

# Энергосиловое оборудование промышленных предприятий

## Лекция 5. Котельные установки

# Котельная установка

**Котельная установка** состоит из котла и вспомогательного оборудования.

**Котельный агрегат (котел)** – устройство, предназначенное для получения пара или горячей воды повышенного давления за счет теплоты, выделяемой при сжигании топлива или подводимой от посторонних источников (горячие газы).

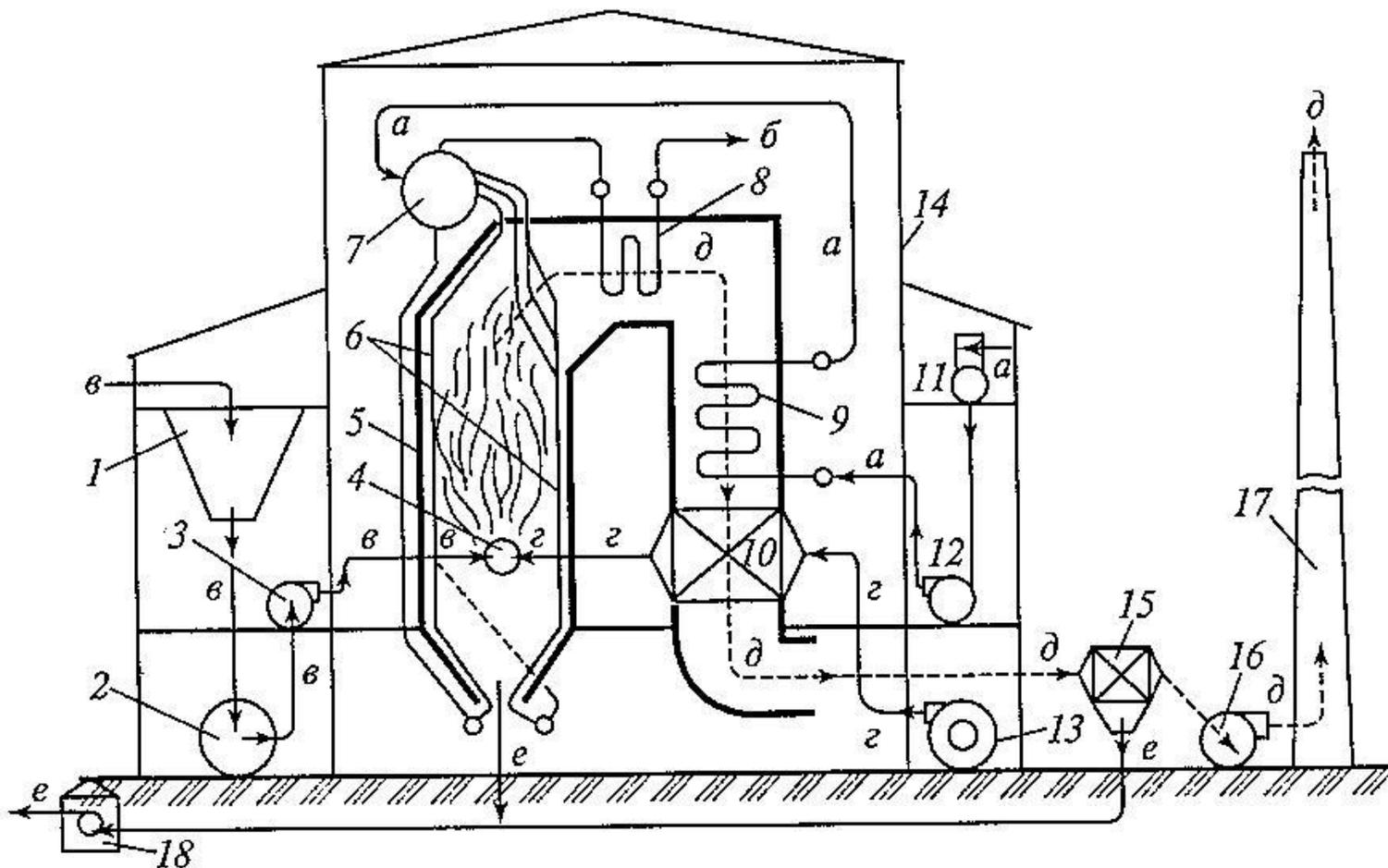
Котлы делятся на **паровые** и **водогрейные**. Бывают *котлы-утилизаторы*

В *состав котла* входят: топка; пароперегреватель; экономайзер; воздухоподогреватель; каркас; обмуровка; тепловая изоляция; обшивка.

*Состав вспомогательного оборудования*: тягодутьевые машины; устройства очистки поверхностей нагрева; устройства топливоприготовления и топливоподдачи; оборудование шлако- и золоудаления; газоочистные устройства; газозухопроводы; трубопроводы воды, пара и топлива; арматура (запорная и регулирующая, клапаны, манометры и др.); гарнитура (лазы, гляделки, люки, шиберы, заслонки); автоматика; приборы и устройства контроля и защиты; водоподготовительное оборудование; дымовая труба.

