

СЭТБАЕВ  
УНИВЕРСИТЕТИ



SATBAYEV  
UNIVERSITY

# Роль котельной установки в системе производства электрической и тепловой энергии. Классификация котельных установок

Преподаватель: Кафедра «Энергетики», PhD доктор,  
ассоциированный профессор Онгар Булбул

[b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university)

# Введение

- 1 Что такое котельная установка?
- 2 Системы котельной установки;
- 3 Технологическая схема производства пара в котельной установке;
- 4 Конструктивные схемы котла;
- 5 Система производства пара;
- 6 Конструктивные схемы движения пароводяной среды в котле;
- 7 Котлы с естественной циркуляцией;
- 8 Физическая теплота топлива;
- 9 Полезное тепловосприятие рабочей среды в паровом котле;
- 10 Расходы топлива на котел.

# Что такое котельная установка

-Котельная установка это комплекс устройств и агрегатов, обеспечивающий получение водяного пара или горячей воды за счет сжигания топлива.

-Котельная установка - котельный агрегат и вспомогательное оборудование, к которым относятся дымососы, вентиляторы, система пылеприготовления, золоулавливающие и золоудаляющие устройства.

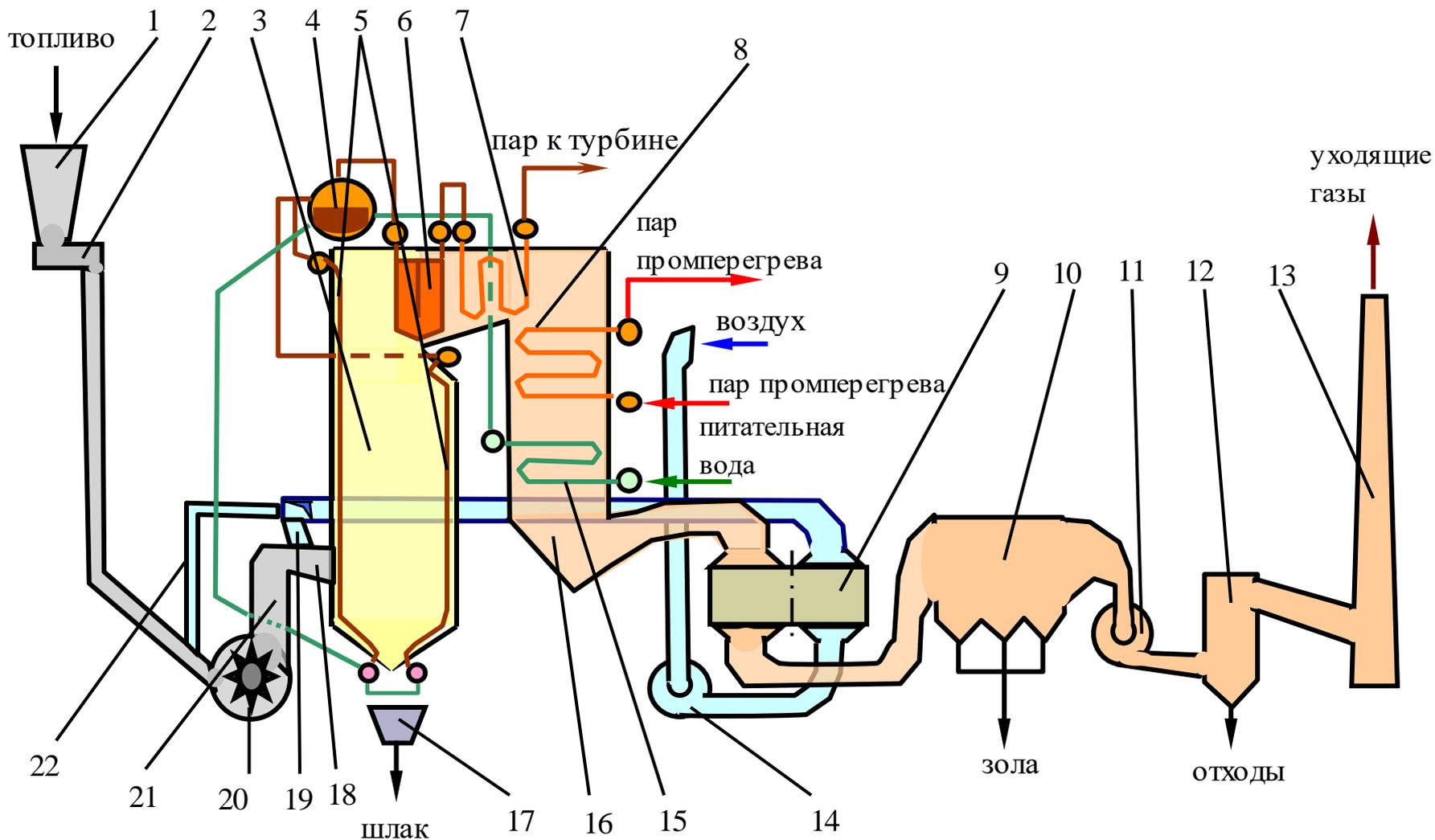
-Основными параметрами котла являются паропроизводительность, давление и температура пара. Котлы выпускаются :

- докритического среднего ( $p = 3,0 \div 3,5 \text{ МПа}$ ); высокого ( $p = 9,0 \div 13,0 \text{ МПа}$ ) и сверхкритического ( $p = 24,0 \div 30,0 \text{ МПа}$ ) давления.
- Современные котлоагрегаты имеют паропроизводительность  $D = 1000, 1650, 2650, 3950 \text{ т/ч}$ . При этом энергоблок обеспечивает мощность  $N = 300, 500, 800, 1200 \text{ МВт}$  соответственно.
- Температура пара за котлом по условиям прочностных свойств металла поддерживается в пределах  $545 \div 560 \text{ }^\circ\text{C}$ ..

