

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.

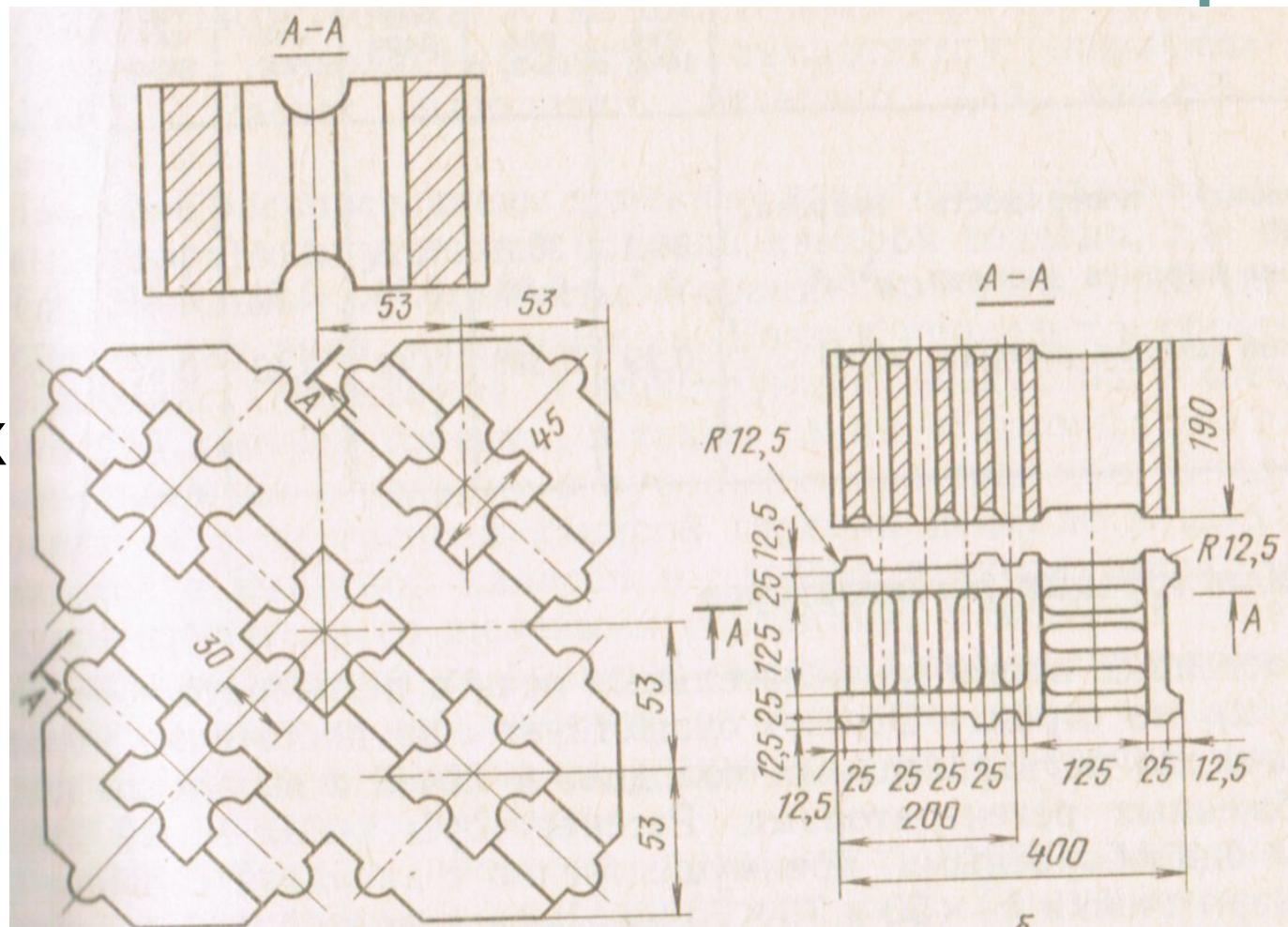
Характеристика теплообменных устройств

Материал, из которого выполняют насадку, должен характеризоваться:

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

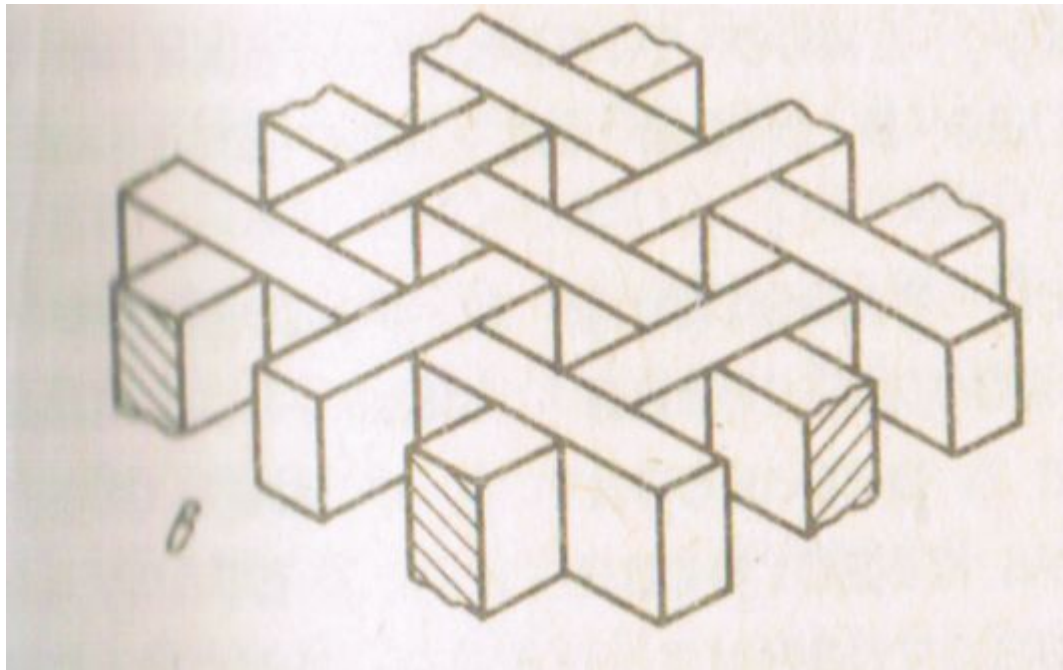
Характеристика теплообменных устройств

Блочная
насадка
для
доменных
воздухо-
нагрева-
телей



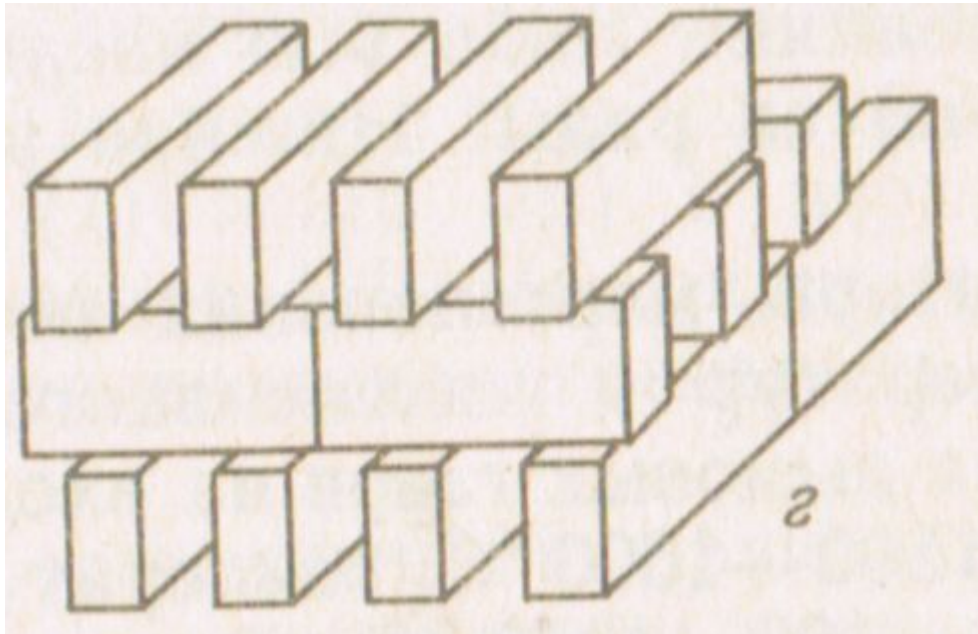
Характеристика теплообменных устройств