Котельные установки, снабжающие паром турбины ТЭС – *энергетические*.

# Технологическая схема котла



*a* – водяной тракт; *б* – перегретый пар; *в* – топливный тракт; *г, д* – газо-воздушный тракт; *е* – путь золы и шлака; 1 – бункер топлива; 2 – мельница; 3 – мельничный вентилятор; 4 – горелка; 5 – контур топки и газоходов КА; 6 – экраны топки; 7 – барабан; 8 – пароперегреватель; 9 – водяной экономайзер; 10 – воздухоподогреватель; 11 – бак воды деаэрата; 12 – питательный насос; 13 – дутьевой вентилятор; 14 – контур здания котельной; 15 – золоулавливатель; 16 – дымосос; 17 – дымовая труба; 18 – насос золошлакоудаления

# Классификация котлов

**Котельный агрегат** является устройством производительностью  $D$  (т/ч) для получения пара с заданным давлением  $p$  (МПа) и температурой  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Все котлоагрегаты делятся на 2 основных класса: **паровые** и **водогрейные**.

Водогрейные котлы – у которых конечным продуктом является горячая вода (на технологию и отопление) – харак-ся теплопроизводительностью (Гкал/ч)

По *паропроизводительности* котлы бываю:

- малой производительности – до 20 ... 25 т/ч
- средней производительности – от 35 ... 50 до 160 ... 220 т/ч
- большой производительности – от 220 ... 250 т/ч и выше

По *давлению* производимого пара котлы бывают:

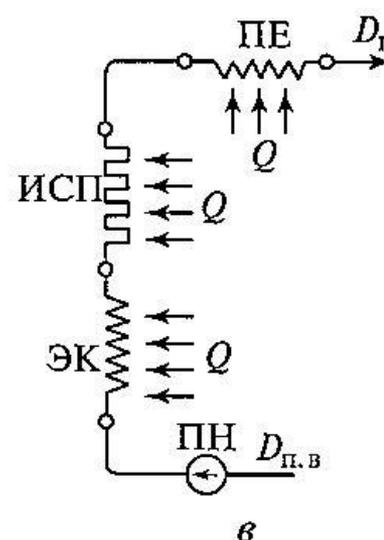
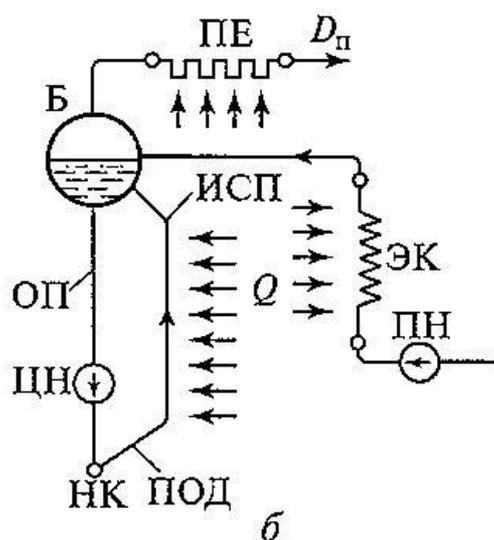
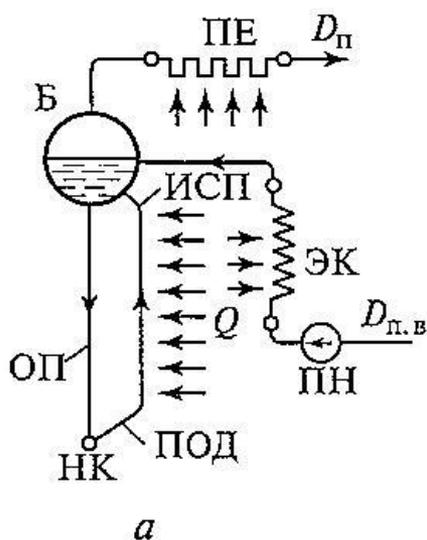
- низкого давления – до 1,37 МН/м<sup>2</sup>
- среднего давления – 2,35 и 3,92 МН/м<sup>2</sup>
- высокого – 9,81 и 13,7 МН/м<sup>2</sup> ( $t_{\text{пара}} = 540 \dots 570 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $t_{\text{ПВ}} = 50 \dots 260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- закритического давления – 25,1 МН/м<sup>2</sup>

По *характеру движения* воды, пароводяной смеси и пара котлы делятся на:

- барабанные с естественной циркуляцией ( $K_{\text{ц}} = 10 \dots 60$ )
- барабанные с многократной принудительной циркуляцией
- прямоточные ( $K_{\text{ц}} = 1$ )

# Циркуляция теплоносителя

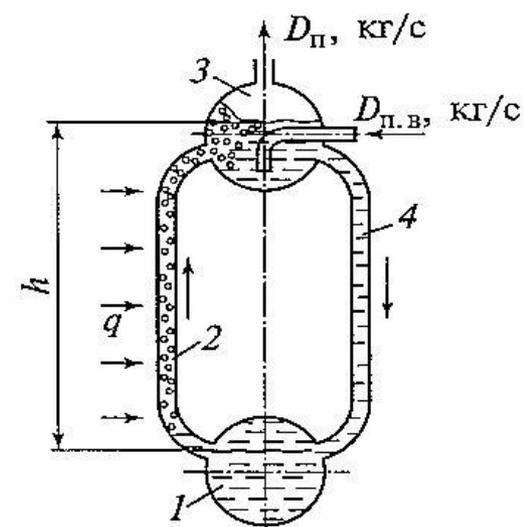
Отношение количества воды, проходящей через контур, к паропроизводительности контура  $D$  за тот же промежуток времени называют **кратностью циркуляции  $K_{ц}$** .