# Системы котельной установки

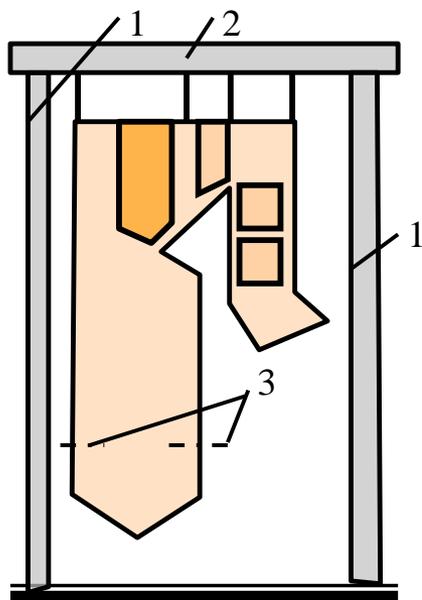
- ✦ Система топливоприготовления и топливоподачи, в которой топливо разгружается после транспортировки, дробится до размеров примерно 25 мм, складировается и подается в систему пылеприготовления.
- ✦ Система пылеприготовления измельчает топливо до размеров частиц 20÷60 мкм, подсушивает, выделяет мелкие фракции (сепарирует) и подает топливо в горелки.
- ✦ Система воспламенения и сжигания топлива (горелки, топочная камера, воздухопроводы подачи первичного и вторичного воздуха).
- ✦ Система производства пара состоит из водяного экономайзера, испарительных поверхностей нагрева, барабана, переходной зоны, пароперегревателей, и промперегревателя, должна подогреть питательную воду до температуры насыщения, испарить и перегреть пар.
- ✦ Система шлакоудаления (шлаковая ванна, дробилки шлака, гидроподачи золы и шлака на золоотвал).
- ✦ Система дутья воздуха подогревает воздух до 250÷400<sup>0</sup>С и подает его к системам пылеприготовления и сжигания топлива.
- ✦ Система тяги готовит уходящие газы к выбросу в атмосферу.

# Технологическая схема производства пара в котельной установке

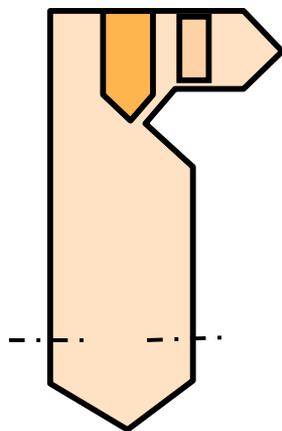


# Конструктивные схемы котла

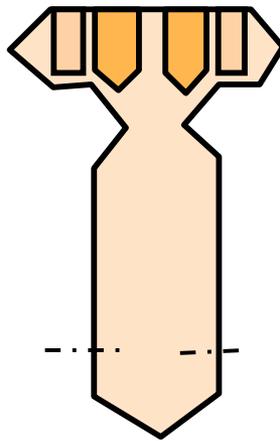
II-образной (а), Г-образной (б), Т-образной (в), N-образной (г), или башенной (д)



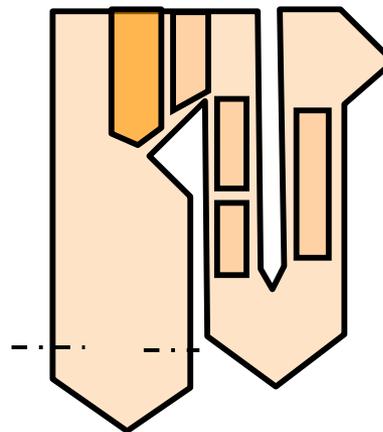
а)



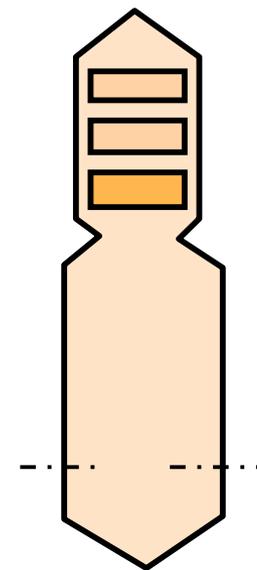
б)



в)



г)

