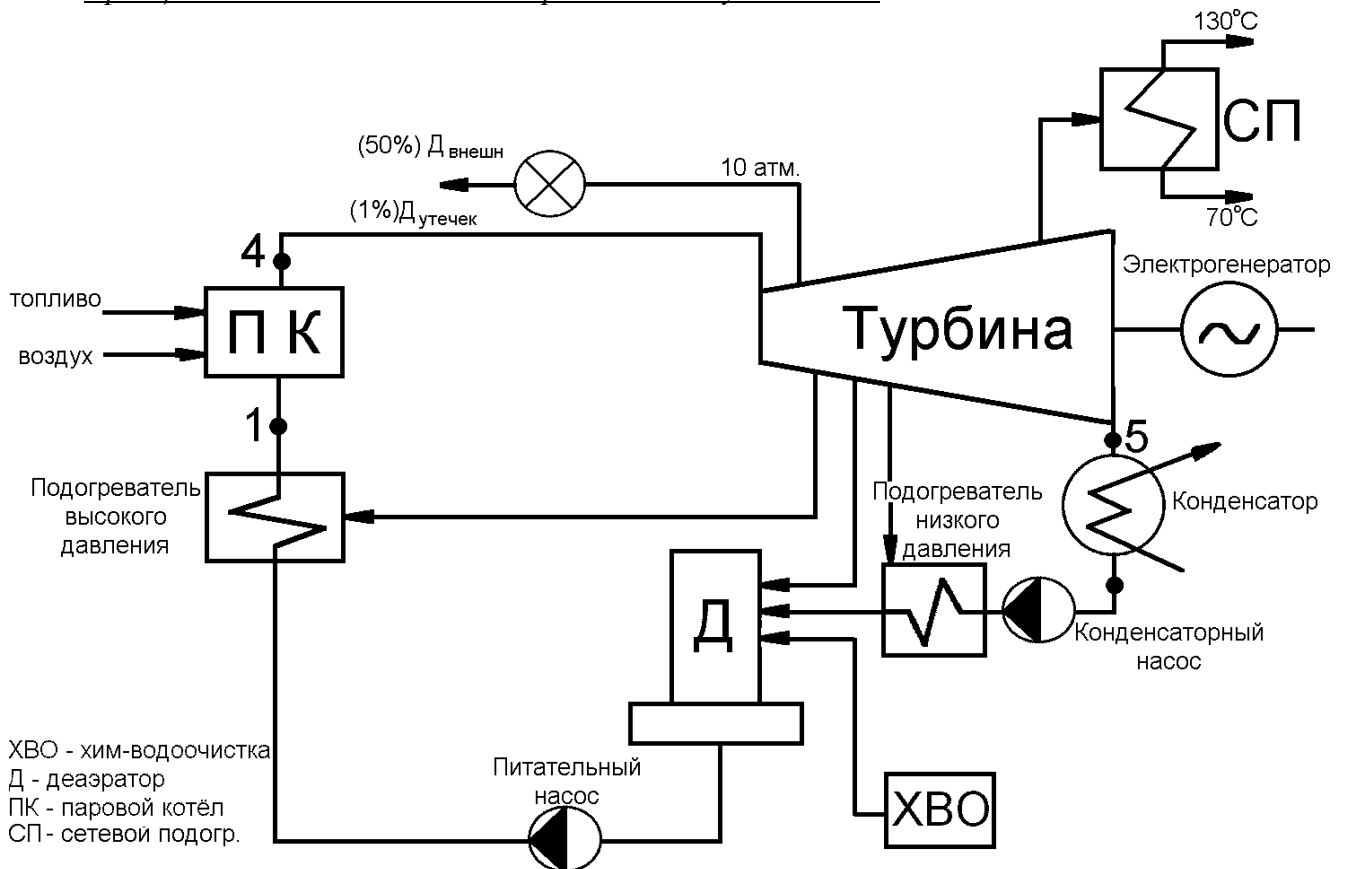


**Конспект лекций  
на тему:  
«Котельные  
установки»**

**Щелыгин Б.Л.**

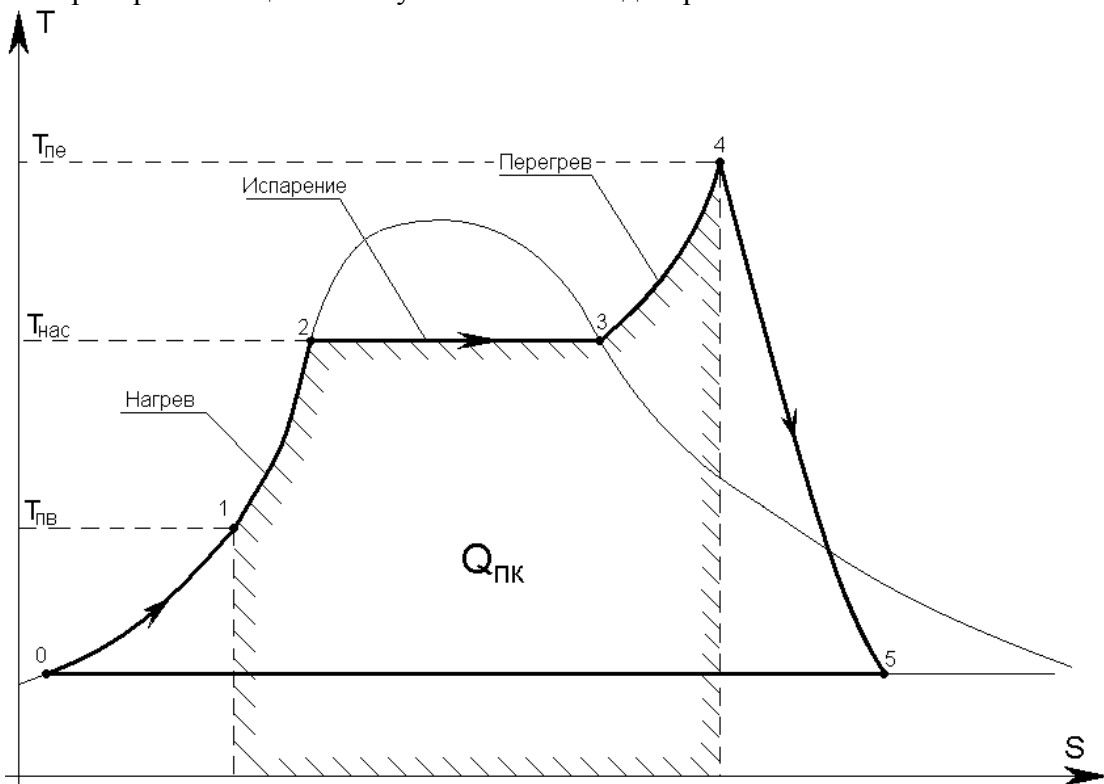
# Лекция №1 «Роль котлов в промышленной теплоэнергетике».

Принципиальная схема тепло-энергетической установки:



Деаэратор удаляет из воды  $O_2$  и  $CO_2$

Рассмотрим рабочий цикл этой установки в T-S диаграмме:



(1-2-3-4) – нагрев воды, её испарение, перегрев пара.

(4-5) – расширение пара в турбине.

(5-0) – конденсация пара.

(0-1) – регенеративный подогрев конденсата и питательной воды (для уменьшения расхода теплоты на нагрев пара).

Схема котельной установки и принципы её работы:

Уголь ( $s_{dk} < 25$  мм) транспортёром (1) ссыпается в бункер (2), затем питателем (3) подаётся в мельницу (5), где размалывается и подсушивается первичным воздухом. Он выносит пыль в сепаратор (8), где крупные частицы отделяются и возвращаются на домол. Мелкая пыль ( $40 - 100$  мкм  $d_{пл}$ ) первичным воздухом через амбразуру (9) вдувается в топку (10) и сгорает факельным способом в потоке вторичного воздуха (температура в ядре факела  $v_{я} = 1600?1800^{\circ}\text{C}$  (буквой  $v$  обозначаются температуры греющей среды)). Засчёт теплообмена факела с экранами в трубах (13) образуется пароводяная смесь, которая движется по **контру естественной циркуляции** (см. далее). Температура газов на выходе из топки  $v_{т}'' = 900?1100^{\circ}\text{C}$ . В пароперегревателе (15) пар нагревается от  $t_{нас}$  до  $t_{пе} = 400?550^{\circ}\text{C}$ , а газы охлаждаются. В экономайзере (16) вода нагревается от  $t_{п.в.} = 102?260^{\circ}\text{C}$  до  $t_{эк}'' \approx t_{нас}$ , охлаждая газы до  $v_{эк}'' \approx 350?450^{\circ}\text{C}$ . В ВЗП воздух нагревается от температуры  $t_{в.п.} = 30?80^{\circ}\text{C}$  до температуры горячего воздуха  $t_{г.в.} = 200?420^{\circ}\text{C}$ . Температура уходящих газов  $v_{ух} = 120?180^{\circ}\text{C}$  (дальнейшая утилизация экономически нецелесообразна). Уходящие газы очищаются в золоуловителе (19) и дымососом (20) через дымовую трубу (21) удаляются в атмосферу.

Первичный воздух служит в качестве:

- сушильного агента,
- транспортного агента.

Вторичный воздух необходим для обеспечения полноты сгорания топлива.

