пар и горячая вода,
- сжатый воздух,
- кислород.

Теплоэнергетическое оборудование или теплосиловые устройства состоят из:

- парогенераторов,
- паровых и газовых турбин,
- турбокомпрессоров,
- воздуходувок и т. д.

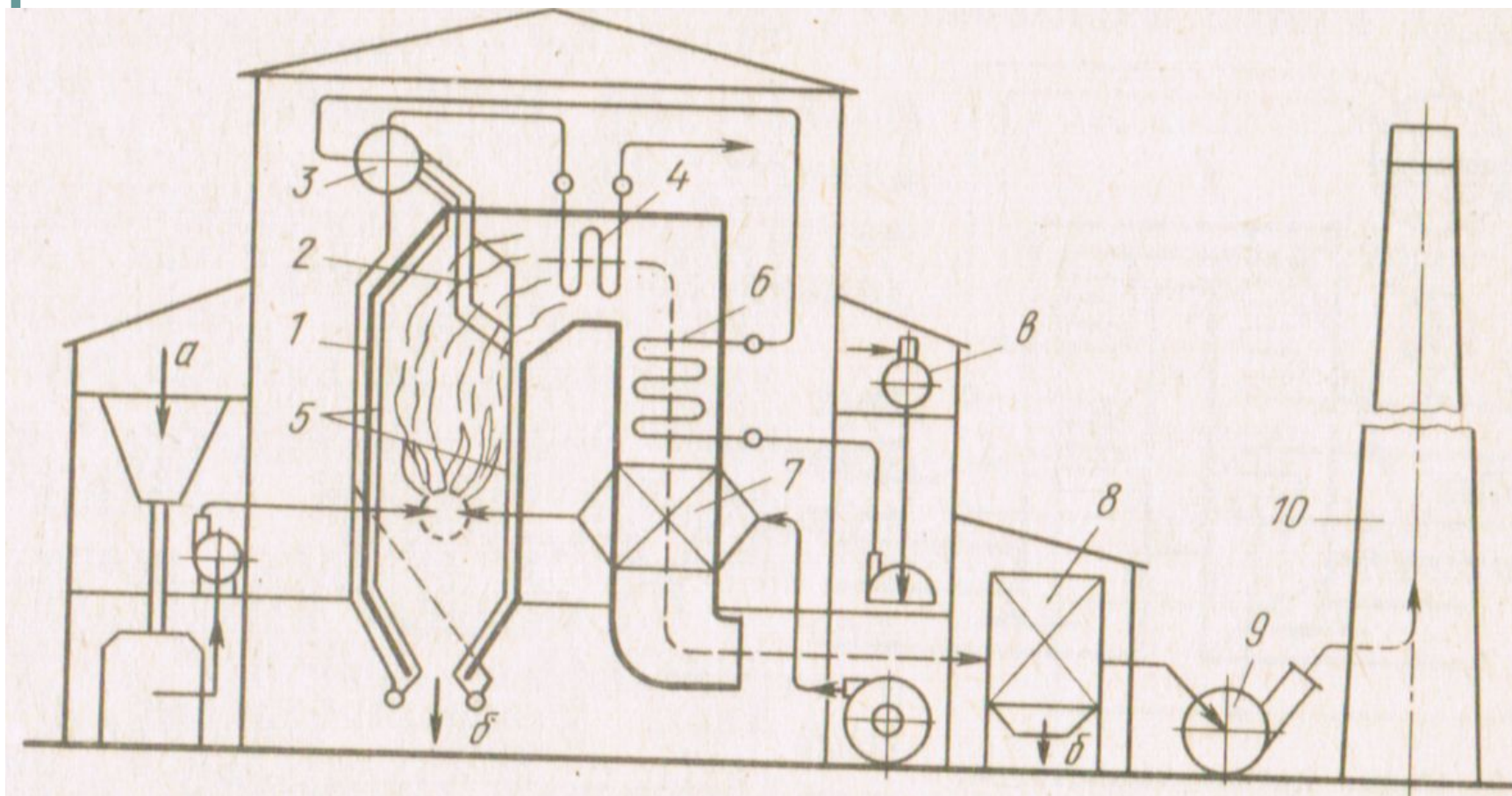
На производство энергоносителей затрачивается более 13% от всей потребляемой заводом энергии.

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ УСТРОЙСТВА

К парогенераторам относятся:

- энергетические котельные агрегаты, расположенные на ТЭЦ,
- котлы-утилизаторы (КУ),
- системы испарительного охлаждения (ИО), размещенные вблизи металлургических печей.