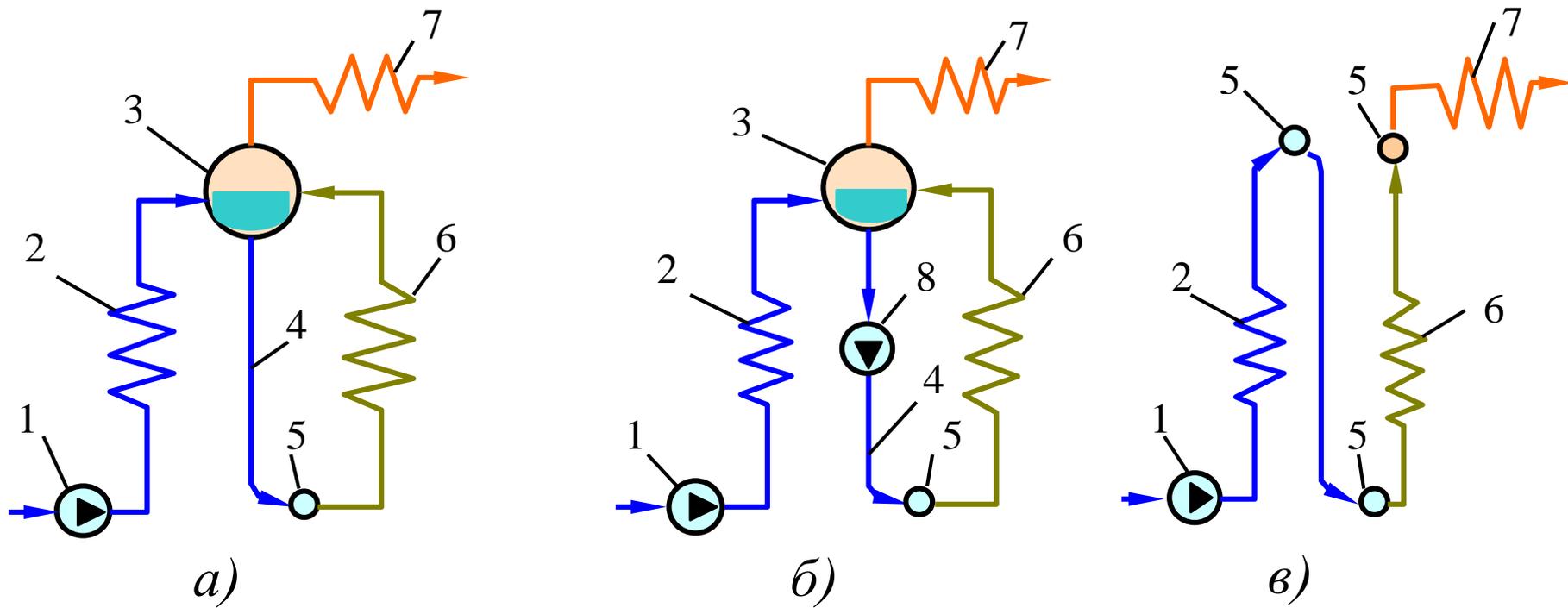


д)

# Система производства пара

- ☀️ Подогрев воды до температуры насыщения происходит в водяном экономайзере; производство пара – в испарительных (парообразующих) поверхностях нагрева; перегрев пара – в пароперегревателях. Все эти теплообменники выполнены из труб и имеют свои конструктивные особенности.
- ☀️ Для непрерывного отвода тепла от продуктов сгорания и обеспечения нормального температурного режима металла поверхностей нагрева рабочее тело в них движется непрерывно.
- ☀️ При этом вода в водяном экономайзере и пар в пароперегревателе движутся однократно относительно поверхностей нагрева.
- ☀️ В испарительных трубах движение воды и пара в котлах различных типов может осуществляться многократно.

# Конструктивные схемы движения пароводяной среды в котле



Различают котлы с:

- естественной циркуляцией (а);
- принудительной циркуляцией (б);
- прямоточные котлы (в).

# Котлы с естественной циркуляцией

Замкнутый контур естественной циркуляции (циркуляционный контур) состоит из двух систем труб: обогреваемой и необогреваемой объединенных вверху барабаном и внизу коллектором.

Напор естественной циркуляции определяется по уравнению

$$S_{\text{ов}} = (\rho' - \rho_{\text{см}}) gH,$$

где  $H$  – высота контура,  $m$ .

В контуре с естественной циркуляцией движение многократное: в процессе прохождения контура вода испаряется не полностью, а лишь частично.

Неиспарившаяся часть воды вновь проходит контур.

Паросодержание на выходе из подъемных труб составляет  $3 \div 20\%$ .

Поэтому вода проходит циркуляционный контур  $35 \div 5$  раз.