Контур естественной циркуляции (см. рис. 2):

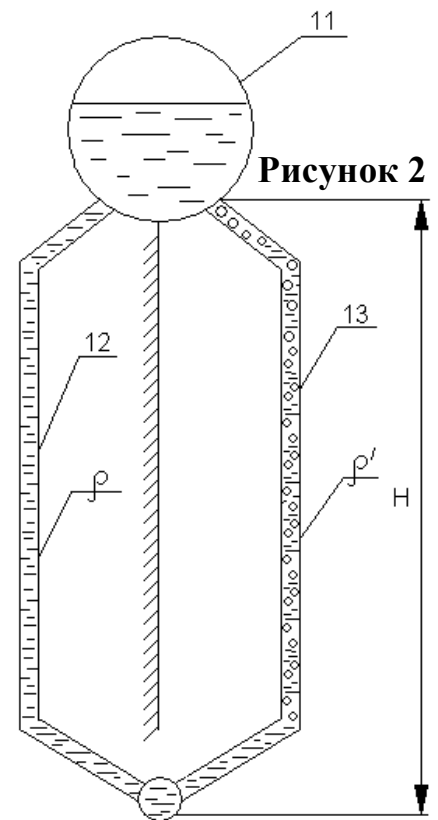
$$P_{оп} = H \cdot g \cdot \rho' \quad P_{под} = H \cdot g \cdot \rho_{см}$$

$$\text{Движущий напор } S_{дв} = P_{оп} - P_{под} = H \cdot g (\rho' - \rho_{см})$$

Контур естественной циркуляции 11–12–13–11.

Рабочие тракты:

1. топливный
2. газовый
3. воздушный
4. водопаровой



## Лекция №2

### Энергетическое топливо.

Это горючие вещества, которые намеренно сжигают, чтобы получить значительные количества теплоты. Общая классификация по агрегатному состоянию:

<i>Твёрдое</i>	<i>Жидкое</i>	<i>Газовое</i>
<i>естественные</i>		
<i>Древесин, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит</i>	<i>Нефть</i>	<i>Природный газ</i>
<i>искусственные</i>		
<i>Брикеты, кокс</i>	<i>Моторные топлива</i>	<i>Генераторный газ</i>
<i>отходы</i>		
<i>Отходы углерода</i>	<i>Мазут</i>	<i>Доменный и коксовый газ</i>

Твёрдое топливо образовалось из останков растений в результате длительного разложения без доступа воздуха.

#### Стадии преобразования

1) *торфяная* – разложение на открытом воздухе и впоследствии под водой. С – min, О – max.

2) *буро-угольная* – разложение продолжается под слоем земли при давлении свыше 100 атм. С – растёт, О – падает.

3) *каменно-угольная* – аналогично стадии 2. Содержание С достигает максимума, О – минимума.

#### Технические характеристики

- 1) *Элементарный состав.*
- 2) *Влажность.*
- 3) *Зольность.*
- 4) *Выход летучих веществ.*
- 5) *Коксовый остаток.*
- 6) *Теплота сгорания.*

#### Элементарный состав топлива

*Горючая часть:*

Сложные хим. соединения состоящие из С, Н, S.

1. С = 20% (древесина) ? 70% (антрацит), 80?85% (мазут и газы).

горение  $C + O_2 = > CO_2 + 34 \text{ МДж/кг}$ .

Особенности:

- основное наполнение топлива.

2. Н = 2% (антрацит) ? 4% (древесина), 10?11% (мазут и газы).

горение  $2H_2 + O_2 = > 2H_2O + 121 \text{ МДж/кг}$

Особенности:

- больше выделение теплоты
- ускоряет воспламеняемость.

3.  $S_{\text{общ}} = S_{\text{гор}} + S_{\text{негор}} = \underset{\text{а}}{[S_{\text{орг}}]} + \underset{\text{б}}{[S_{\text{колч}}]} + \underset{\text{в}}{[S_{\text{сульф}}]}$

а) содержится в органических соединениях  $S + O_2 = > SO_2 + 9 \text{ МДж/кг}$

б) содержится в колчедане ( $FeS_2$ )  $FeS_2 + O_2 = > Fe_2O_3 + 3O_2$

в) содержится в сульфатах минеральной части топлива ( $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $FeSO_4$ )

S = 0, 1 ? 5%

Особенности:

- низкая теплота сгорания,

- образование токсичных газов (при сжигании  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ),
- низкотемпературная коррозия воздухоподогревателей ( $5\% \text{SO}_2 + \text{O} = > \text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 = > \text{H}_2\text{SO}_4$  если температура стенки ВЗП ниже точки росы  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , то последняя конденсируется и реагирует с металлом стенки  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 = > \text{Fe}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$ ).

*Балласт:*

<i>Внутренний</i>	<i>Внешний</i>
обусловлен содержанием кислорода и азота. $B_{\text{внутр}} = \text{O} + \text{N}$	влага и минеральные примеси. $B_{\text{внутр}} = \text{O} + \text{N}$
$\text{O} = 2 \quad ? \quad 25 \%$ Антр. Др.	влага = 5 ? 70 % Антр. Др.
$\text{N} = 0.2 \quad ? \quad 2 \%$	$\text{M} = 1 \quad ? \quad 60 \%$
1) $\uparrow(\text{O} + \text{N}) \rightarrow \downarrow(\text{C} + \text{H} + \text{S}) \rightarrow \downarrow\text{Q} \rightarrow \rightarrow \uparrow\text{B}$	Др. Угл
2) $\text{O}_2^{\text{ТОПЛИВА}}$	
3) $\text{N}_2^{\text{ТОПЛИВА}} \rightarrow \text{N}_2^{\text{ПР.СТ.}}$	

Виды исходной массы топлива

1) Рабочая – то, что поступает в котельную,

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + W^p + A^p = 100\%$$

2) Аналитическая – в условиях лаборатории,

$$C^a + H^a + S^a + O^a + N^a + W^a + A^a = 100\% \quad (W^a < W^p)$$

3) Сухая ( $W^p = 0$ ),

$$C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100\%$$

4) Горючая ( $W^p = 0, A^p = 0$ ),

$$C^g + H^g + S^g + O^g + N^g = 100\%$$

Для произвольного элемента справедливо  $X^p < X^a < X^c < X^g$

Переход от одной массы к другой осуществляется с помощью коэффициентов пересчёта:

Исходная масса	Искомая масса		
	Рабочая	Сухая	Горючая
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

При изменении табличного состава:  $\frac{X}{X_{\text{табл}}} = \frac{100 - W^p - A^p}{100 - W_{\text{табл}}^p - A_{\text{табл}}^p}$

Пример:

$$H^p = 2\% \quad W^p = 50\% \quad H^c = ? \quad H^c = \frac{H^p \cdot 100}{100 - W^p} = 4\%$$

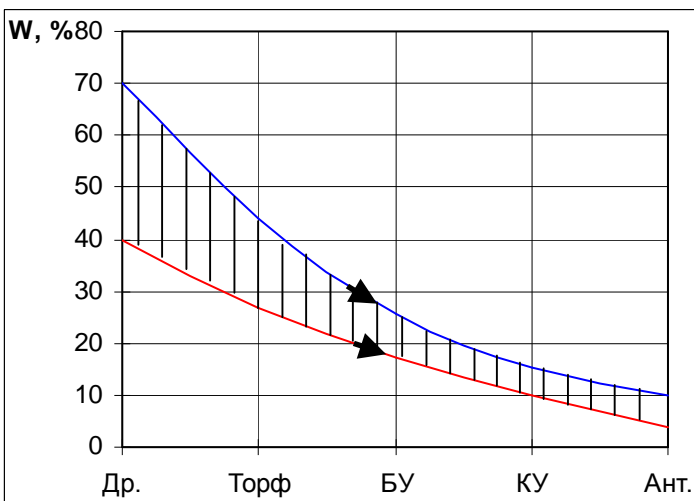
Влажность топлива

Примерный диапазон влажности рабочей массы топлива  $W^p = 5\text{?}70\%$

1) Внешняя - 3?10%, на поверхности кусков.



2) Капиллярная – 10?30%, содержится в полостях и капиллярах кусков древесины.



3) Коллоидная – 1% (Антрацит) ? 5% (КУ) ? 10% (БУ), удерживается органической частью топлива.

4) Гидратная – < 0, 1%, входит в состав кристаллогидратов минеральной части топлива ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) и не удаляется при сушке.

С увеличением геологического возраста снижается пористость топлива и уменьшается его влажность.

Влажность плохо влияет на работу котла:

1.  $\uparrow W \rightarrow \downarrow(C + H + S) \rightarrow \downarrow Q \rightarrow \uparrow B$
2. плохо воспламеняется и медленно горит;
3. низкая полнота сгорания;
4. нарушается сыпучесть;
5. смерзается;
6. корродирует оборудование;

### Зольность топлива

Характеристика его минеральной части до сжигания. Состав золы:

- 1)  $Al_2O_3$  10?40%
  - 2)  $SiO_2$  30?60%
  - 3)  $FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4$
  - 4)  $CaCO_3, MgCO_3, FeCO_3$
  - 5)  $CaSO_4, MgSO_4, FeSO_4$
  - 6)  $K_2O, Na_2O, 1?10\%$
- } 5?20%

Различают примеси:

- 1) *Первичные* – попали в топливо при его формировании.
- 2) *Вторичные* – попали при залегании.
- 3) *Третичные* – при добыче, транспортировке и хранении.

При сжигании происходят изменения в минеральной части:

- 1) при  $t = 150?400^\circ C$        $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = > Al_2O_3 + SiO_2 + 2H_2O$
- 2) при  $t = 400?600^\circ C$   $FeO + O_2 = > Fe_2O_3$
- 3) при  $t = 600?800^\circ C$   $CaCO_3 = > CaO + CO_2\uparrow, CaSO_4 = > CaO + SO_3\uparrow$

Зольность и минеральная часть топлива соотносятся примерно так:  $A^P = 0,95M^P$ .