Естественная циркуляция воды в котле:

- 1 – нижний коллектор;
- 2 – левые трубы;
- 3 – барабан котла;
- 4 – правые трубы

$$H\rho_{\text{в}} > H\rho_{\text{см}}$$



Схемы генерации пара в паровых котлах:

*а* – естественная циркуляция; *б* – многократная принудительная циркуляция; *в* – прямоточное движение

Б – барабан; ИСП – испарительные поверхности; ПЕ – пароперегреватель; ЭК – водяной экономайзер;  $D$  – расход пара;  $D_{\text{п.в.}}$  – расход питательной воды;  $Q$  – подвод теплоты; ПН – питательный насос; ЦН – циркуляционный насос; НК – нижний коллектор; ОП – опускные трубы; ПОД – подъемные трубы

# Характеристики отечественных КА

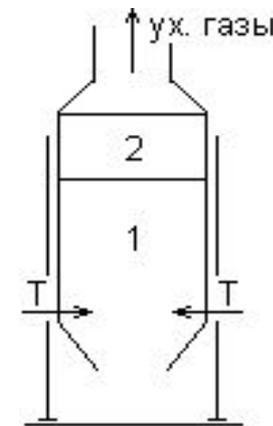
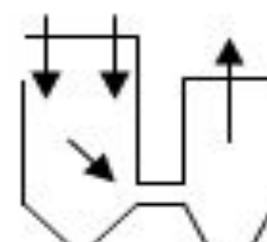
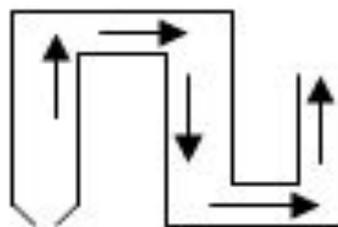
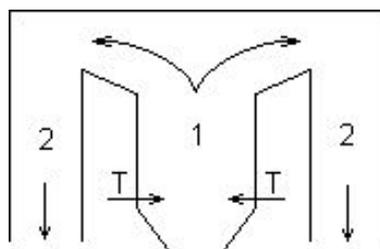
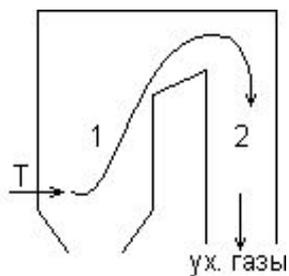
Характеристики котельных агрегатов, выпускаемых отечественной промышленностью

Давление, МПа (ат)	Паропроизводительность котла, т/ч	Состояние пара, (температура, °С)	Температура пит. воды, °С	Область применения
0,88 (9)	0,2; 0,4; 0,7; 1,0	насыщенный	50	На технологию и отопление небольших пром.предприятий
1,37 (14)	2,5	насыщенный	80	На технологию и отопление более крупных пром.предп.
	4; 6,5; 10; 15; 20	насыщенный или перегретый (250)	100	Квартальные отопительные котельные
2,35 (24)	4; 6,5; 10; 15; 20	насыщенный или перегретый (370 и 425)	100	На технологию некоторых пром.предприятий
3,92 (40)	6,5; 10; 15; 20; 25; 35; 50; 75	440	145	Снабжение паром турбин мощностью от 0,75 до 12 МВт
9,8 (100)	60; 90; 120; 160; 220	540	215	Снабжение паром турбин мощностью от 12 до 50 МВт
13,7 (140)	160; 210; 320; 420; 480	570	230	Снабжение паром турбин мощностью от 50 до 200 МВт
	320; 500; 640	с вторичным перегревом (570/570)	230	на крупных электростанциях
25,0 (255)	950; 1600; 2500	с вторичным перегревом (570/570)	260	Снабжение паром турбин мощностью 300, 500, 800 МВт на крупнейших эл.станциях

# Основные виды КА

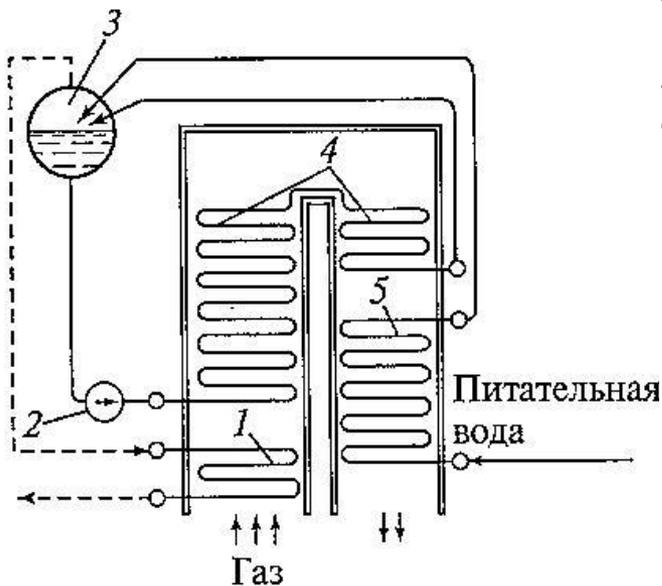
Взаимное расположение газоходов и направление движения в них продуктов сгорания называют **компоновкой парового котла**.