Отношение массового расхода циркулирующей воды  $G_g$ , к количеству образующегося пара  $G_n$  называется кратностью циркуляции:

$$K = G_g / G_n = 5 \div 35$$

# Основное понятие о котельном агрегате

**Основные элементы котельной установки** – котел, топочное устройство (топка), питательные и тягодутьевые устройства.

**Топочное устройство** служит для сжигания топлива и превращения его химической энергии в тепло нагретых газов.

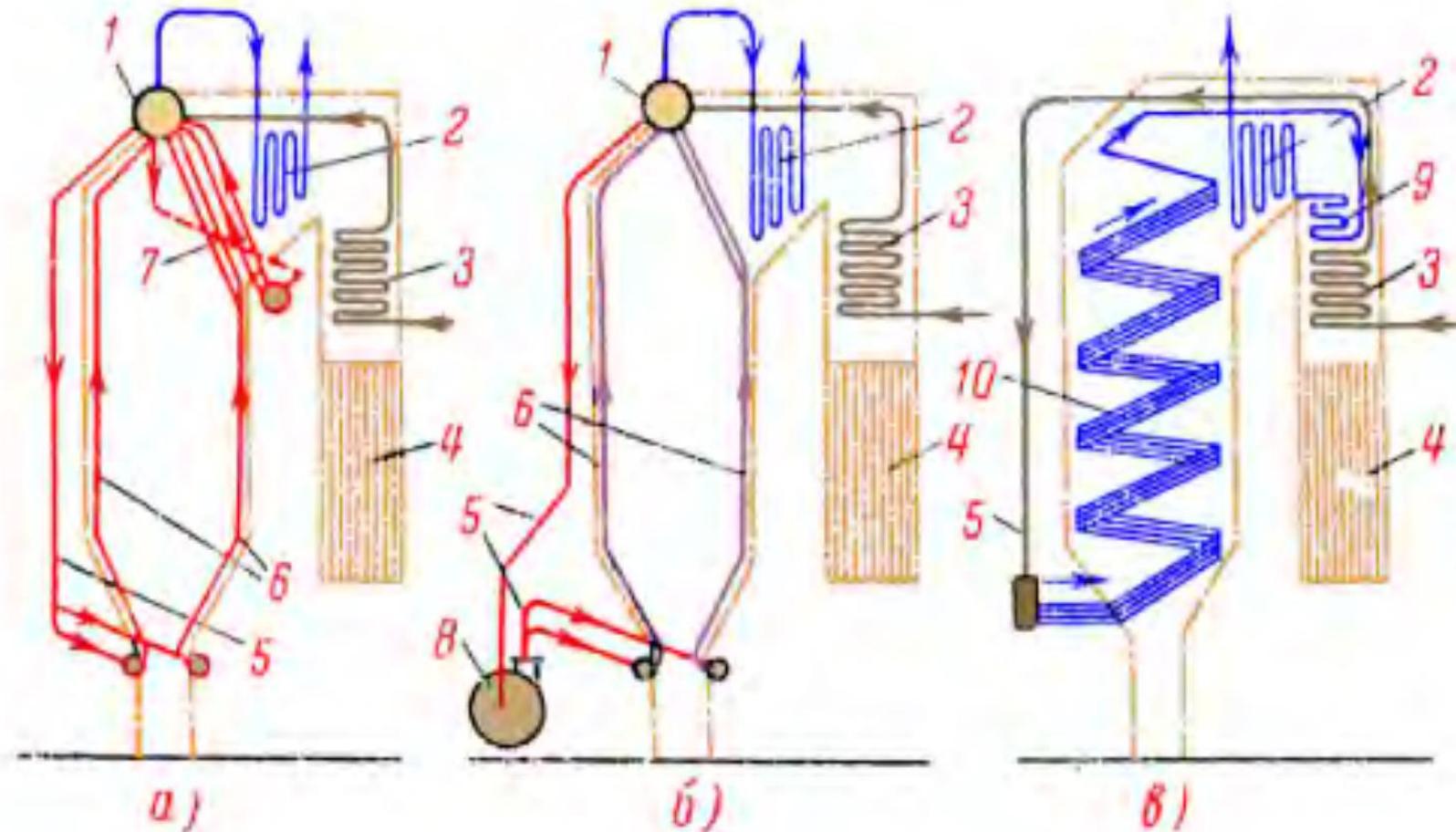
**Питательные устройства** (насосы, инжекторы) предназначены для подачи воды в котел.

**Тягодутьевое устройство** состоит из дутьевых вентиляторов, системы газозаборных устройств, дымососов и дымовой трубы, с помощью которых обеспечиваются подача необходимого количества воздуха в топку и движение продуктов сгорания по газоходам котла, а также удаление их в атмосферу.

**Вспомогательные элементы** (в основном современные КА): водяной экономайзер и воздухоподогреватель, приборы теплового контроля и средства автоматизации.

При сжигании твердого топлива в котельных, имеются **системы шлако- и золоудаления** для удаления очаговых остатков топлива, а также золоуловители – отделяющие золу из дымовых газов.

# Схемы основных типов котлов



*a* и *б* – соответственно котлы с естественной и принудительной циркуляцией воды; *в* – прямоточный котел Рамзина; 1 – барабан; 2 – пароперегреватель; 3 – экономайзер; 4 – трубчатый воздухоподогреватель; 5 – необогреваемые водоотпускные трубы; 6 – экранные испарительные трубы; 7 – конвективный трубный пакет (пучок); 8 – циркуляционный насос; 9 – переходная зона котла Рамзина; 10 – испарительные трубы (радиационная часть) котла Рамзина

# Основные элементы паровых и водогрейных котлов

**Топочная камера (топка)**, ограничена фронтальной, задней, боковыми стенами, подом и сводом в которой во взвешенном состоянии сжигается органическое топливо и создается наиболее высокая температура продуктов сгорания. Тепловоспринимающие поверхности в виде труб (топочные экраны) расположены на ограждающих камеру стенах из огнеупорных материалов и получают теплоту из газового объема за счет радиации или горящего факела (радиационный теплообмен).