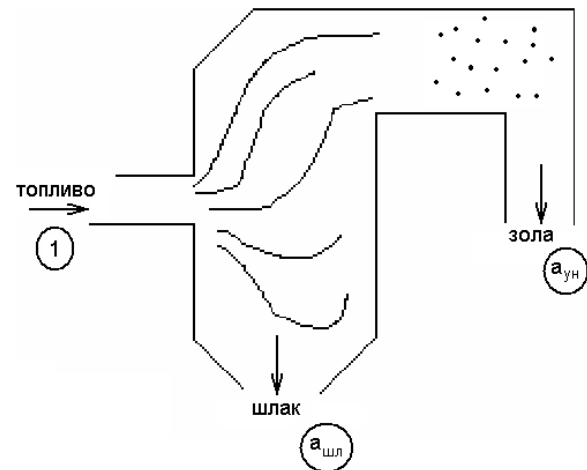
### Золовой баланс котла

Собственно баланс:  $1 = a_{шл} + a_{ун}$

После горения образуются очаговые остатки шлак ( $a_{шл}$  – доля шлакоудаления) и зола ( $a_{ун}$  – доля уноса золовых частиц).

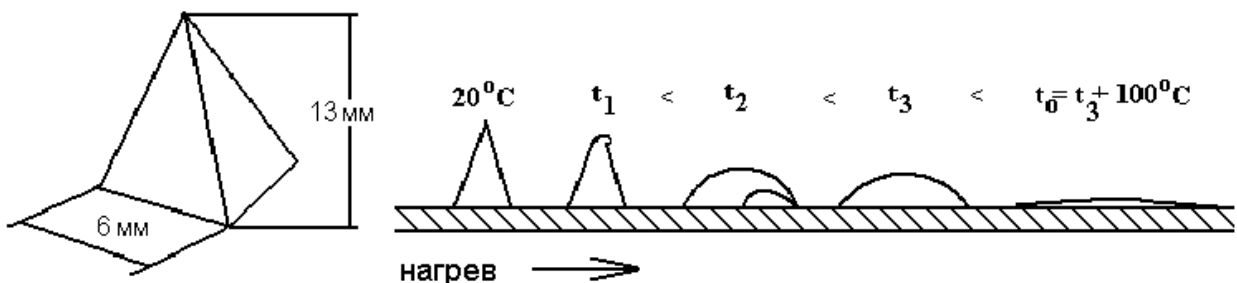
Зольность определяют в результате сжигания и прокаливания навески топлива (30 мин.,  $850^\circ C$ ):

$$A^a = \frac{m_{зол}}{m_{навески}} \cdot 100\%, \quad m_{навески} \approx 1 \pm 0,1г.$$



### Температурные характеристики золы

Нагревают образец золы и фиксируют характерные температуры.



$t_1$  = температура начала деформаций.

$t_2$  = температура размягчения.

$t_3$  = температура жидкоплавкого состояния.

$t_0$  = температура истинно жидкого состояния.

если  $t_3 < 1350^\circ\text{C}$  – легкоплавкая зола.

$1350^\circ\text{C} < t_3 < 1450^\circ\text{C}$  – среднеплавкая зола.

$t_3 > 1450^\circ\text{C}$  – тугоплавкая зола.

Компонент	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$
$t_{\text{пл-ия}}, ^\circ\text{C}$	900	1000	1600	2100	2600

Температурные характеристики необходимо знать для:

1) правильного выбора топочного режима

БУ  $\nu_T'' \leq 1000^\circ\text{C}$

КУ  $\nu_T'' \leq 1100^\circ\text{C}$

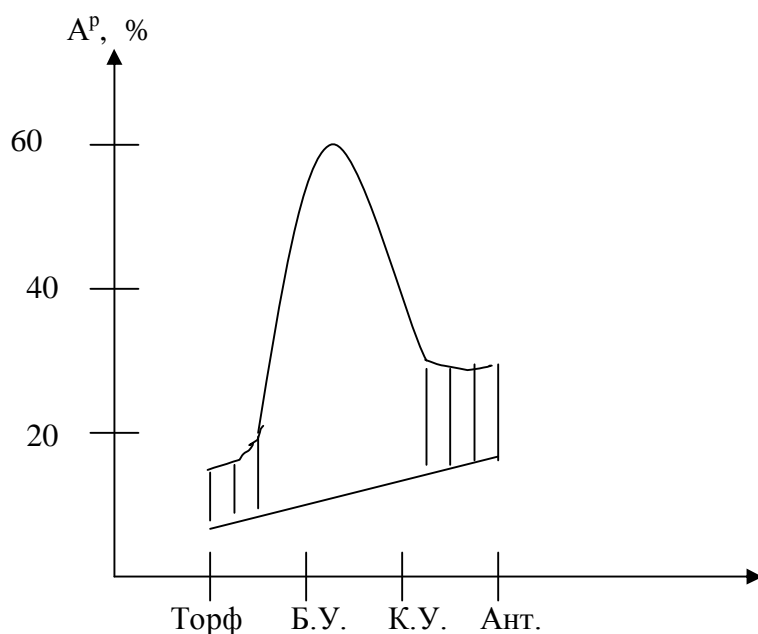
Если  $\nu_T'' > t_1$ , то расплавленные части попадут на фестон.

2) правильного выбора системы шлакоудаления (в твёрдом или жидком виде).

## Лекция №3

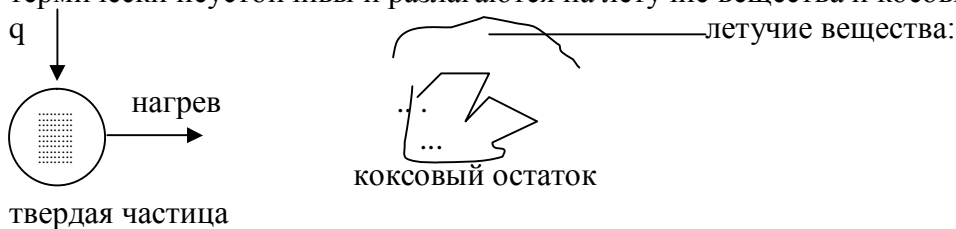
### Изменение зольности топлива. Отрицательное влияние зольности на работу котла:

1. с ростом зольности снижается содержание горючих веществ в топливе, следовательно, снижается удельная теплота сгорания топлива, а значит, растет расход топлива;
2. низкая полнота сгорания;
3. происходит загрязнение поверхностей нагрева, следовательно, снижается коэффициент теплопередачи, поэтому снижается количество теплоты, отдаваемое газами, а значит, растет температура уходящих газов;
4. истирание труб поверхностей нагрева золовыми частицами;
5. повышается нагрузка на систему шлакозолоудаления.



#### Выход летучих веществ.

Если топливо нагреть, то при  $t \leq 105^\circ\text{C}$  происходит испарение влаги, но никаких изменений органической части топлива не происходит. А при  $t > 105^\circ\text{C}$  органические соединения термически неустойчивы и разлагаются на летучие вещества и коксовый остаток.



Состав летучих веществ:

1. горючие газы ( $\text{CO} = 5\text{-}10\%$ ,  $\text{H}_2 = 10\text{-}30\%$ ,  $\text{CH}_4 = 20\text{-}40\%$ ),
2. негорючие газы ( $\text{CO}_2 = 10\%$ ,  $\text{N}_2 = 10\%$ ,  $\text{O}_2 = 5\%$ ).

Выход летучих веществ определяют по убыли массы навески при ее нагреве без доступа воздуха:

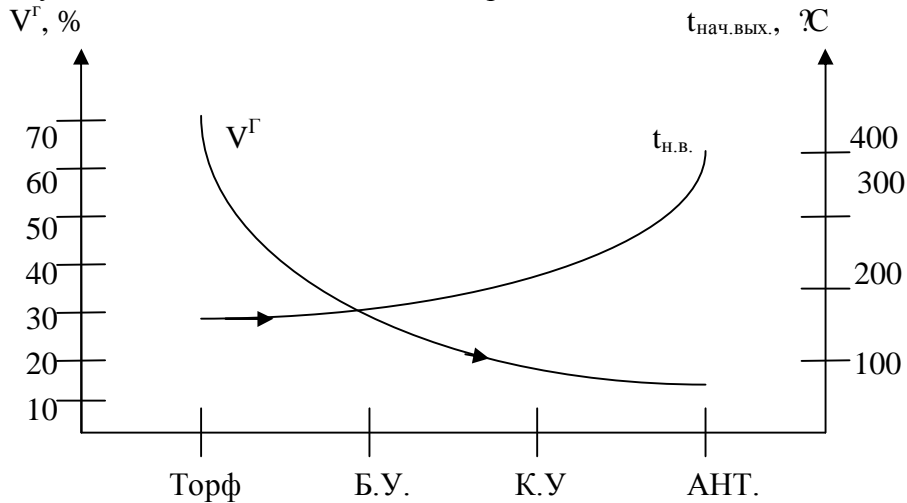
$$V^a = \frac{\Delta m_{\text{уб}}}{\Delta m_{\text{навески}}} \cdot 100\% , \text{ выход летучих веществ на аналитическую массу топлива.}$$

Время нагрева составляет 7 минут, нагрев осуществляется до  $850^\circ\text{C}$ .

На горючую массу топлива выход летучих веществ определяется по формуле:

$$V^r = V^a \cdot \frac{100}{100 - W^a - A^a}$$

С увеличением геологического возраста топлива  $V^Г$  снижается.



Коксовый остаток.

После выхода летучих веществ остается коксовый остаток, который состоит из углерода и минеральной части топлива.

Пары $H_2O$	Летучие вещества			Кокс		
W	H	N	O	C	S	A
Горючая часть						
Рабочая масса топлива						

Состав кокса:

1.  $C^Г \approx 96\%$
2.  $(O + N + S + H)^Г \approx 4\%$

Спекаемость углей.