Котельные агрегаты ТЭЦ



Котельные агрегаты ТЭЦ

а – подача топлива, б – удаление золы и шлака, в – химическая очистка.

1 – обмуровка котла,

2 – трубы конвективной поверхности,

3 – барабан,

4 – пароперегреватель,

5 – экранные трубы,

6 – водяной экономайзер,

7 – воздухоподогреватель,

8 – золоуловитель,

9 – дымосос,

10 – дымовая труба

Котельные агрегаты ТЭЦ

Энергетический котельный агрегат предназначен для выработки перегретого водяного пара энергетических параметров давлением от 1,4 до 14 МПа с температурой 420-560 °С.

Работу парового котла обеспечивают:

- системы топливоприготовления и топливоподачи,
- устройства для сжигания топлива,
- системы шлако- и золоудаления,
- системы химводоочистки,
- системы КИП и автоматики

Котельные агрегаты ТЭЦ

Воздух, необходимый для сжигания топлива, подогревается в воздухоподогревателе — в трубчатом или регенеративном теплообменнике.

Эффективность преобразования энергии топлива в энергию пара в котле характеризует коэффициент полезного действия котельного агрегата, который определяют как отношение полезно затраченной теплоты ко всей, выделенной при сжигании топлива.

Для современных крупных котельных агрегатов к.п.д. составляет 80-90%. Паропроизводительность достигает 420 т/ч при давлении 14 МПа.

Котельные агрегаты ТЭЦ

Котлы отапливают пылевидным угольным, газовым и жидким топливом. На ТЭЦ металлургических предприятий, правило, отопление комбинированное, а котельные агрегаты оборудованы устройствами для сжигания 2-3 видов топлива.

Котельные агрегаты ТЭЦ

Расчет теплообмена в котельном агрегате дает возможность определить величину поверхностей нагрева H при заданной паропроизводительности D или наоборот, для выбранного типа котла с поверхностью нагрева H уточнить его паропроизводительность D .

В основе расчетов лежат *уравнения теплового баланса*.

Котельные агрегаты ТЭЦ

Движение продуктов сгорания в газоходах котельного агрегата обеспечивается дымососом, установленным за золоуловителем перед дымовой трубой. Тип золоуловителя, как правило, зависит от вида сжигаемого топлива — центробежный скруббер, батарейный циклон или электрофильтр.

Котельные агрегаты ТЭЦ

Выбор типа и режима работы дымососа осуществляют на основе аэродинамического расчета котельного агрегата.

При конструировании или реконструкции котла выполняют также расчет и оценку надежности циркуляции.

Циркуляция в пароводяном контуре котла может быть организована по естественному или принудительному принципу. В первом случае движение внутри труб вызывается разностью плотностей воды и пароводяной смеси, во втором - напором, создаваемым циркуляционным насосом.