## Пароперегреватели

Получение перегретого пара из сухого насыщенного осуществляется в пароперегревателе.

## Горизонтальный газоход

В объеме этого газохода располагаются поверхности пароперегревателя, в которых происходит радиационно - конвективный (на выходе из топки), и конвективный теплообмен между газовыми продуктами сгорания (газами) и рабочей средой внутри труб.

## Конвективная шахта

Объем шахты заполнен плотными пакетами поверхностей промежуточного пароперегревателя и экономайзера; Вид теплообмена конвективный.

# Основные элементы паровых и водогрейных котлов

## **Водяной экономайзер (ВЭ).**

В экономайзере питательная вода перед подачей в котел подогревается дымовыми газами за счет использования теплоты продуктов сгорания топлива.

**Экономайзеры** подразделяют на два типа — некипящие и кипящие.

В некипящих экономайзерах подогрев воды ведут до температуры на 20 °С ниже температуры насыщенного пара в паровом котле.

В кипящих экономайзерах происходит не только подогрев воды, но и частичное (до 15 %) ее испарение.

## **Бараны паровых котлов.**

-разделение пароводяной смеси, поступающей из подъемных обогреваемых труб, на пар и воду и сбор пара;

-прием питательной воды из водяного экономайзера либо непосредственно из питательной магистрали;

-внутрикотловая обработка воды (термическое и химическое умягчение воды);

-непрерывная продувка;

-осушка пара от капелек котловой воды;

-промывка пара от растворенных в нем солей;

-защита от превышения давления пара.

# Основные элементы паровых и водогрейных КОТЛОВ

## **Воздухоподогреватель**

В котельных агрегатах воздухоподогреватель уменьшает потери теплоты с уходящими газами. При использовании подогретого воздуха повышается температура горения топлива, интенсифицируется процесс сжигания, повышается коэффициент полезного действия котельного агрегата. Продукты сгорания после воздухоподогревателя называются уходящими газами, их температура составляет 120...160°C. **Дальнейшая утилизация теплоты продуктов сгорания в рамках котельной технологии становится экономически нецелесообразной.**

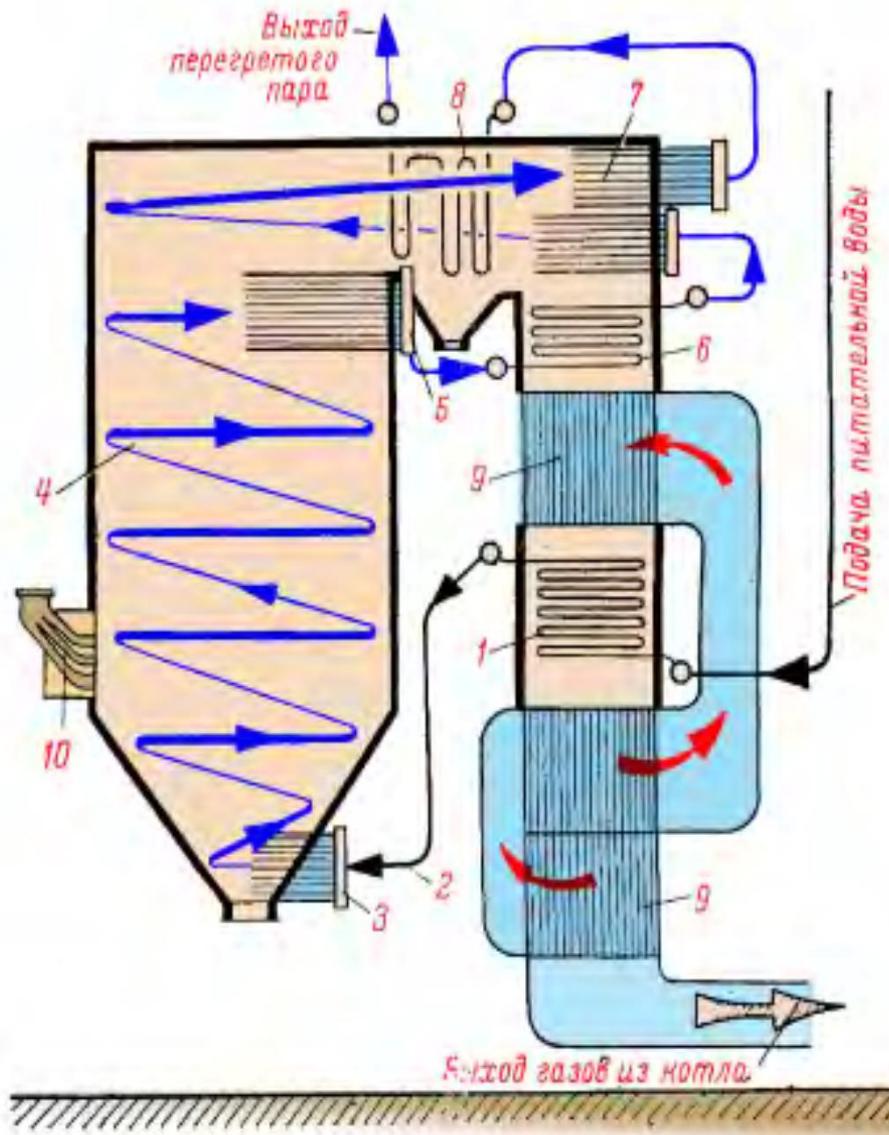
Температура подогрева воздуха выбирается в зависимости от способа сжигания и вида топлива: природный газ и мазут - 200...250 °С, пылеугольное сжигания твердое топливо — 300...420°C.