Различают П-, Т-, N- (многоходовую), U-образную, башенную компоновки



## Котел-утилизатор:

1 – пароперегреватель; 2 – насос; 3 – барабан; 4 – змеевик; 5 – экономайзер. Их характерная особенность – отсутствие топки для сжигания топлива



## Типы КА:

**БК-35** – однобарабанный вертикальноводотрубный (ГМ)

**К-50-40/14 (ГМ)** – одно- и двухбарабанный (Белгородский КЗ)

**Е-320-13,8-560-ГМ (БКЗ 320-140) (КТ, БТ)** «Сибэнергомаш-БКЗ»

**ДКВр-20-13** – двухбарабанный котел вертикально-водотрубный

**КВ-ГМ-35-150 (ПТВМ-30М)** – водогрейные газомазутные котлы

ОАО "Дорогобужкотломаш"

**Бийский котельный завод (БиКЗ):** КЕ, ДЕ, ДКВр, Е, ДСЕ и др.

**П-57-3М (Пп-1650-25-545/545 КТ)** – прямоточный ПАО «ЗиО-Подольск»

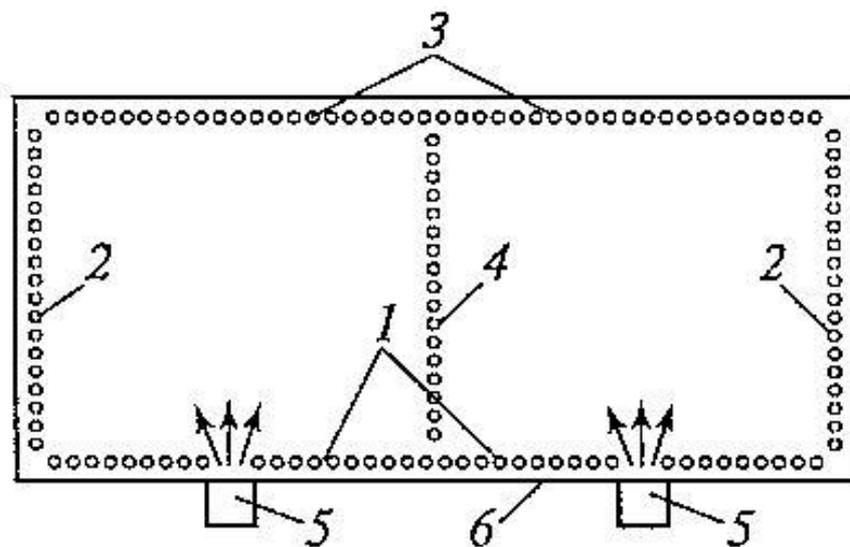
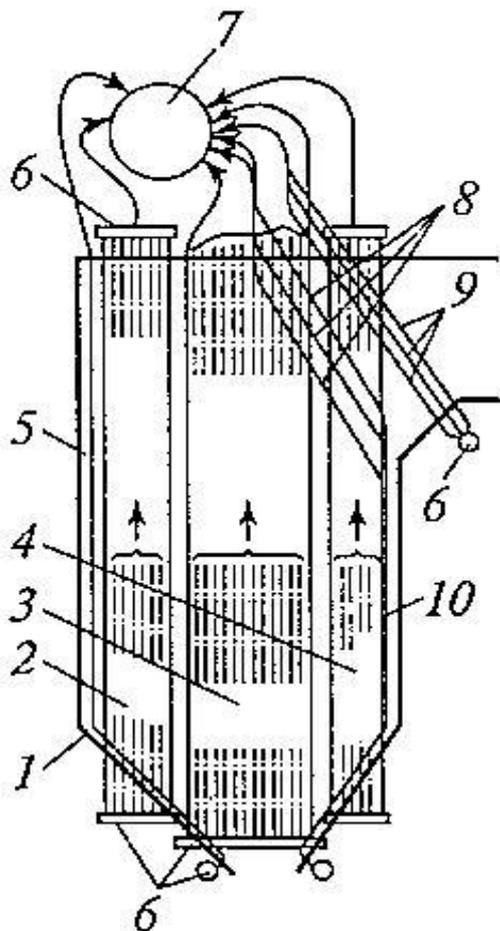
# Основные элементы КА

**Основными элементами** котла являются: испарительные поверхности нагрева (экранные трубы и конвективный пучок), пароперегреватель с регулятором перегрева пара, водяной экономайзер, воздухоподогреватель и тягодутьевые устройства.