Насадка Каупера



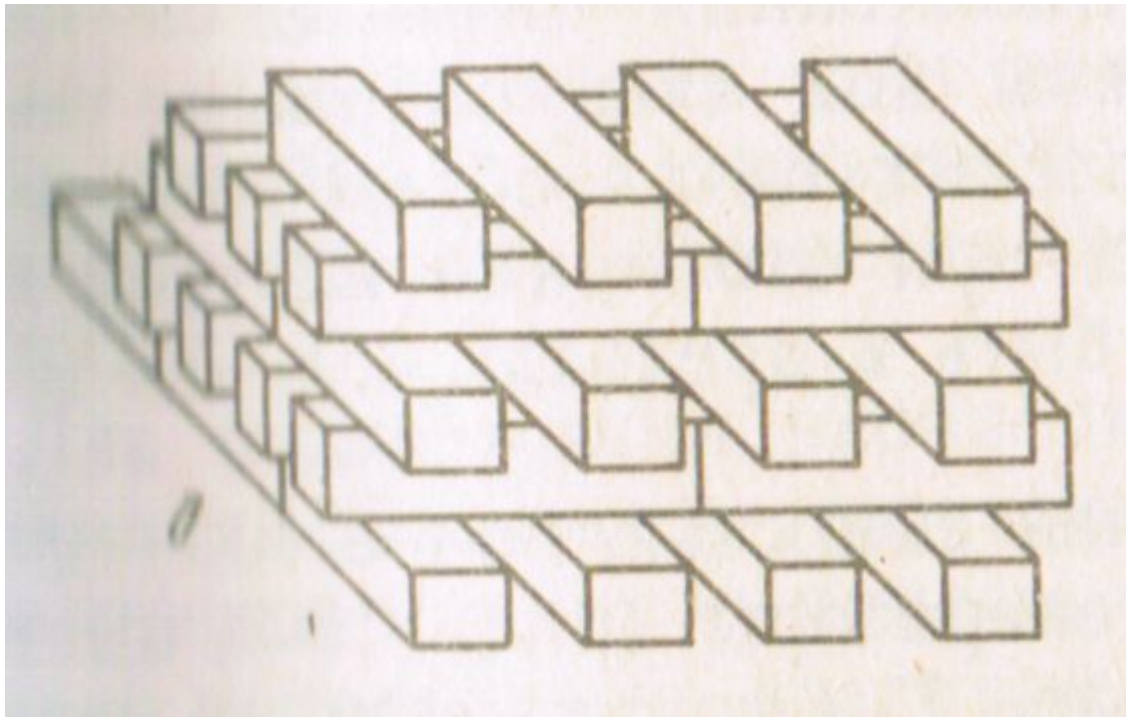
Характеристика теплообменных устройств

Насадка Сименса



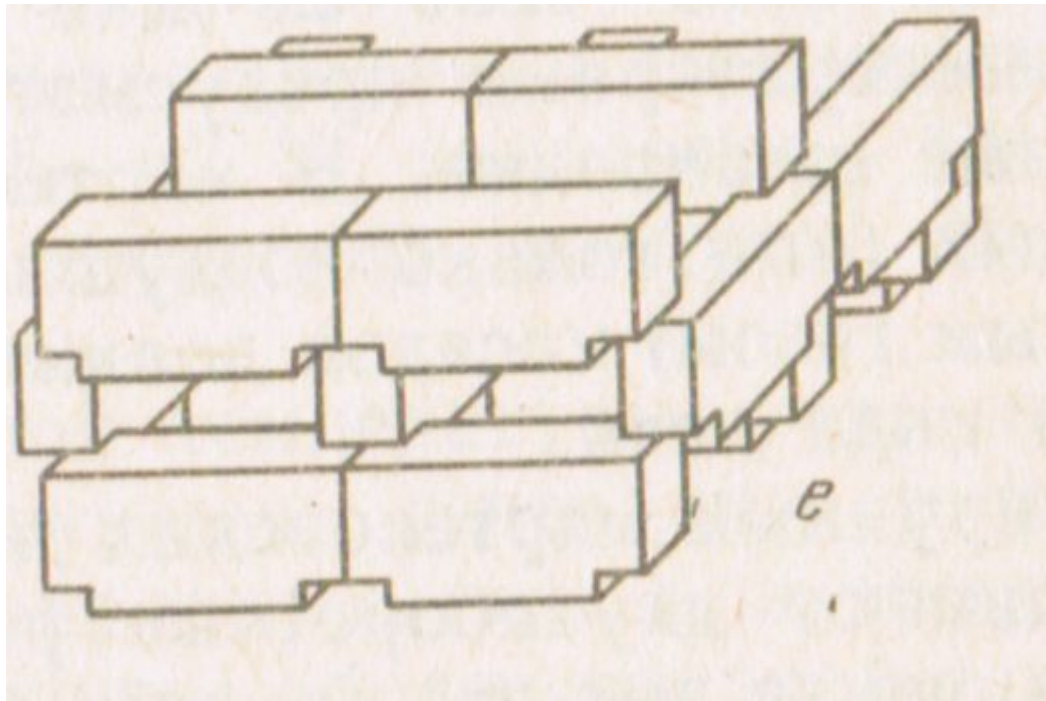
Характеристика теплообменных устройств

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