По принципу действия воздухоподогреватели разделяют на **рекуперативные и регенеративные.**

## **Гарнитура котла.**

Устройства, позволяющие безопасно обслуживать топочную камеру, газоходы котельного агрегата и газоздушный тракт. К ней относят: топочные дверцы и лазы в обмуровке; смотровые; лючки для обдувки, взрывной предохранительный клапан; и т.д.

# Прямоточный котел Рамзина



1 - экономайзер; 2 - перепускные необогреваемые трубы; 3 - нижняя экранная камера; 4 - экранные трубы; 5 - верхняя экранная камера; 6 - переходная зона; 7 - настенная часть пароперегревателя; 8 - конвективная часть пароперегревателя; 9 - воздухоподогреватель; 10 - горелки.

# ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

## **Цель составления теплового баланса котельного агрегата:**

1. Определение значений всех приходных и расходных статей баланса;
2. расчет коэффициента полезного действия котельного агрегата;
3. анализ расходных статей баланса с целью установления причин ухудшения работы котельного агрегата.

На основе такого анализа разрабатываются мероприятия по повышению энергетической эффективности котельного агрегата.

В котельном агрегате при сжигании органического топлива происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов горения. Выделившаяся теплота расходуется на выработку полезной теплоты пара или горячей воды и на компенсацию тепловых потерь.

Равенство прихода и расхода теплоты в котельном агрегате,

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{Расх}}$$

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{P}}^{\text{P}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} \quad \text{располагаемая теплота}$$

Для КУ тепловой баланс составляют на 1 кг твердого или жидкого топлива, или на 1 м<sup>3</sup> газа, при нормальных условиях (273 К и 0,1013 МПа). С размерностью МДж/кг или МДж/м<sup>3</sup>. (ккал/кг, ккал/кг.)

Приходная часть теплового баланса:

$$Q_p^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

$$Q_p^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где  $Q_p^P$  – располагаемое тепло, ккал/кг;

$Q_1$  – полезно используемое тепло, получаемое в виде пара или горячей воды, ккал/кг;

$Q_2$  – потеря тепла с уходящими из котла и выбрасываемыми в атмосферу продуктами сгорания (газами), ккал/кг;

$Q_3$  – потеря тепла от химической неполноты сгорания, ккал/кг;

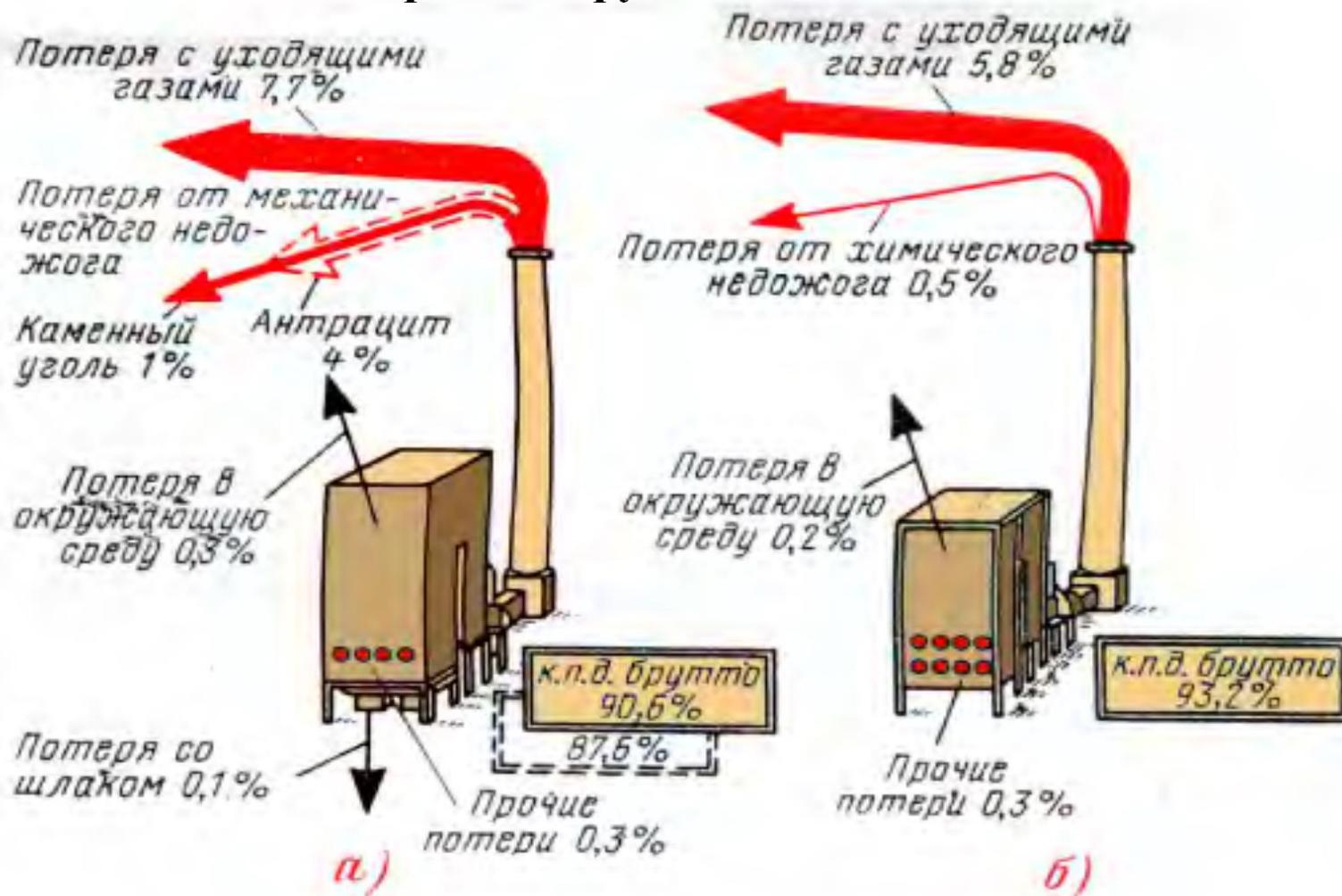
$Q_4$  – потеря тепла от механической неполноты сгорания (потери в провале, шлаке, уносе), ккал/кг;