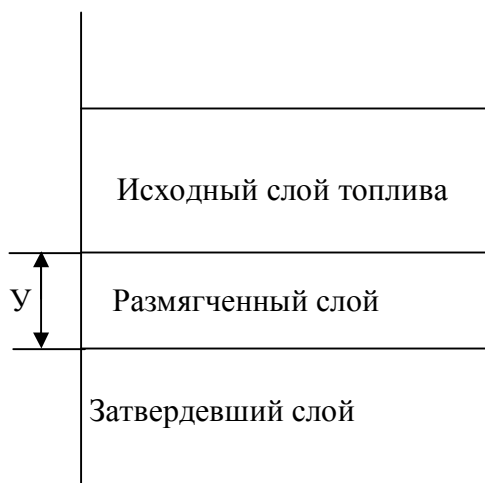
Спекаемость углей – это способность углей образовывать прочный кусковой кокс.

Особенности:

при нагреве топлива до 350-400°C, оно размягчается и затвердевает.

Спекаемость оценивают по толщине пластичного слоя

Пластометр:

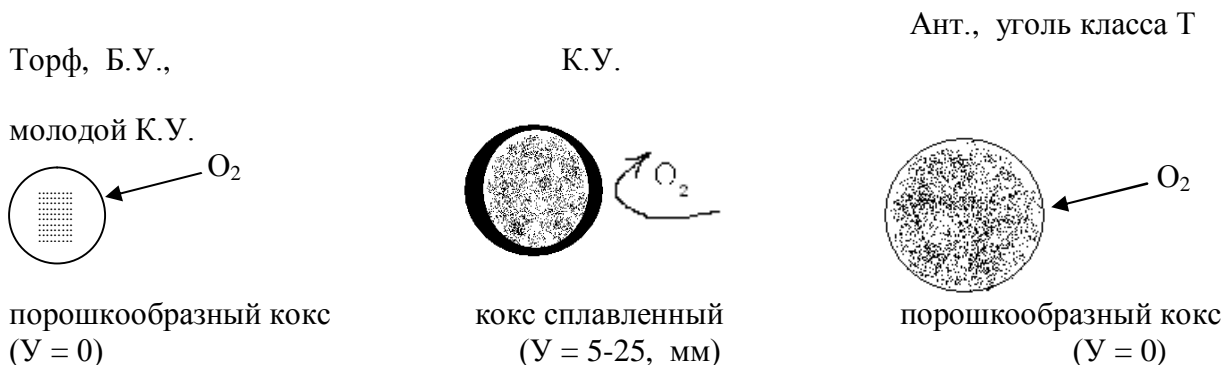


В пластометр засыпают 100г угля, нагревают и производят замеры.

По шкале ВТИ кокс делят:

1. порошкообразный ( $Y = 0$ );
  2. слипшийся ( $Y \approx 0$ );
  3. спекшийся;
  4. сплавленный;
  5. сильносплавленный;
  6. сильносплавленный вспученный.
- }  $Y = 5-25, \text{ мм}$

На практике целесообразно сжигать топливо с характеристикой кокса “порошкообразный” и “слипшийся”.



Теплота сгорания топлива.

Теплота сгорания топлива – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива.

1. Высшая теплота сгорания топлива

$$Q_{\text{в}}^{\text{п}} = 339 \cdot C^{\text{п}} + 1030 \cdot H^{\text{п}} + 109 \cdot (S - O)^{\text{п}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{формула Менделеева.}$$

2. низшая теплота сгорания

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = Q_{\text{в}}^{\text{п}} - Q_{\text{конд}}^{\text{H}_2\text{O}}; Q_{\text{конд}}^{\text{H}_2\text{O}} = r \cdot G_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ где } r - \text{скрытая теплота парообразования} = 2500,$$

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \text{ а } G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{W^{\text{п}}}{100} + 9 \cdot \frac{H^{\text{п}}}{100}, \frac{\text{кгH}_2\text{O}}{\text{кгтоплива}}$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = Q_{\text{в}}^{\text{п}} - 25 \cdot (W^{\text{п}} + 9 \cdot H^{\text{п}}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{на рабочую массу топлива;}$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{с}} = Q_{\text{в}}^{\text{с}} - 225 \cdot H^{\text{с}} - \text{на сухую массу топлива;}$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{г}} = Q_{\text{в}}^{\text{г}} - 225 \cdot H^{\text{г}} - \text{на горючую массу;}$$

При изменении влажности:

$$Q_{\text{н}2}^{\text{п}} = (Q_{\text{н}1}^{\text{п}} + 25 \cdot W_1^{\text{п}}) \cdot \frac{100 - W_2^{\text{п}}}{W_1^{\text{п}}} - 25 \cdot W_2^{\text{п}}$$

При изменении зольности:

$$Q_{\text{н}2}^{\text{п}} = Q_{\text{н}1}^{\text{п}} \cdot \frac{100 - A_2^{\text{п}}}{100 - A_1^{\text{п}}}$$

Теплоту сгорания определяют по тепловыделению в калориметре при сжигании навески топлива в стандартных условиях:

$$Q_{\text{б}}^{\text{а}} = \frac{k \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}})}{m_{\text{н}}}$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = \begin{matrix} 10 & 16 & 26, \\ \text{Торф} & \text{Б.У.} & \text{К.У.} \end{matrix} \text{ МДж/кг}$$

Характеристики твердых топлив.

Древесина:  $C^{\text{п}} = 25\%$ ,  $H^{\text{п}} = 4\%$ ,  $S = 0\%$ ,  $N = 1\%$ ,  $O_2 = 25\%$ ,  $W = 40\%$ ,  $A = 1\%$ ,  $V^{\text{г}} = 85\%$ ,

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 10 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Торф.

Виды:

I. По месту залегания:

1. низинный (на болотах);
2. верховой (боле высокие осушенные места);
3. смешанный.

II. По форме добычи:

1. в брикетах;
2. фрейзерный (крошка).

Состав:  $C^p = 30\%$ ,  $H^p = 4\%$ ,  $S = 0, 1\%$ ,  $N = 1\%$ ,  $O_2 = 15\%$ ,  $W = 35\%$ ,  $A = 5\%$ ,  $V^r = 70\%$ ,

$$Q_{н}^p = 11 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Бурый уголь.

Признаки:

1. бурый цвет;
2.  $V_p^r > 40\%$ ;
3.  $Q_{в}^p < 24 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ .

Особенности:

1. высокая влажность (классы влажности: Б1( $W > 40\%$ ), Б2( $W = 30-40\%$ ), Б3( $W < 30\%$ ));
2. высокая зольность  $A^p > 20\%$ ;
3. низкая  $Q_{н}^p = 10 - 16 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ ;
4. малая механическая прочность.

Каменные угли.

Признаки:

1. серый цвет;
2.  $V_p^r > 9\%$ ;
3.  $Q_{в}^p \cdot \frac{100}{100 - A^p} > 24 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ .

Особенности:

1. низкая влажность;
2. низкая зольность;
3. высокая механическая прочность.

Каменные угли классифицируют по выходу летучих веществ и характеристике коксового остатка:

№	Марка	Обозначение	$V^r$ , %	У, мм	Кокс
1	Длиннопламенный	Д	$> 40$	–	От порошкообразного до слипшегося
2	Газовый	Г	35-40	5	Сплавленный
3	Жирный	Ж	25-35	↑	Сплавленный
4	Коксовый	К	↑	6-20	Сплавленный
5	Отощенный спекающийся	ОС	17-25	↓	Сплавленный
6	Слабоспекающийся	СС	↓	5	Сплавленный
7	Тощий	Т	9-17	–	От порошкообразного до слипшегося

В энергетике сжигают угли марок 1, 2, 6, 7.

Антрацит.

Признаки:

1. черный цвет;
2.  $V_p^r < 9\%$ ;
3.  $Q_b^r > 30 \frac{МДж}{кг}$ .

Состав:  $C^p = 65\%$ ,  $H^p = 1,5\%$ ,  $S = 3\%$ ,  $N = 1\%$ ,  $O_2 = 2\%$ ,  $W = 7\%$ ,  $A = 22\%$ ,  $V^r = 4\%$ ,  
 $Q_H^p = 23 \frac{МДж}{кг}$

Антрациты классифицируют по размеру кусков:

Марка	Обозначение	$d_k, мм$
Плита	АП	> 100
Крупный	АК	50-100
Орех	АО	25-50
Мелкий	АМ	13-25
Семечко	АС	6-13
Штыб	АШ	< 6
Рядовой	АР	Неограниченно

## Лекция №4

### Приведенные характеристики топлива.

Для сравнения экономичности котлов сжигающих различное топливо введено условное топливо.

$$Q_{н.(усл.)}^p = 29,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

$$V_{усл.} = V_{нат.} \cdot \frac{Q_{н.}}{Q_{усл.}}$$

Для оценки массовых расходов влаги, золы и серы существуют приведенные характеристики:

$$1. W^п = \frac{W^p}{Q_n^p}$$

Если  $W^п < 0.75$ , то топливо маловлажное, если же  $W^п > 2$  – высоковлажное.

$$2. A^п = \frac{A^p}{Q_n^p}$$

Если  $A^п < 1$ , то топливо малозольное, а если  $A^п > 4$  – высокозольное.

$$3. S^п = \frac{S^p}{Q_n^p}$$

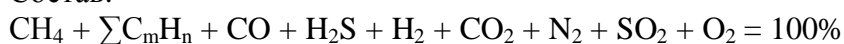
Если  $S^п > 0,05$  – мазут высокосернистый, если  $S^п > 0.2$  – высокосернистый уголь.

Изменение характеристик топлива:

Топливо	C <sup>г</sup> , %	O <sup>г</sup> , %	H <sup>г</sup> , %	V <sup>г</sup> , %	Q <sub>н</sub> <sup>в</sup> , %
Дерево	50	43	6	85	10
Торф					
Б.У.					
К.У.					26
Ант.	93	2	2	4	23

### Газовое топливо.

Состав:



$CH_4 + \sum C_m H_n + CO + H_2S + H_2$  – горючие вещества,

$CO_2 + N_2 + SO_2 + O_2$  – негорючие вещества.

$$Q_n^B = 0,01 \cdot (CH_4 \cdot Q_{CH_4} + \sum C_m H_n \cdot Q_{\sum C_m H_n} + CO \cdot Q_{CO} + H_2S \cdot Q_{H_2S} + H_2 \cdot Q_{H_2}), \frac{МДж}{кг}$$

### Природный газ.

Имеет органическое происхождение. Природный газ образовался в полостях земли при давлении более 200 атм.