## Испарительные поверхности КА:

1 – контур обмуровки топки; 2, 3, 4 – панели бокового экрана; 5 – фронтальной экран; 6 – коллекторы экранов и конвективного пучка; 7 – барабан; 8 – фестон; 9 – конвективный пучок; 10 – задний экран

Экраны выполняют из гладких труб  $\varnothing 40 \dots 60$  мм с зазором 4 ... 6 мм.

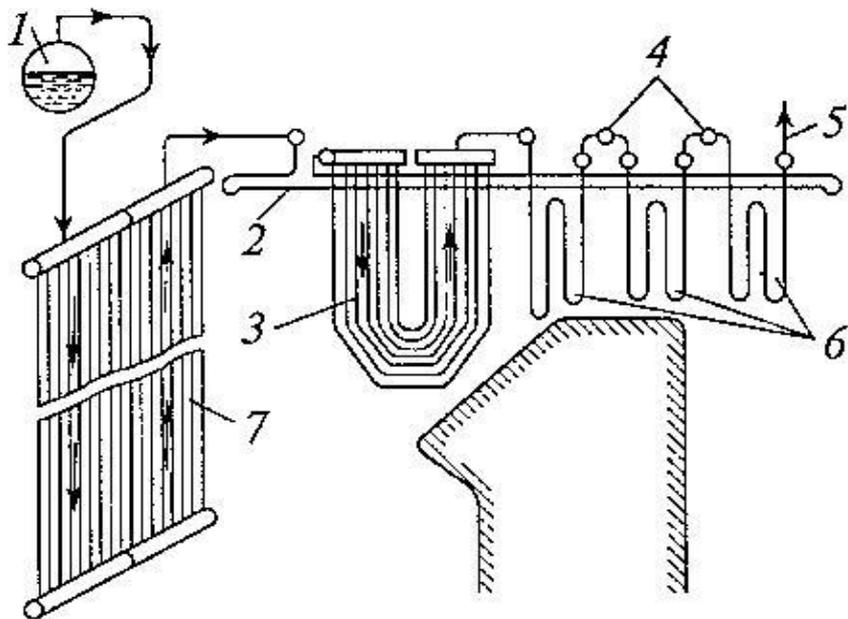


Размещение экранов в поперечном сечении топki КА:  
1 – фронтальной экран; 2 – боковые экраны; 3 – задний экран; 4 – двусветный экран; 5 – горелки; 6 – обмуровка

# Пароперегреватели

**Пароперегреватель** предназначен для повышения температуры пара, поступающего из испарительной системы котла.

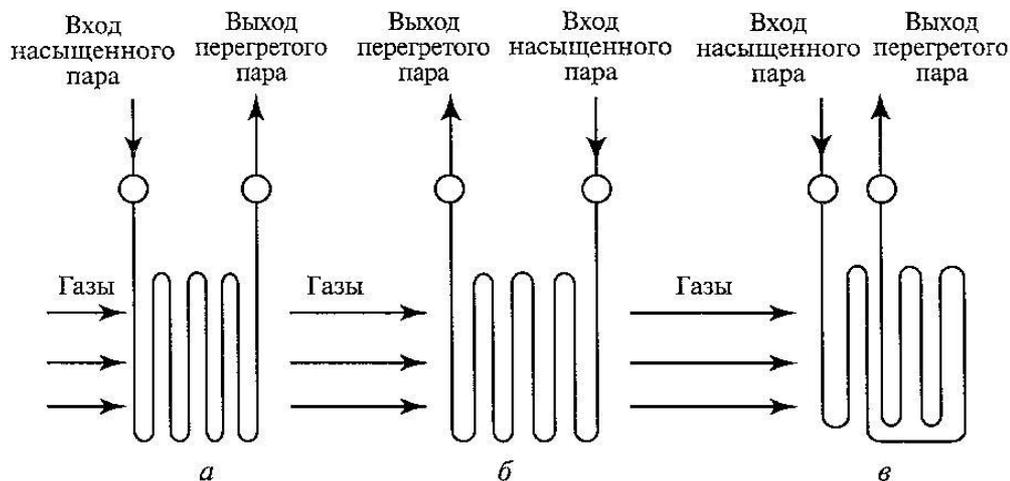
В зависимости от способа передачи теплоты от газов ПП делятся на радиационные, полурadiационные и конвективные.