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;
- теплосиловой 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.

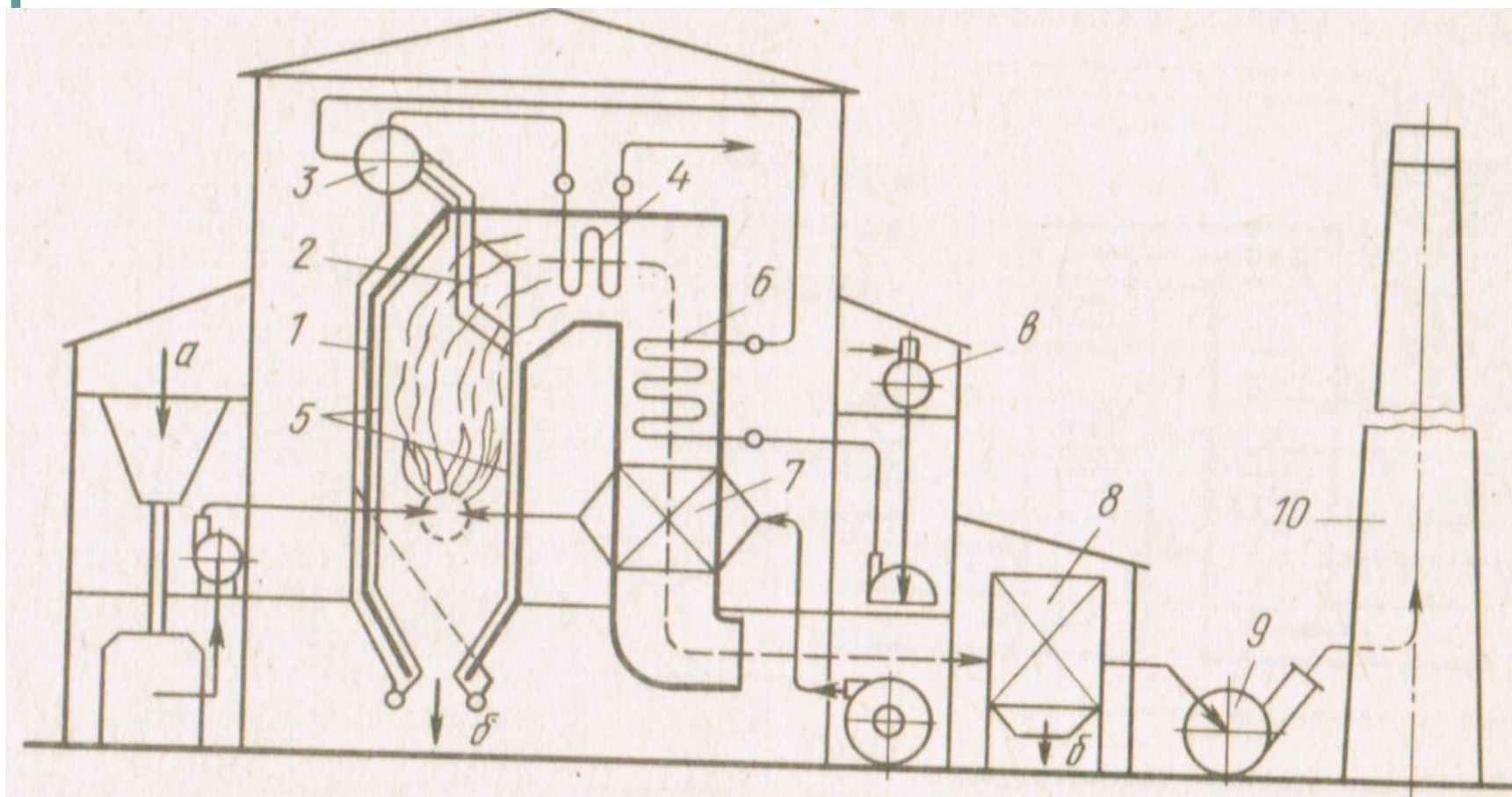
На производство энергоносителей затрачивается более 13% от всей потребляемой заводом энергии.