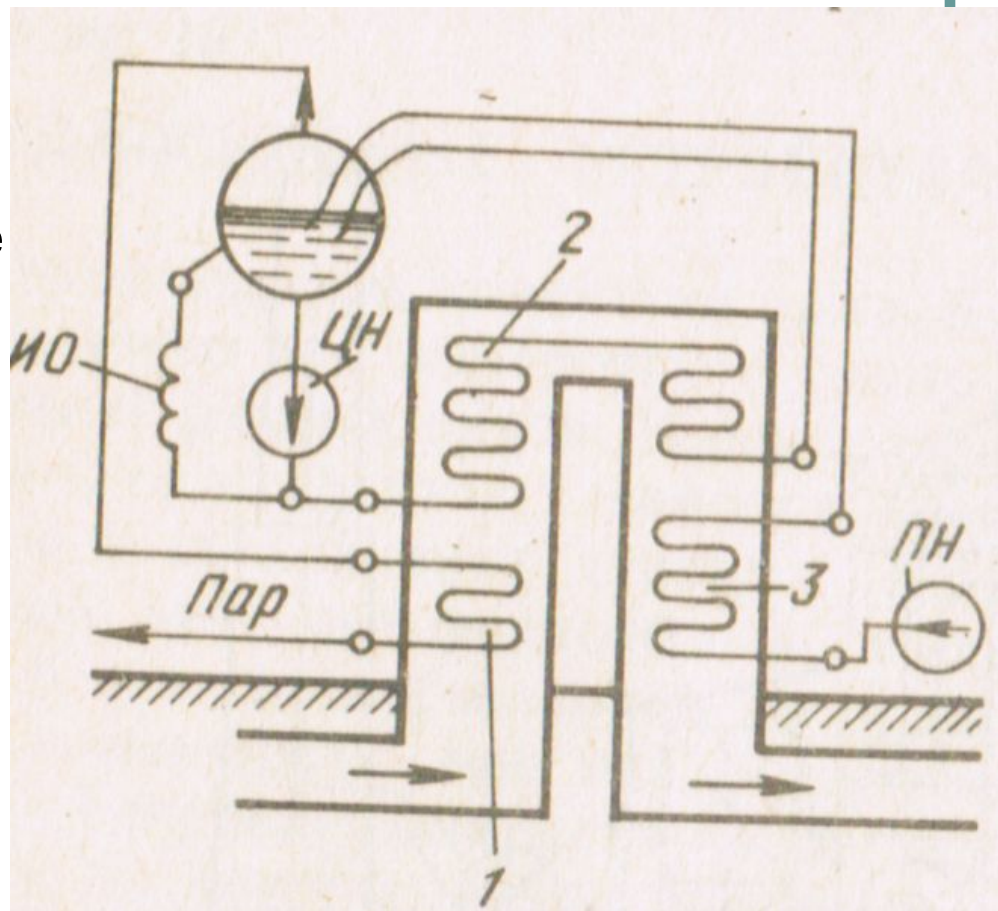
Котлы-утилизаторы

В отличие от энергетических котельных агрегатов в котлах-утилизаторах (КУ) вместо теплоты от сжигания топлива используется физическая теплота отходящих газов промышленных печей. Основная задача КУ — снизить температуру выбрасываемых в атмосферу газов и тем самым повысить к. п. д. печи.

Котлы-утилизаторы

Схема котла-утилизатора.

1 – пароперегреватель;
2 - трубчатые испарительные поверхности нагрева;
3 - водяной экономайзер;
ЦН, ПН – циркуляционный и питательный насосы;
ИО – контур испарительного охлаждения.



Котлы-утилизаторы

1 – пароперегреватель; 2 - трубчатые испарительные поверхности нагрева; 3 - водяной экономайзер; ЦН, ПН – циркуляционный и питательный насосы; ИО – контур испарительного охлаждения.

В некоторых типах КУ для низкотемпературных газов пароперегреватель отсутствует.

Для работы при высоких температурах (1000-1200 °С) на входе предусматривают радиационную камеру, за которой размещают пароперегреватель, а далее конвективные испарительные поверхности.

Котлы-утилизаторы

На металлургических предприятиях в основном применяют унифицированные агрегаты с принудительной циркуляцией пароводяной смеси типа КУ-125, КУ-10-1, КУ-80-3. Первая цифра в маркировке означает максимальный расход газов через котел в тыс. м³/ч. Допустимые температуры газа на входе 650-850 °С, давление пара $p = 1,8-4,5$ МПа. Паропроизводительность достигает 30-41 т/ч.

Котлы-утилизаторы

Расчеты (тепловой, аэродинамический) котлов-утилизаторов выполняют по тем же нормам, как и энергетических котлов. При этом удельные показатели относят не к 1 м³ или 1 кг сжигаемого топлива, а к 1 м³ отходящих газов, поступающих в котел-утилизатор.

Турбинные установки

Паротурбинные установки

Основным элементом турбинных установок является турбина - двигатель с непрерывным рабочим процессом. Энергия рабочего тела (пара, газа или воды) на лопатках, рабочего колеса турбины непрерывно преобразуется в механическую. Механическая энергия, полученная колесом, определяется разностью кинематических энергий рабочего тела на входе в канал, образованный соседними лопатками колеса турбины, и выходе из него. В паровых турбинах для создания высокой скорости на входе в канал применяют сопла, в которых потенциальная энергия пара частично или полностью преобразуется в кинетическую.

Турбинные установки

В конструкциях паровых турбин применяют такие ступени, в которых процесс превращения перепада давления в скорость не заканчивается полностью в сопле, а частично продолжается, и в лопаточном канале, где благодаря изменению скорости, возникает реактивный эффект, повышающий окружную скорость колеса. Отношение теплоперепада на лопатках H_l к теплоперепаду всей ступени H_a называется степенью реакции ρ . Паровые турбины, у которых $\rho \leq 0,15$, называют активными, а при условии $0,4 \leq \rho$ реактивными.

Турбинные установки

Современные паровые турбины выполняют многоступенчатыми и комбинированными с использованием как активных, так и реактивных ступеней.