Месторождения:

1. Тюменская область;
2. Республика Коми;
3. Южный Урал;
4. Ставрополье.

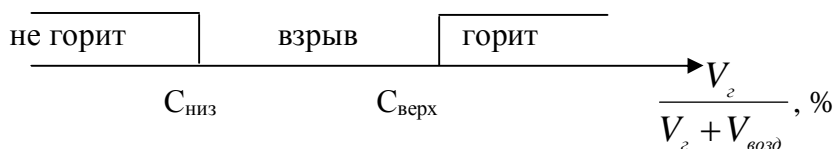
Состав:

$$CH_4 + \sum C_m H_n + CO_2 + N_2 = 100\%.$$

$$CH_4 = 70-99\%, \sum C_m H_n = 1-10\%, CO_2 < 2\%, N_2 < 14\%.$$

Особенности:

1. Отсутствие внешнего балласта (влажность и зольность),
2. мало внутреннего балласта ( содержание азота менее 14%, а кислорода равно 0%),
3. содержание серы равно 0%,
4. высокая удельная теплота сгорания ( $Q_{н.}^c = 34-38, \frac{МДж}{м^3}$ ),
5. плотность  $\rho_r = 0,7-0,9, \frac{кг}{м^3}$ ,
6. взрываемость



7. токсичность за счет CO, H<sub>2</sub>S  
ПДК<sub>CO</sub> = 0,024%(предельная допустимая концентрация),  
ПДК<sub>H<sub>2</sub>S</sub> = 0,01%.
8. нет цвета и запаха.

Для обнаружения природного газа в него вводят одерант в количестве 10 г на 1000 м<sup>3</sup> газа.

### Попутный газ.

Образуется при добыче нефти, при резком снижении давления.

Состав:

$$CH_4 = 40-60\%, \sum C_m H_n = 25-35\%, N_2 = 20\%.$$

$$Q_{н.}^c = 36-46 \frac{МДж}{м^3}$$

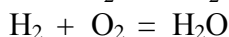
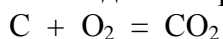
### Подземный (генераторный) газ.

Воздух (O<sub>2</sub> = 21%)

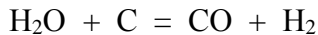


генераторный газ + O<sub>2</sub>  
порода  
угольный пласт

Во входном штреке происходит окисление С и Н:



В выходном же штреке протекают восстановительные реакции:

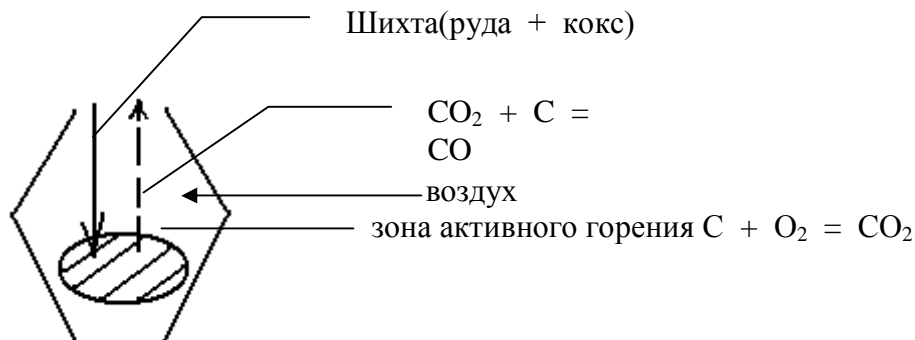


Состав:

$\text{CO} = 15\%$ ,  $\text{H}_2 = 15\%$ ,  $\text{CO}_2 = 10\%$ ,  $\text{N}_2 = 60\%$ .

$$Q_{\text{н.}}^{\text{с}} = 4 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

#### Доменный газ.



Состав:

$\text{CO} = 30\%$ ,  $\text{H}_2 = 1\%$ ,  $\text{CO}_2 = 10\%$ ,  $\text{N}_2 = 60\%$ .

$$Q_{\text{н.}}^{\text{с}} = 4 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

#### Коксовый газ.

Получается при производстве кокса при  $t = 500 - 1000^\circ\text{C}$ .

Состав:

$\text{CH}_4 = 25\%$ ,  $\text{H}_2 = 45\%$ ,  $\text{N}_2 = 5\%$ .

$$Q_{\text{н.}}^{\text{с}} = 38 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

#### Жидкое топливо.

Природное топливо – нефть, имеющая органическое происхождение, представляет собой смесь жидких углеводородов. Добывается через скважины за счет собственного давления.

Месторождения:

1. Тюменская область;
2. Республика Коми;
3. Башкирия;
4. Татарстан;
5. Северный Кавказ.

Мазут – остаток нефтепереработки на нефтеперерабатывающем заводе = 25-40%.

$t_{\text{кип}} = 200 \quad - \quad 250 \quad - \quad 300 \quad - \quad 350, \text{ }^\circ\text{C}$   
бензин                      керосин                      дизельное топливо                      мазут

Состав мазута:

$\text{C}^{\text{p}} = 84\%$ ,  $\text{H}^{\text{p}} = 11\%$ ,  $\text{S}^{\text{p}} = 0,3-3\%$ ,  $(\text{N} + \text{O}_2)^{\text{p}} = 0,5\%$ ,  $\text{W}^{\text{p}} = 3\%$ ,  $\text{A}^{\text{p}} = 0,1\%$ .

$$Q_{\text{н.}}^{\text{p}} = 40 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Марки мазута:

1. Флотские Ф5, Ф12;
2. топочные М40, М100;
3. мартеновских печей МП.

Если  $\text{S}^{\text{p}} < 0,5\%$ , то мазут малосернистый;

Если  $\text{S}^{\text{p}} = 0,5-2\%$ , то сернистый;

Если  $\text{S}^{\text{p}} > 2\%$ , то высокосернистый.

Температурные характеристики:

1. Вязкость. Она влияет на продолжительность слива, на эффективность перекачивания насосами и на качество распыления форсунками.

Условная вязкость:

$$\text{ВУ}_t = \frac{\tau_{\text{маз}}^t}{\tau_{\text{H}_2\text{O}}^{20^\circ\text{C}}}, \text{ ?УВ. С ростом температуры вязкость снижается.}$$

2. Температура застывания – температура, при которой мазут теряет свою текучесть.

Испытания на текучесть происходят так:

в пробирку наливают мазут; охлаждают до определенной температуры; затем пробирку наклоняют (45°), если в течение минуты уровень жидкости в пробирке не стал параллелен горизонту, то мазут застыл.

$$t_{\text{заст.}} = 10-40^\circ\text{C}$$

3. Температура вспышки – температура мазута, при которой его пары образуют горючую смесь, вспыхивающую при поднесении пламени.

$$t_{\text{всп}} = 90-140^\circ\text{C}$$

4. Температура воспламенения – температура мазута, при которой пары воспламеняются и горят более 5 секунд.

$$t_{\text{восп}} = t_{\text{всп}} + 15^\circ\text{C}$$

5. Плотность  $\rho_{\text{маз}} = 0,96 - 1,05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

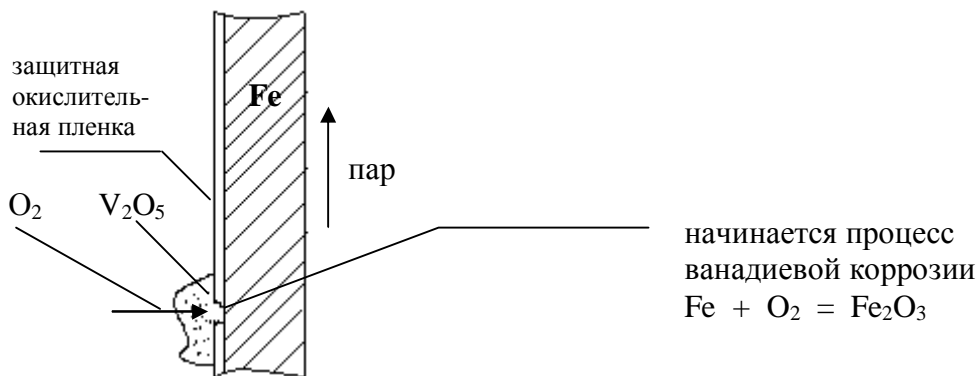
При эксплуатации влажность возрастает до 6–15%, возникает эффект обводнения. В результате обводнения:

а) снижается  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  (так как снижается концентрация горючих элементов), а значит растет расход топлива В;

б) снижается температура пламени в топке, поэтому снижается паропроизводительность котла;

в) растет объем водяных паров  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ , а значит растет температура уходящих газов, поэтому снижается КПД котла.

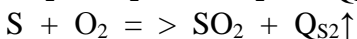
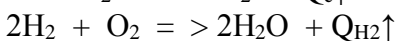
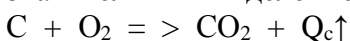
6. Зольность мазута очень мала  $A^{\text{р}} < 0,1\%$ , но она на 50% состоит из пятиоксида ванадия  $V_2O_5$  ( $t_{\text{пл}} = 700^\circ\text{C}$ ). Она разрушает защитную окислительную пленку на поверхностях нагрева, открывая доступ кислорода к металлу, и начинается процесс ванадиевой коррозии.



### Топочные процессы.

C, H, S – горючие элементы.

Горение – химический процесс окисления горючих элементов кислородом, протекающий при высокой температуре, с высокой скоростью и сопровождающийся значительным выделением теплоты.