Радиационные ПП выполняют из труб  $\varnothing 22 \dots 54$  мм  
 Конвективные ПП располагают в виде плотных пакетов змеевиков с шагом  $2,5 \dots 3$  диаметра трубы

Взаимное движение пара и газов в ПП:

*a* – прямоточное; *б* – противоточное; *в* - смешанное



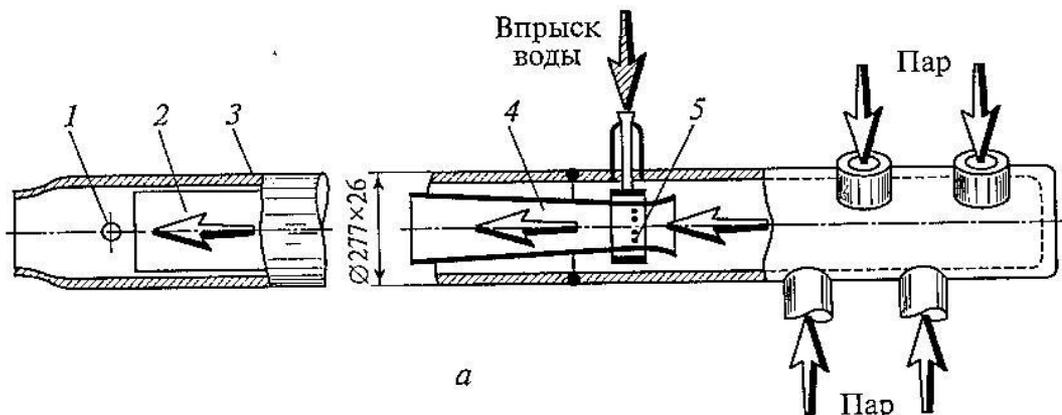
Радиационный и конвективный ПП:

1 – барабан; 2 – потолочный радиационный ПП; 3 – ширмовый полурadiационный ПП; 4 – регулятор перегрева; 5 – отвод перегретого пара; 6 – конвективный ПП; 7 – настенный радиационный ПП

# Пароохладители

**Пароохладитель** – регулирующее устройство, предназначенное для поддержания температуры пара на постоянном уровне.

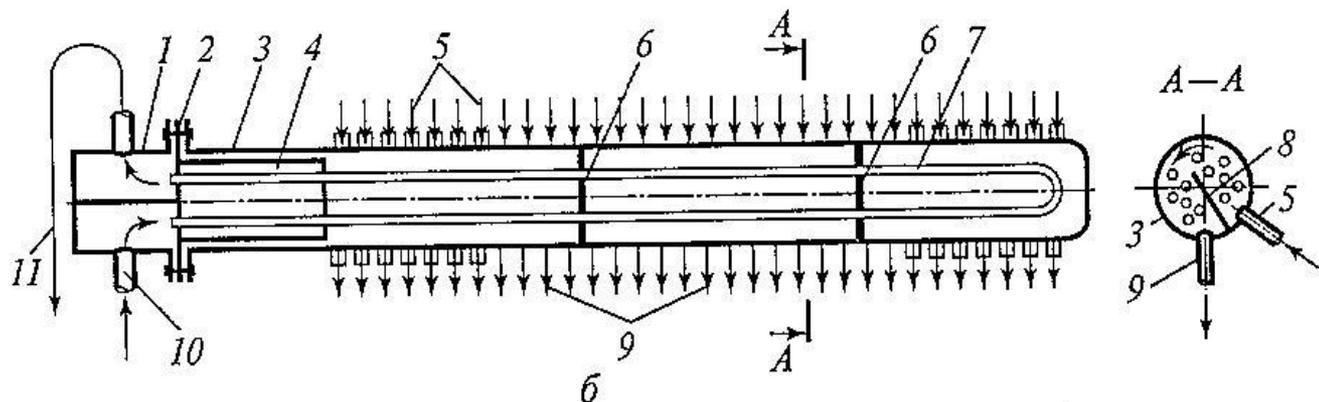
По принципу действия бывают пароохладители *впрыскивающего типа* (наиболее распространены) и *поверхностные*.



Поверхностный ПО с охлаждением пара питательной водой:  
 1 – головка ПО; 2 – трубная доска; 3 – коллектор; 4 – рубашка; 5, 9 – трубы, подводящие и отводящие пар из ПО; 6 – перегородки; 7 – водяной змеевик; 8 – продольная перегородка; 10, 11 – трубы, подводящие и отводящие питательную воду

**Впрыскивающий ПО:**

1 – лючок для приборов;  
 2 – рубашка; 3 – корпус ПО;  
 4 – диффузор; 5 – отверстия для распыления воды в паре



# Тягодутьевые устройства

**Схемы** подачи воздуха и отвода продуктов сгорания в КУ:

- естественная тяга дымовой трубы и всасывание воздуха за счет разрежения в ней
- искусственная тяга за счет дымососа и всасывание воздуха за счет разрежения
- искусственная тяга за счет дымососа и принудительная подача воздуха дутьевым вентилятором
- с наддувом за счет давления от дутьевого вентилятора

$$\Delta S = gH (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{г}}) = gH \left[ \frac{\rho_{\text{возд}}^0}{273 + t_{\text{возд}}} + \frac{\rho_{\text{г}}^0}{273 + t_{\text{г}}} \right] \frac{273B}{760}, \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]$$