Одним из основных элементов турбинных установок является конденсатор — трубчатый теплообменник, в котором за счет интенсивного охлаждения водой происходит конденсация отработавшего в турбине пара. При конденсации рабочего тела происходит уменьшение в сотни тысяч раз его объема, т.е. падение давления. Чем ниже давление в конденсаторе, тем больше теплорепад, а значит, и мощность, развиваемая турбиной. Глубина разрежения (или вакуума в конденсаторе) определяется начальной температурой охлаждающей воды и кратностью охлаждения.

Кратность охлаждения это - количество охлаждающей воды, необходимой для конденсации 1 кг пара. Обычно

$$m = 50 - 70$$

Турбинные установки

Как правило, охлаждающая конденсатор вода циркулирует в замкнутом контуре, который включает специальные охладители — градирни, или брызгальные бассейны. Конденсат, образующийся в межтрубном пространстве конденсатора, с помощью насосов подается в трубопровод питательной воды котельной установки. Скрытая теплота парообразования, уносимая охлаждающей водой, теряется безвозвратно.

Турбинные установки

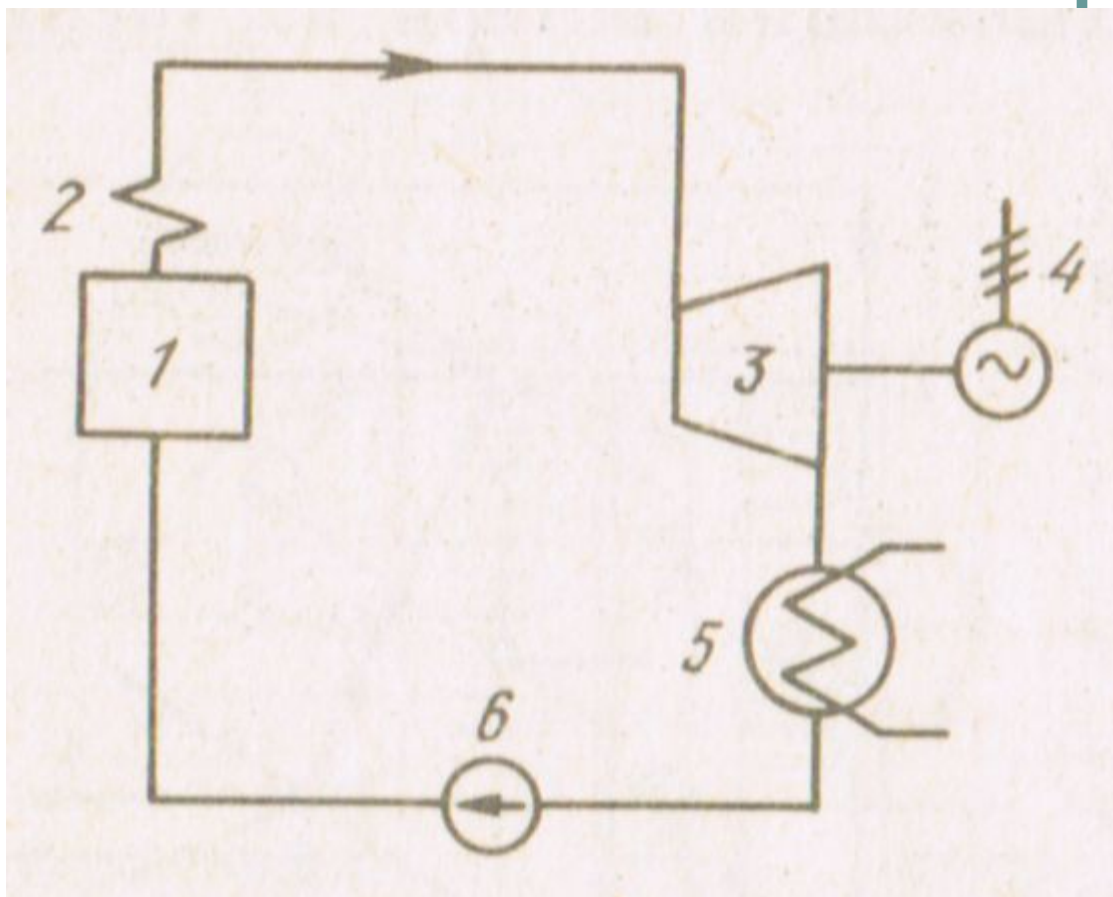
Паротурбинные или паросиловые установки, у которых весь пар проходит через конденсатор, называются конденсационными. Они предназначены для выработки электроэнергии. Их к.п.д. порядка 29— 39 % .

Конденсационные турбины устанавливают, как правило, на крупных электростанциях. Они предназначены для выработки электроэнергии.