Горение



полное  
(образуются продукты  
CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>)

неполное  
(дополнительно образуются  
CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

Причины неполноты горения:

1. локальный недостаток окислителя:  
C + 0,5O<sub>2</sub> = > CO
2. температура газов < 1000°C, либо > 2000°C;
3. недостаточный контакт горючих элементов и окислителя.

Расчет процессов горения твердого (жидкого) топлива.

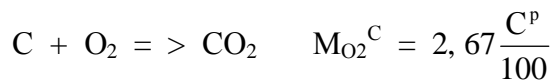
Топливо: C + H + S + O + N + W + A = 100%

Топочные газы: (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + SO<sub>2</sub>) + (CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) + N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub><sup>изб</sup> = 100%

Воздух: O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> = 100%

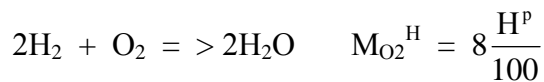
Элементарные реакции горения:

1. горение C



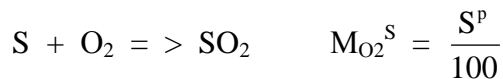
$$\begin{array}{ccc} 12 & 32 & 44 \\ \text{кг} & 2,67\text{кг} & 3,67\text{кг} \end{array}$$

2. горение H



$$\begin{array}{ccc} 4 & 32 & 36 \\ \text{кг} & 8\text{кг} & 9\text{кг} \end{array}$$

3. горение S



$$\begin{array}{ccc} 32 & 32 & 64 \\ \text{кг} & 1\text{кг} & 2\text{кг} \end{array}$$

Теоретический расход O<sub>2</sub>:

$$M_{O_2} = M_{O_2}^C + M_{O_2}^H + M_{O_2}^S - M_{O_2}^{\text{топл}} = 2,67 \frac{C^p}{100} + 8 \frac{H^p}{100} + \frac{S^p}{100} - \frac{O^p}{100}, \frac{\text{кг}O_2}{\text{кгтопл}}$$

Теоретический объем воздуха – это то количество воздуха, которое необходимо израсходовать для полного сжигания 1 кг топлива, при условии, что весь кислород прореагировал с горючими.

$$V^0 = \frac{M_{O_2}}{S_{O_2}} \cdot \frac{100}{21} = 0,085C^p + 0,265H^p + 0,033(S - O)^p, \frac{M^3}{\text{кг}}$$

С увеличением балласта V? снижается

$$V? = 3 \quad - \quad 6 \quad - \quad 10, \frac{M^3}{\text{кг}}$$

Б.У. Антр. Мазут

## Лекция №5

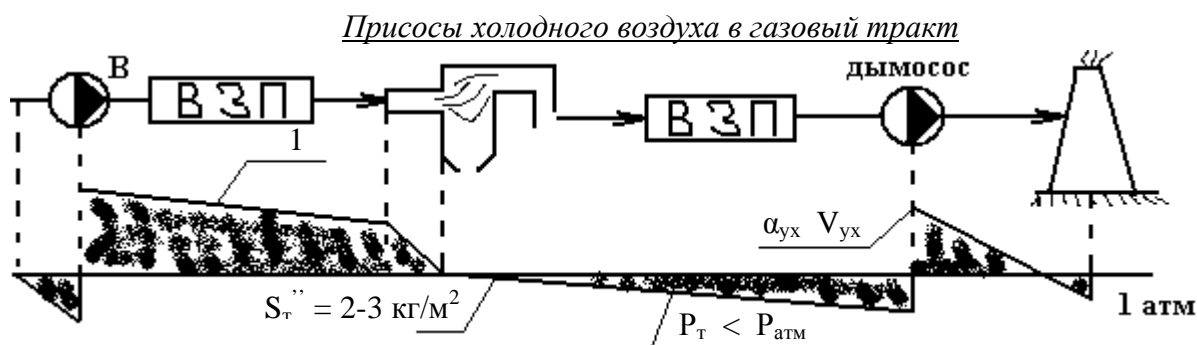
### Коэффициент избытка воздуха.

В топке не удаётся обеспечить идеального перемешивания горючего с окислителем. При подаче  $V$ ? (т.е. объёма воздуха фактически необходимого для сжигания данной массы топлива) происходит недожог. Для полноты сгорания воздух подают с избытком  $V_B$ .

$$\alpha = \text{коэф. избытка воздуха} = \frac{V_B}{V^\circ} = \frac{V^\circ + V_B}{V^\circ} > 1$$

$\alpha_{\text{топочной камеры}}$  зависит от:

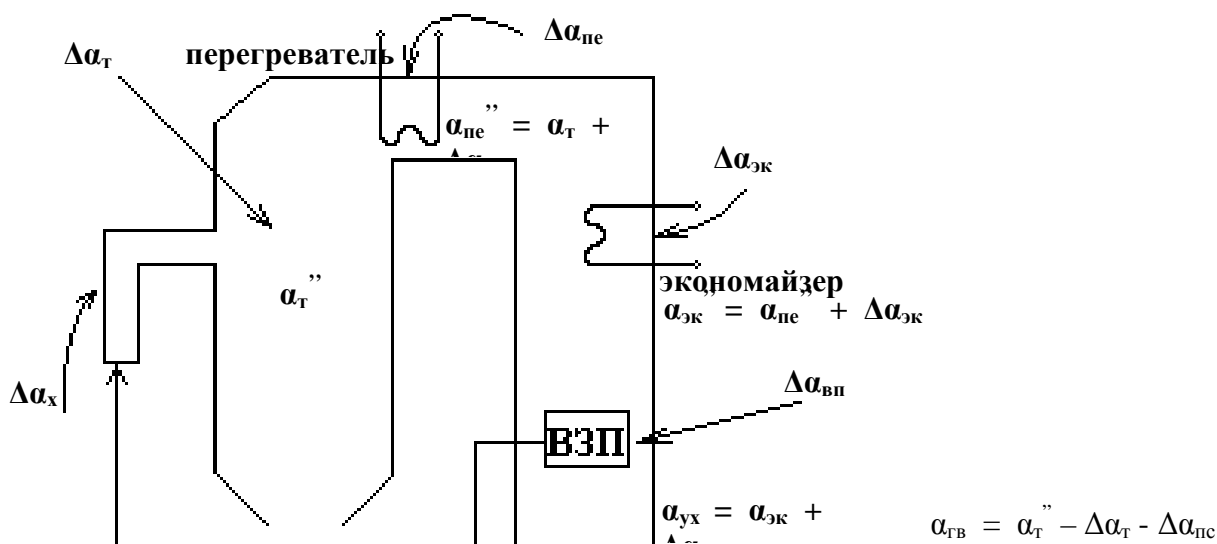
- 1) способа сжигания (факельное сжигание твёрдого топлива  $\alpha_T'' = 1,2?1,25$ , слоевое сжигание  $\alpha_T'' = 1,4?1,7$ ).
- 2) вида и марки топлива (природный газ и мазут  $\alpha_T'' = 1,05?1,1$ ).
- 3) конструкции горелочного устройства.



1- уравновешенная тяга (работает и вентилятор и дымосос).

Обмуровка котла имеет неплотности, т.к. за счёт работы дымососа газоходы находятся под разрежением, поэтому холодный воздух присасывается к газам, увеличивая при этом коэф. избытка воздуха и объём уходящих газов.

$$\alpha_{yx} = \alpha_T + \Delta\alpha \quad V_{yx} = V_T + \Delta V_B$$



Присосы влияют отрицательно:

- 1)  $\Delta\alpha_T \uparrow \rightarrow v_{\text{ср. фак}} \downarrow \rightarrow q_T \downarrow \rightarrow D \downarrow \rightarrow B \uparrow$ ,
- 2)  $\Delta\alpha_T \uparrow \rightarrow v_T \downarrow \rightarrow \Delta t \downarrow = v_T - t_{\text{п.с.}} \rightarrow Q_{\text{отд}} \downarrow \rightarrow v_{yx} \uparrow \rightarrow \text{КПД} \downarrow$ ,
- 3)  $\Delta\alpha \uparrow \rightarrow v_{yx} \uparrow \rightarrow v_{\text{дым}} \uparrow$ .

#### Меры борьбы с присосом

- 1) уплотнение обмуровки.
- 2) В и Д настраивают так, чтобы  $S_T'' = \min (2?3) \text{ кг/м}^2$
- 3) Работа котла под наддувом (без дымососа, работает только мощный вентилятор).

## Расчёт объёмов продуктов сгорания твёрдого/жидкого топлива

При полном сгорании:

$$\alpha = 1: \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} = 100\%$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
RO<sub>2</sub> – трёхатомные газы (абстрактная характеристика).

$$\alpha > 1: \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 100\%$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$   
RO<sub>2</sub>

Теоретические объёмы ( $\alpha = 1$ ):

Объём 3-х атомных газов:

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} + \frac{M_{\text{SO}_2}}{\rho_{\text{SO}_2}} = 0,0187(C^P + 0,375 \cdot S^P) \text{ м}^3 / \text{кг};$$

Объём водяных паров:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}} = \underbrace{V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}}}_{\text{а}} + \underbrace{V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{W}}}_{\text{б}} + \underbrace{V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Возд}}}_{\text{в}} = 0,111 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,016 \cdot V^{\text{O}},$$

$$\text{а) } V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad \text{б) } V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{W}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{W}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{W^P}{100}, \quad \text{в) } V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Возд}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Возд}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\rho_{\text{Возд}} \cdot V^{\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \alpha_{\text{Возд}}.$$

Объём азота:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{O}} = V_{\text{N}_2}^{\text{Топл}} + V_{\text{N}_2}^{\text{Возд}} = 0,008 \cdot N^P + 0,79 \cdot V^{\text{O}}.$$

Суммарный объём:

$$V_{\Gamma}^{\text{O}} = V_{\text{R}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}} + V_{\text{N}_2}^{\text{O}}.$$

Действительные объёмы ( $\alpha > 1$ ):

$$V_{\text{RO}_2} = \text{const},$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^{\text{O}} + \Delta V_{\text{N}_2}^{\text{изб}} = V_{\text{N}_2}^{\text{O}} + 0,79(\alpha - 1) \cdot V^{\text{O}},$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}} + 0,016(\alpha - 1) \cdot V^{\text{O}},$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\text{O}}.$$

$$\text{Суммарный объём: } V_{\Gamma} = V_{\text{R}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}.$$

### Расчёт процессов горения газового топлива

Особенности:

1. Расчёты ведут на 1 м<sup>3</sup>,

2. Состав в объёмных процентах:

1. топливо:  $(\text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{CH}_4 + \text{C}_m\text{H}_n) + (\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{O}_2) = 100\%$

2. воздух:  $\text{O}_2 (21\%) + \text{N}_2 (79\%) = 100\%$ .