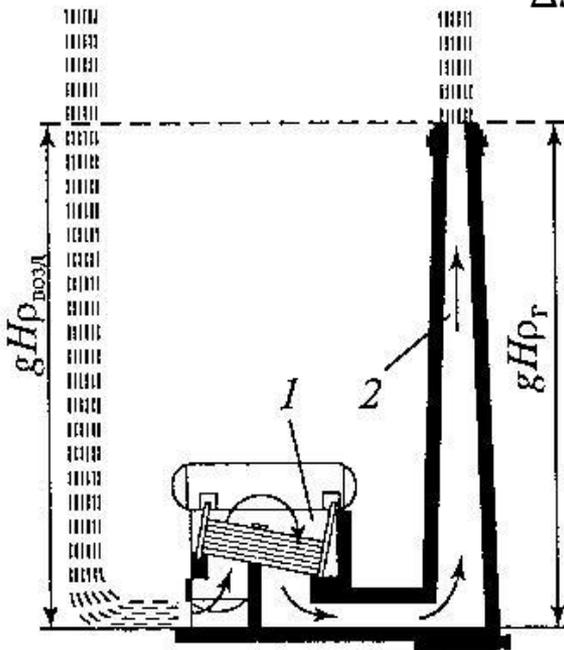
Основное назначение **дымовой трубы** – вывод дымовых газов в более высокие слои атмосферы для улучшения условий рассеяния их в пространстве.

Аэродинамический расчет котла – расчет высоты дымовой трубы:

$\rho_{\text{возд}}^0$ ,  $\rho_{\text{г}}^0$  – плотности воздуха и газов при нормальных условиях;  $B$  – барометрическое давление, мм рт. ст.;  $g$  – ускорение свободного падения;  $t_{\text{возд}}$  – температура окружающей среды.

Схема котла с естественной тягой, создаваемой дымовой трубой:

1 – котел; 2 – дымовая труба



# Дымосос и дутьевой вентилятор

Выбор дымососа (ДС) и дутьевого вентилятора (ДВ) производится на основании теплового и аэродинамического расчетов КА по специальной литературе.

Производительность ДВ определяется по формуле:

$$Q_{\text{ДВ}} = 1,1 B_p V^0 \alpha_T \frac{(t + 273) 760}{273 B}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

Производительность ДС определяется по формуле:

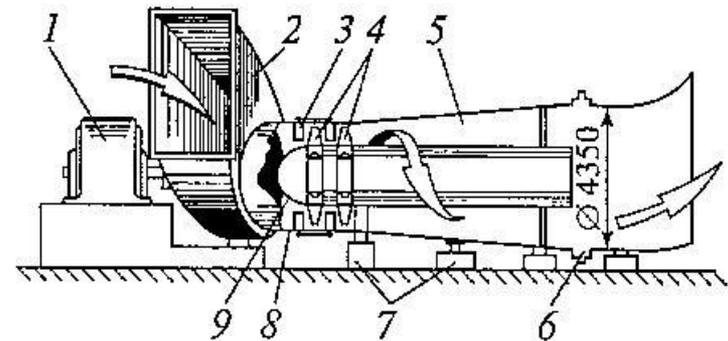
$$Q_{\text{ДС}} = 1,1 B_p V_{\text{г}} \frac{(t_{\text{yx}} + 273) 760}{273 B}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

где: 1,1 – коэффициент запаса по производительности;  $B_p$  – часовой расход топлива, кг/ч, кг/м<sup>3</sup>;  $V^0$  – теоретическое количество воздуха, необходимого для горения, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;  $V_{\text{г}}$  – количество дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $B$  – барометрическое давление, мм рт. ст.;  $t$  и  $t_{\text{yx}}$  – температура воздуха и уходящих газов, °С.

Полное расчетное давление (напор) определяется по формуле:  $H = 1,2 \Delta S, \quad \text{Н/м}^2$

где:  $\Delta S$  – полное сопротивление воздушного или газового тракта, Н/м<sup>2</sup>; 1,2 – коэффициент запаса по напору

Устройство ДС осевого типа:



# Тепловой баланс КА

**Тепловой баланс** парового котла – равенство между поступившим в агрегат при сжигании топлива количеством теплоты  $Q_p^p$  (располагаемая теплота) и суммой использованной теплоты  $Q_1$  и тепловых потерь.

На основе теплового баланса находят КПД котла и расход топлива.

При установившемся режиме работы КА тепловой баланс для 1 кг или 1 м<sup>3</sup> сжигаемого топлива определяется как:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