Турбинные установки

Паросиловая установка с конденсационной турбиной:

- 1 – котел,
- 2 – пароперегреватель,
- 3 – турбина,
- 4 – электрогенератор,
- 5- конденсатор пара,
- 6 -насос



Турбинные установки

На ТЭЦ металлургических предприятий наибольшее распространение получили схемы с *комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии и регенеративным подогревом питательной воды.*

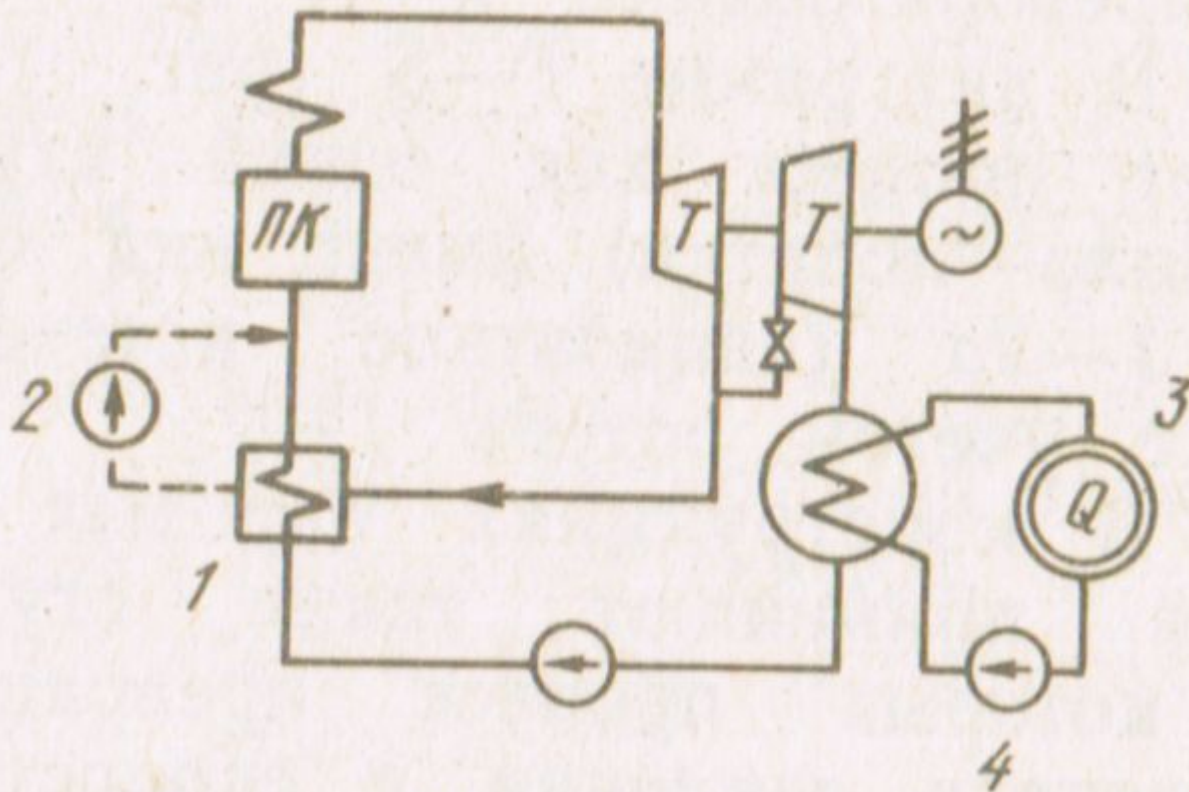
На таких станциях применяют турбины с производственными и теплофикационными отборами пара соответственно при давлении отбора 0,60-1,30 МПа и температуре 480-570 °С. Они являются приводом электрогенераторов мощностью 17 и 22 МВт.

Производственный отбор пара часто используется параллельно или совместно с паром других утилизационных установок.

Турбинные установки

Схема турбины с нерегулируемым отбором пара для подогрева питательной и нагрева сетевой воды:

1 – подогреватель питательной воды,
2 – конденсационный насос,
3 – потребитель горячей воды,
4 – сетевой насос,
ПК – паровой котел,
Т - турбина



Турбинные установки

Применение таких тепловых схем особенно целесообразно на станциях где, котельные агрегаты работают с высоким подогревом воздуха.

Регенеративный подогрев воды позволяет уменьшить поверхность водяного экономайзера котла и тем самым поднять температуру газов, поступающих в воздухоподогреватель.

Комбинированная выработка электрической и тепловой энергии более выгодна.