$Q_5$  – потеря тепла всеми элементами котельного агрегата в окружающую среду, ккал/кг;

$Q_6$  – потеря с физическим теплом шлаков, ккал/кг.

$$Q_1 = Q_p^P - \sum Q_i \quad \text{КПД}(\eta) = \frac{Q_1}{Q_p^P} 100\%$$

# Потери тепла и КПД



- А) при сжигании тв. топл. В) при сжигании газа и мазута.

# Материальный баланс

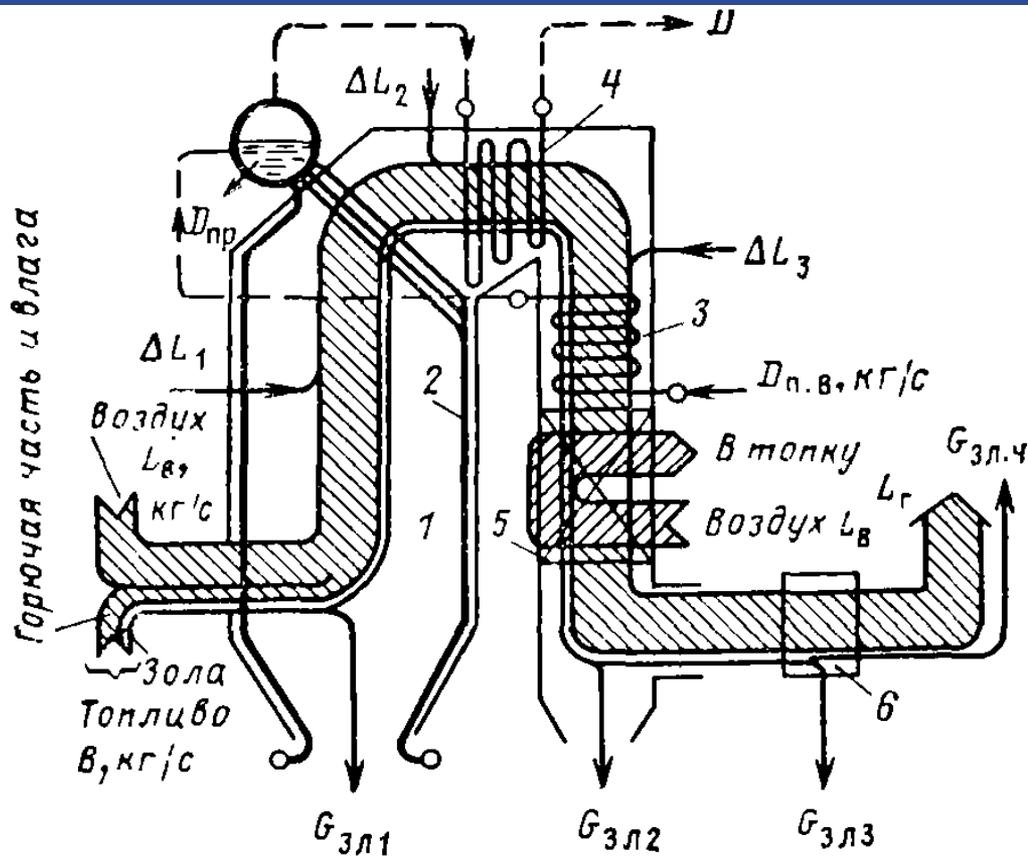


Схема материальных балансов котла

$$B + L_B + \sum \Delta L = L_G + \sum G_{зл}$$

$B, L$  - количество топлива и окислителя, кг/с.