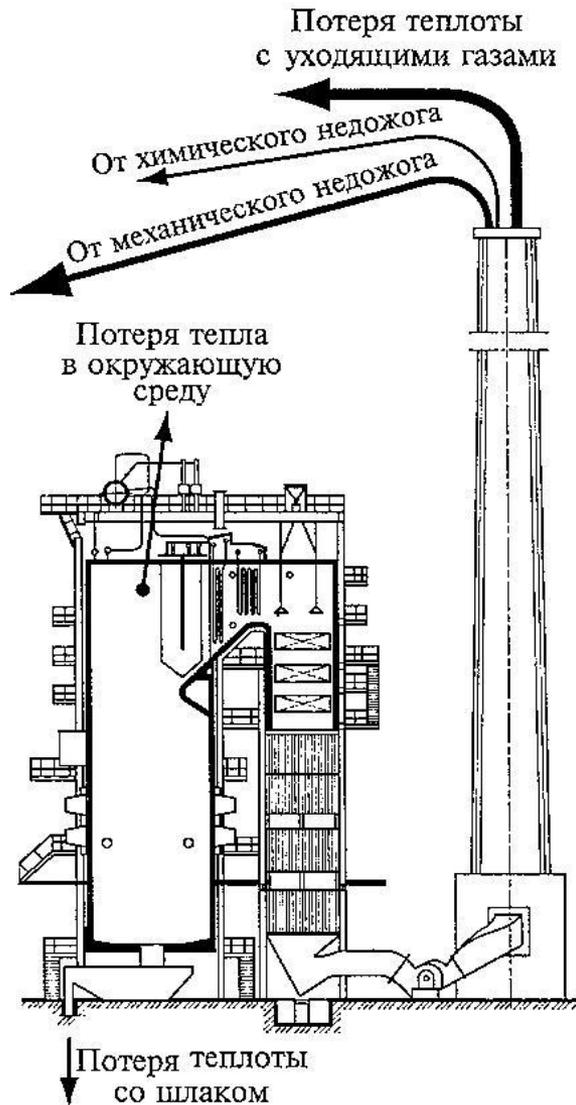
где:  $Q_p^p$  – располагаемая рабочая теплота, приходящаяся на 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_1$  – использованная теплота;  $Q_2$  – потери теплоты с уходящими из КА газами;  $Q_3$  – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;  $Q_4$  – потери теплоты от механической неполноты сгорания;  $Q_5$  – потери теплоты в окружающую среду через внешнее ограждение котла;  $Q_6$  – потери теплоты с физической теплотой шлака.

$Q_p^p$  включает в себя все виды теплоты, внесенной в топку вместе с топливом:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{ф.т} + Q_{возд.вн} + Q_ф$$

$Q_H^p$  – низшая рабочая теплота сгорания топлива;  $Q_{ф.т}$  – физическая теплота топлива, включая полученную при подсушке и подогреве;  $Q_{возд.вн}$  – теплота воздуха, полученная им при подогреве вне котла;  $Q_ф$  – теплота, вносимая в топку с форсуночным паром.

# Тепловые потери КА



В расчетах используют уравнение теплового баланса, выраженное в % по отношению к располагаемой теплоте  $Q_p^p$ , принимаемой за 100%:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%$$

где  $q_1 = Q_1 * 100 / Q_p^p$ ;  $q_2 = Q_2 * 100 / Q_p^p$  и т.д.

Использованная теплота  $Q_1$  передается рабочему телу

$$Q_1 = \frac{D_1}{B} (i_{п.п} - i_{п.в})$$

где  $D_1$  – производительность котла, кг/с;  $B$  – расход топлива, кг/с или м<sup>3</sup>/с;  $i_1$ ,  $i_{п.в}$  – энтальпии перегретого пара и питательной воды, кДж/кг.

- $q_1$  – полезное тепло, которое пошло на образование пара
- $q_2$  – потери тепла с уходящими газами (5 ... 8%)
- $q_3$  – потери тепла от химической неполноты сгорания топлива (недожога) – образуются CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> ... (0,5%)
- $q_4$  – потери тепла от механического недожога (0,5 ... 5%)
- $q_5$  – потери тепла в окружающую среду (0,3 ... 3,5%)
- $q_6$  – потери тепла с физической теплотой шлака

# КПД и расход топлива

Совершенство тепловой работы КА оценивается КПД брутто  $\eta_{\text{к}}^{\text{бр}}$ , %.

По **прямому балансу**:

$$\eta_{\text{к}}^{\text{бр}} = q_1 = \frac{Q_1 100}{Q_{\text{р}}^{\text{р}}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{р}}^{\text{р}} B} = \frac{Q_{\text{полезн}}}{Q_{\text{введ}}} = \frac{D_{\text{п}} (i_{\text{пп}} - i_{\text{пв}})}{B_{\text{р}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}}$$

где  $Q_{\text{к}}$  – теплота, полезно отданная котлу, выраженная через тепловосприятие поверхностей нагрева, кДж/с;  $D_{\text{п}}$  – расход котловой воды на продувку, кг/с;  $i_{\text{пп}}$ ,  $i_{\text{пв}}$  – энтальпии перегретого пара и питательной воды, кДж/кг;  $B_{\text{р}}$  – расчетный расход топлива, кг/с.

$$B_{\text{р}} = B \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right)$$

По **обратному балансу**:

$$\eta_{\text{КА}} = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i$$

**Расход** подаваемого в топку **топлива**:  $B = Q_{\text{к}} 100 / Q_{\text{р}}^{\text{р}} \eta_{\text{к}}^{\text{бр}}$

Лектор:

Кошарная Юлия Васильевна

к.т.н., доцент кафедры ЭППЭ НИУ «МЭИ»

E-mail: [kosh\\_yulia@mail.ru](mailto:kosh_yulia@mail.ru)

Тел. (495) 362-73-86; 8-925-524-11-39

Спасибо за внимание.