3. продукты сгорания:  $(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2) + (\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4) + \text{N}_2 + \text{O}_2 = 100\%$

Элементарные реакции горения:

1.  $2\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 \Rightarrow$  требуется  $V_{\text{O}_2}^{\text{CO}} = 0,5 \frac{\text{CO}}{100}$ , получается  $V_{\text{CO}_2}^{\text{CO}} = \frac{\text{CO}}{100}$ ;

2.  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow$  требуется  $V_{\text{O}_2}^{\text{H}_2} = 0,5 \frac{\text{H}_2}{100}$ , получается  $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2} = \frac{\text{H}_2}{100}$ ;



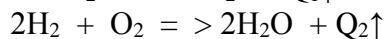
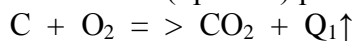


## Лекция №6

### Основы теории горения.

При горении:

1. Окислительные (прямые) реакции:



2. Восстановительные (обратные) реакции:



Различают горения:

1. гомогенное (горючие и окислитель в одном агрегатном состоянии);
2. гетерогенное (горючие и окислитель в разных агрегатных состояниях).

При гомогенном горении скорость реакции пропорциональна концентрации реагирующих веществ  $W_p = kA^m B^n$ .

При гетерогенном горении скорость горения пропорциональна концентрации кислорода  $W_p = kO_2^{\text{стенки}}$ .

$k$  – константа скорости химической реакции.

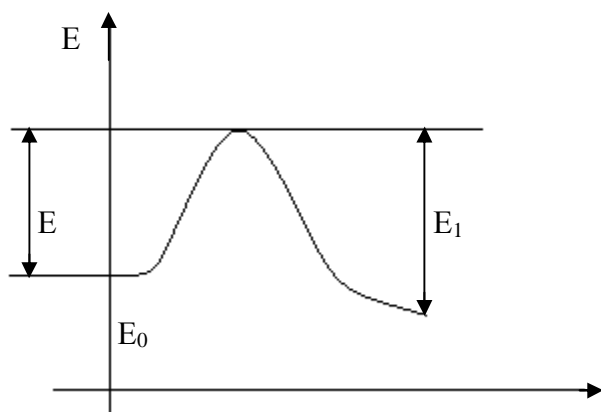
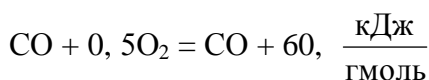
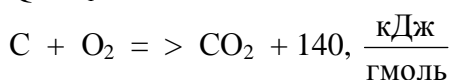
$$k = k_0 e^{-E/RT}$$

$k_0$  характеризует максимальное число активных молекул в реакционном объеме

$$k_0 = A \sqrt{T}$$

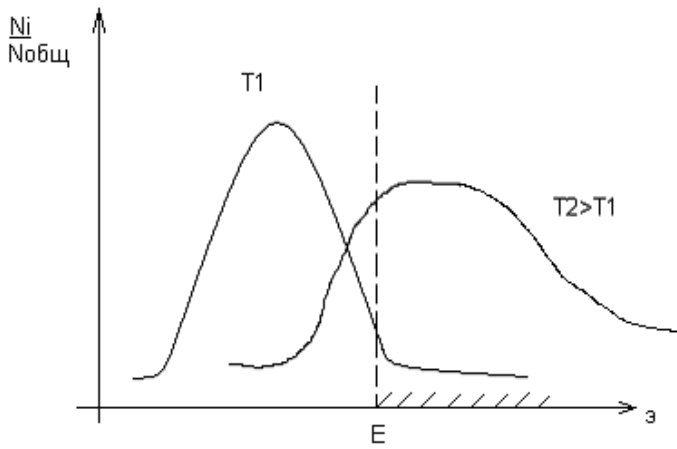
$E$  – энергия активации, которую необходимо сообщить системе для разрушения старых внутримолекулярных связей и образования активных осколков, дающих начало новым реакциям.

$$Q = E_1 - E$$



$\tau$

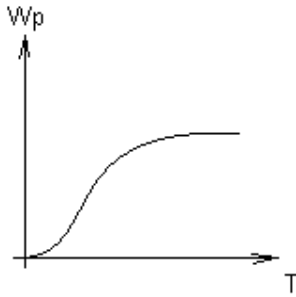
Для воспламенения смеси ее необходимо нагреть для того чтобы увеличить долю активных молекул, т.е. таких у которых энергия больше энергии активации.



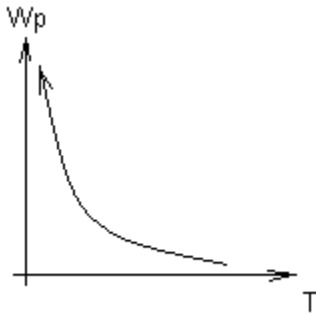
1. При  $T = 0$   $k = 0$ ;
2. с ростом  $T$  растет и  $k$ ;
3. при  $T = \infty$   $k = k_0$ .

Скорость реакции горения зависит:

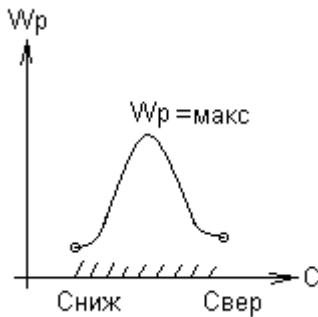
1. от  $T$



2. от  $E$



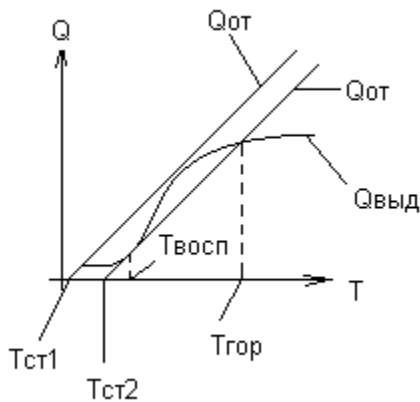
3. от концентрационных свойств смеси



Температура воспламенения топливной смеси.

Это температура, при которой смесь воспламеняется и начинает устойчиво гореть. В топке происходит два процесса:

1. тепловыделение  $Q_{\text{выд}} \sim k_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}}$



2. Теплоотдача от факела к экрану  $Q = \alpha_{от} \cdot (T - T_{ст})$

Для воспламенения необходимо, чтобы  $Q_{выд} \geq Q_{от}$

$T_{воспл}$  зависит:

1. от состава топлива;
2. от условий расхолаживания топлива.

$t_{воспл} =$	225	–	250	–	400	–	900, °C
	Торф		БУ		КУ		Антр

Области горения топлива.

Общее время горения складывается из двух стадий: продолжительность химических реакций и продолжительности физических процессов.

$\tau_{общ} = \tau_{хим} + \tau_{физ}$

1. если продолжительность химических реакций много больше продолжительности физических процессов, то общее время горения равно продолжительности химических реакций и горение происходит в кинетической области (зависит от температуры).
2. если продолжительность химических реакций много меньше продолжительности физических процессов, то общее время горения равно продолжительности физических процессов и горение происходит в диффузионной области (определяется скоростью доставки окислителя).
3. если продолжительность химических реакций равна продолжительности физических процессов – промежуточная область.

Горение твердого топлива.

$\tau_{общ} = \tau_{тепл} + \tau_{гор}$

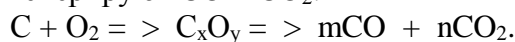
1.  $\tau_{тепл}$  – время тепловой подготовки топлива. Оно включает в себя нагрев, испарение влаги и выход летучих веществ.
2.  $\tau_{гор}$  включает в себя горение летучих веществ и горение коксового остатка.

$\tau_{гор} = \tau_{гор}^{лет} + \tau_{гор}^{кокс}$

$\tau_{гор}^{кокс} \approx 0,8 \cdot \tau_{общ}$

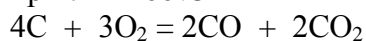
Механизм горения частиц.

Поверхность частицы адсорбирует кислород с образованием комплексов  $C_xO_y$ , которые генерируют CO и  $CO_2$ .



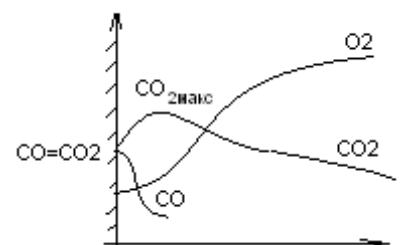
Соотношение CO и  $CO_2$  зависит от температуры.

1. при  $t = 1200^\circ C$

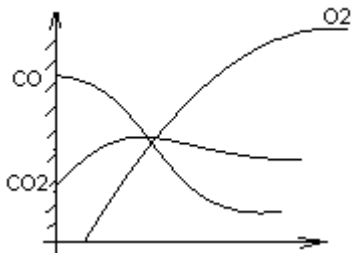


Из области  $CO_{2max}$  часть  $CO_2$  возвращается к частице и раскисляется  $CO_2 + C = 2CO$

При малом расходе CO,  $O_2$  полностью не перехватываясь достигает поверхности частицы.