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.

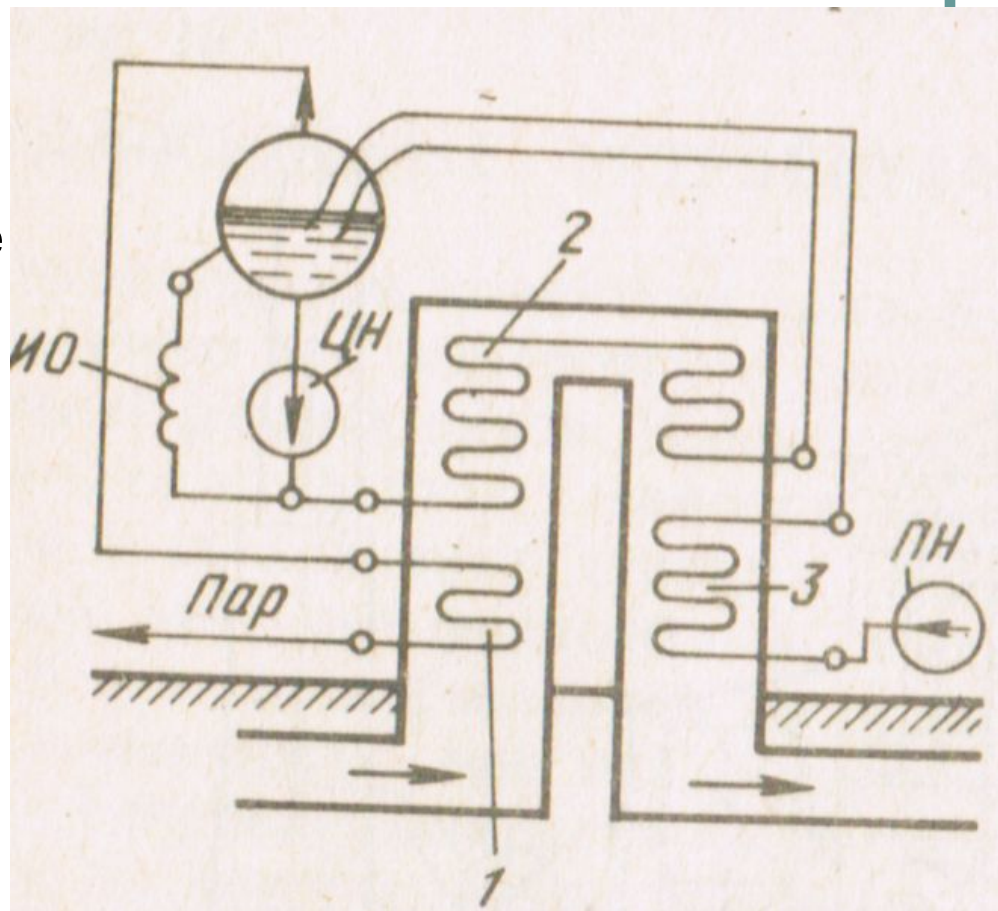
Котлы-утилизаторы

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 теплоперепад, 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