# Физическая теплота топлива

$$Q_{мл} = c_{мл}^P t_{мл} \quad (\text{кДж/кг или кДж/м}^3)$$

$c_{р,мл}^P$

– теплоемкость рабочей массы топлива, кДж/(К·кг)  
или кДж/(К·м<sup>3</sup>)

$t_{мл}$

– температура топлива, °С

твердое: 20 °С (летом) и 0 °С (зимой)

мазут: 90-140 °С в зависимости от вязкости

природный газ: 20 °С

Теплоемкость мазута (раб. масса)

$$c_{р,мл}^P = 1.74 + 0.0025 \cdot t_{мл}$$

Теплоемкость прир.газа (сухая масса)

$$c_{р,мл}^P = 1,6 \text{ кДж/(К·м}^3)$$

$$c_{p,мл}^P = c_{p,мл}^c \frac{100 - W^P}{100} + c_{p,H_2O} \frac{W^P}{100}, \text{ кДж/(кг·К)}$$

$c_{p,мл}^c$ для	антрацита	0.981
	каменных углей	0.962
	бурых углей	1.088
	фрезерного торфа	1.297
	сланцев	1.04

Теплоемкость **сухой древесины**

$$c_{p,мл}^c = 0.1031 + 0.0039 \cdot (t_{мл} + 273)$$

**Количество теплоты, вносимое с паром**, используемым для распыливания мазута

$$Q_{\phi} = G_{\phi} (h_{\text{пара}} - 2500) \quad , \text{ кДж/кг,}$$

$G_{\phi}$  – удельный расход пара на форсунку, который обычно принимается равным 0.03–0.05 кг/кг (при номинальной нагрузке котла) и имеет давление 0.3–0.6 МПа и температуру 280–350 °С.

$h_{\text{пара}}$  – энтальпия пара, кДж/кг.

**2500 кДж/кг** – условно принимаемая энтальпия пара, содержащегося в уходящих газах.

# Полезное тепловосприятие рабочей среды в паровом котле

$$Q_k = D_n (h_{nn} - h_{nv}) + D_{пром} (h_{пром}^{вых} - h_{пром}^{вх}) + D_{пр} (h' - h_{n.в}),$$

[кДж/с = кВт]

$D_n$ ,  $D_{пром}$ ,  $D_{пр}$  – паропроизводительность котла, расход пара на промежуточный перегрев и расход котловой воды на продувку, кг/с;

– энтальпии перегретого пара, воды в состоянии насыщения и питательной воды, кДж/кг;

$h_{пром}^{вых}$ ,  $h_{пром}^{вх}$  – энтальпии пара на выходе и входе в промежуточный пароперегреватель, кДж/кг.

# Полезное тепловосприятие рабочей среды в паровом котле

$$Q_k = G_v (h_{2.v} - h_{x.v}) \quad , \quad \text{кДж/с} = \text{кВт}$$

$G_v$  – расход воды через водогрейный котёл, кг/с

– энтальпии холодной и горячей воды (на входе и выходе водогрейного котла), кДж/кг

$$h_{x.v} = (c_p t)_{x.v} \quad , \quad h_{2.v} = (c_p t)_{2.v}$$

# Расходы топлива на котел

$$B = \frac{Q_k}{\eta_k Q_p^p}, \quad \frac{\text{кВт}}{\text{кДж/кг}} = \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

где КПД котла брутто **по обратному балансу**

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \%$$

Вследствие *механической неполноты* сгорания *не все топливо, поступающее в топку*, полностью сгорает, что приводит к уменьшению количества газов – продуктов сгорания.

Так как расчётные объёмы и энтальпии продуктов сгорания отнесены к 1 кг рабочего топлива, то для учета механического недожога *условно полагают*, что в топку поступает несколько меньшее количество топлива, т.е. тепловой расчет производят по *расчетному расходу топлива*

$$B_p = B \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right).$$

(Влиянием *химической* неполноты сгорания пренебрегают).

В тепловом балансе котельного агрегата наибольшей является потеря теплоты с уходящими газами  $q_2$ , составляющая 4–8 % располагаемого тепла.

*Относительная* потеря теплоты с уходящими газами

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p} \cdot 100, \%$$

*абсолютная*

$$Q_2 = (H_z - \alpha_{yx} H_{x.v.}^0) (100 - q_4), \quad \text{кДж/кг или кДж/м}^3$$

Т.к. воздух, поступающий в котлоагрегат, вносит в топку свою физическую теплоту, потерю тепла с уходящими газами определяют по разности энтальпий продуктов сгорания и холодного воздуха за котлом ( $30^\circ\text{C}$ ).

$H_{г}, H_{х.в.}^0$  – энтальпия *действительного* объёма уходящих газов и *теоретического* объёма холодного воздуха, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>.

$\alpha_{ух}$  – коэффициент избытка воздуха *в уходящих газах*.

$$\alpha_{ух} = \alpha_{т} + \Delta\alpha_{присосов}$$

Так как теплоемкости основных компонентов дымовых  $\vartheta$  газов различны, то их энтальпии при температуре  $^{\circ}\text{C}$  подсчитываются отдельно

$$H_{г,i} = V_i C_i \vartheta$$

**Благодарю за внимание!**