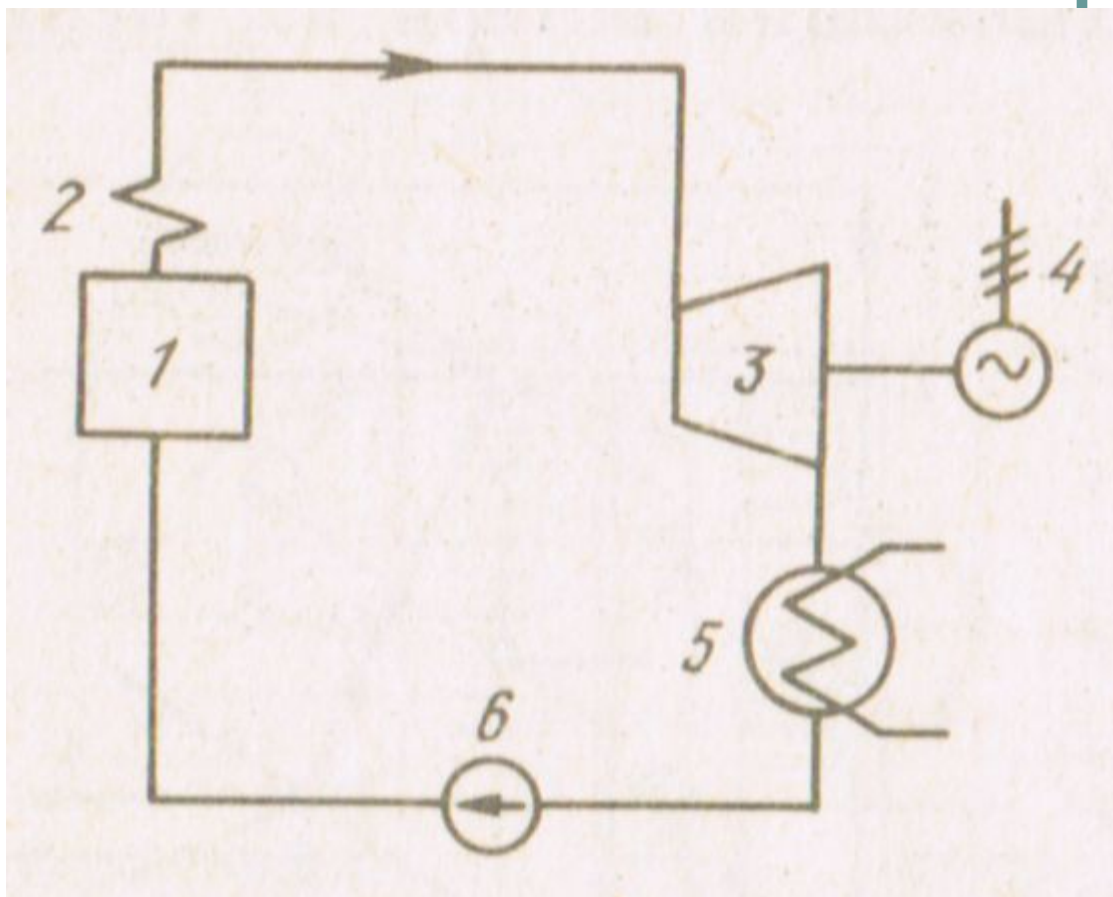
Паротурбинные или паросиловые установки, у которых весь пар проходит через конденсатор, называются конденсационными. Они предназначены для выработки электроэнергии. Их к.п.д. порядка 29— 39 % .

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.*

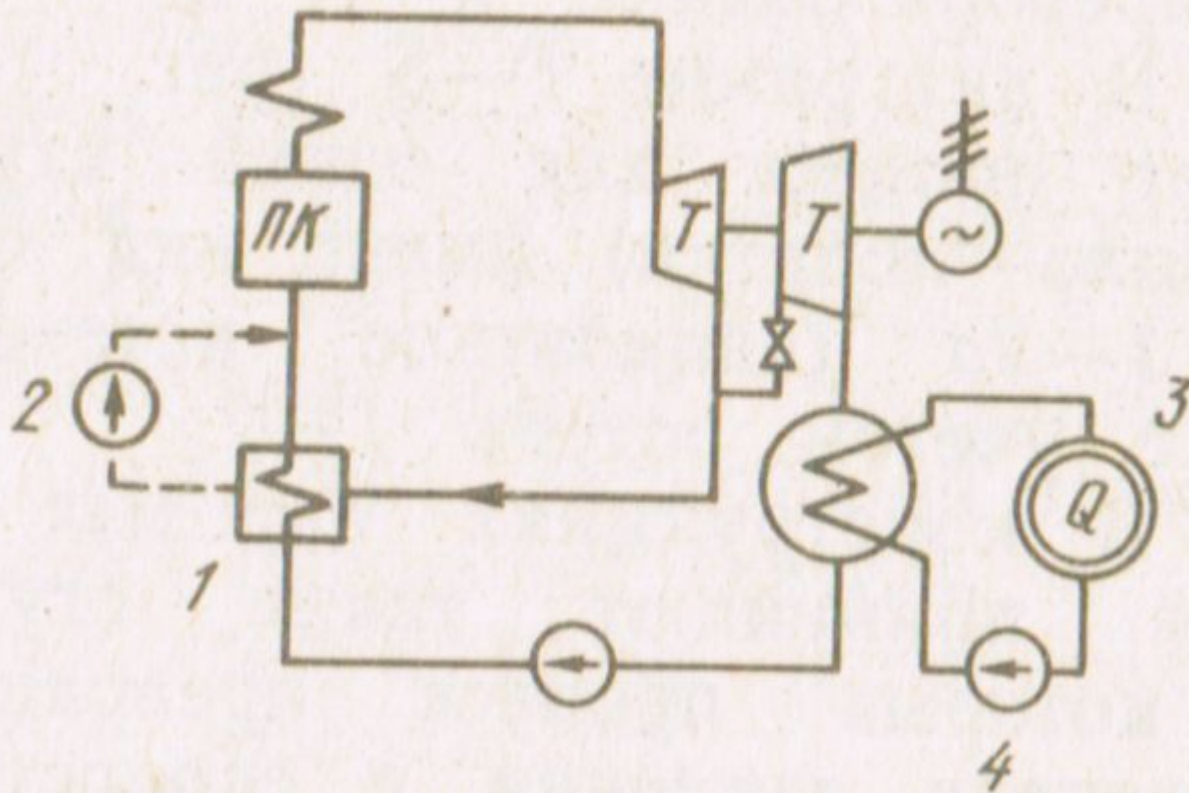
На таких станциях применяют турбины с производственными и теплофикационными отборами пара соответственно при давлении отбора 0,60-1,30 МПа и температуре 480-570 °С. Они являются приводом электрогенераторов мощностью 17 и 22 МВт.

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.