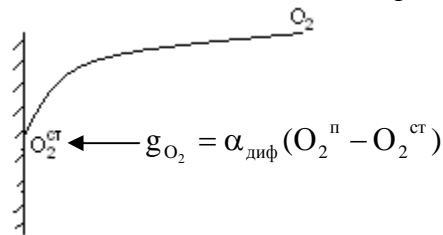


2. при  $t = 1700^{\circ}\text{C}$   $3\text{C} + 2\text{O}_2 = 2\text{CO} + \text{CO}_2$



При высоком расходе  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  расходуется полностью, не достигая поверхности частицы.

Скорость горения твердого топлива.



$g_{\text{O}_2}$  – расход окислителя,  
 $\alpha_{\text{диф}}$  – константа скорости диффузии.  
 Скорость реакции горения

$$W_{\Gamma} = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \cdot \text{O}_2^{\text{ct}}$$

Если решить эти два уравнения относительно  $\text{O}_2^{\text{ct}}$ , то получаем скорость горения:

$$W_{\Gamma} = \left( \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha_{\text{диф}}}} \right) \cdot \text{O}_2^n = k_{\Gamma} \cdot \text{O}_2^n, \quad k_{\Gamma} \text{ – константа горения.}$$

1. при низких  $T$  имеет место низкое значение  $k$ , значит

$\frac{1}{k}$  много больше  $\frac{1}{\alpha_{\text{диф}}}$ , поэтому  $W_{\Gamma} \approx k \cdot \text{O}_2^n$  и  $W_{\Gamma}$  зависит от  $T$ .

2. при высоких  $T$  имеет место высокое значение  $k$ , а значит

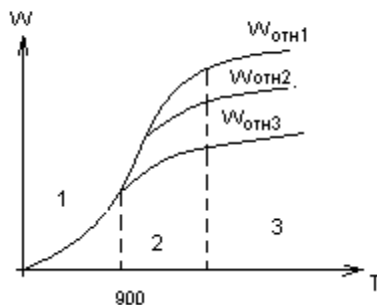
$\frac{1}{\alpha_{\text{диф}}}$  много больше  $\frac{1}{k}$ , поэтому  $W_{\Gamma} \approx \alpha_{\text{диф}} \cdot \text{O}_2^n$  и  $W_{\Gamma}$  зависит от скорости

подачи окислителя.

$\alpha_{\text{диф}} \sim \frac{1}{d_{\text{тв}}}$ , где  $d_{\text{тв}}$  – размер частицы топлива.

$$W_{\text{отн1}} > W_{\text{отн2}} > W_{\text{отн3}}$$

1. область кинематического горения;
2. промежуточная область.
3. область диффузионного горения;



Пути интенсификации горения.

1. предварительное измельчение;
2. интенсивное перемешивание в корне факела;

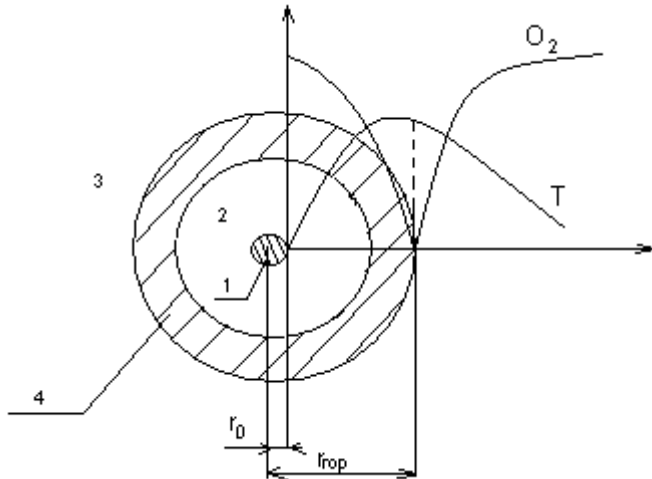
3. эффективная доставка  $O_2$  к горючим в конце факела.

Горение жидкого топлива.

Мазут в факеле сгорает в виде капель при распылении форсунками.

Стадии горения:

1. нагрев до  $t_{кип}$ ;
2. испарение топлива;
3. образование топливной смеси;
4. ее воспарение и сгорание.



1. капля;
2. зона диффузии паров;
3. зона диффузии кислорода;
4. зона горения;
5.  $r_0$  – начальный радиус капли;
6.  $r_{гор}$  – радиус горения.

$$r_{гор} = (4-10) r_0$$

Время горения капли определяется временем ее испарения.

$$\tau_{гор} = \tau_{исп} \approx \frac{r_0^2}{T_{г} \cdot O_2^n}$$

1. при снижении  $r_0$ , растет удельная наружная поверхность, а значит, растет теплота сгорания и снижается время испарения;
2. с ростом  $T_{г}$ , растет  $\Delta T = T_{г} - T_{исп}$ , а значит, растет теплота сгорания и снижается время испарения;
3. с ростом  $O_2^n$ , растет скорость горения, а значит, снижается время испарения.

За счет высокой теплоты сгорания  $Q_n^P$ , мазут горит в диффузионной области.

Особенность:

При сжигании мазута имеет место термический крекинг (последовательное отщепление  $H_2$  с образованием частиц сажи).

Недостатки сажеобразования:

- неполнота сгорания (0, 1-0, 3%);
- загрязнение окружающей среды;
- загрязнение поверхностей нагрева (снижается коэффициент теплопередачи  $k$ , поэтому снижается  $Q_{отд}$ , а значит растет температура уходящих газов и снижается КПД котла).

Для исключения сажеобразования проводят окислительный крекинг при активном внедрении воздуха в корень факела. При этом кислород, разрывая зону горения, проникает в зону диффузии паров для насыщения углеводородов кислородом.

## Лекция №7

### Пути интенсификации сжигания мазута.

1. распыление на мелкие капли ( $d_k < 500 \mu\text{м}$ );
2. предварительный нагрев;
3. высокие  $t$  в топке  $> 1500^\circ\text{C}$ ;
4. активное внедрение окислителя в корень факела.

#### Горение газового топлива.

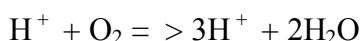
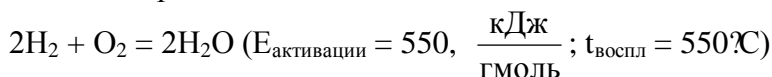
При горении из компонентов  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  образуются  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Академик Семенов разработал учение о цепных разветвленных реакциях согласно которому образуются промежуточные осколки, дающие начало новым реакциям.

#### Причины образования активных центров.

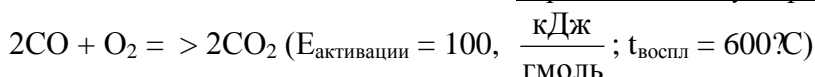
1.  $\text{H}_2 + \text{O}_2 = > \text{OH}^- + \text{OH}^-$
2.  $\text{H}_2 + \text{M} = > \text{H}^+ + \text{H}^+ + \text{M}$   
M – азот и т.п.
3.  $\text{H}_2\text{O} = > \text{OH}^- + \text{H}^+$

#### Горение водорода.

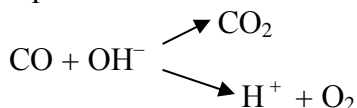
Реакция горения:



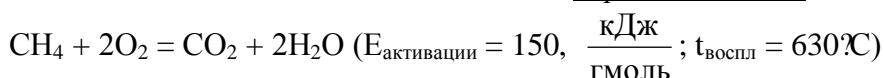
#### Горение оксида углерода.



При  $t < 700^\circ\text{C}$   $\text{H}_2\text{O} = > \text{OH}^- + \text{H}^+$ , а



#### Горение метана.



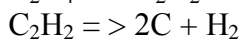
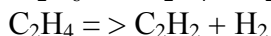
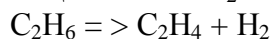
Особенности:

Горит в две стадии:

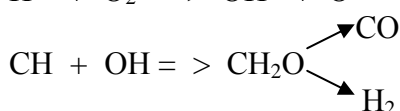
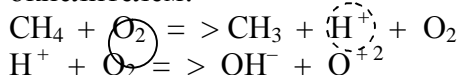
а) приготовление топливной смеси ее нагрев до  $t_{\text{воспл}}$ ;

б) воспламенение и горение;

При  $t = 300 - 400^\circ\text{C}$  идет пиролиз – процесс термического разложения с последовательным отщеплением  $\text{H}_2$  и образованием сажи:



Для исключения сажеобразования организуют предварительное смешивание топлива с окислителем:



#### Пути интенсификации сжигания природного газа.

1. деление топлива на тонкие струи со скоростью 50–100, м/с;
2. активное смесеобразование до фронта горения;
3. турбулизация воздушным потоком при скорости  $W_{\text{возд}} = 35-45$ , м/с.

Энтальпия продуктов сгорания.

$$J = C \cdot V \cdot \vartheta, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ для твердого и жидкого топлива, } \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \text{ для газового топлива.}$$

$$1. \text{ При } \alpha = 1 V_{\Gamma}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0$$

$$J_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2} \cdot (C \cdot \vartheta)_{\text{RO}_2}$$

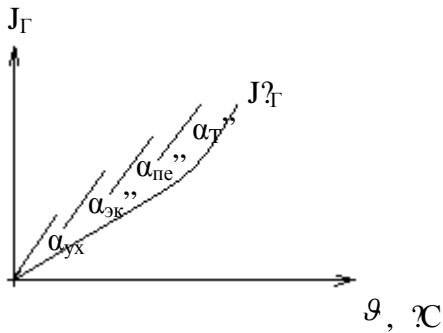
$$J_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \cdot (C \cdot \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$J_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^0 \cdot (C \cdot \vartheta)_{\text{N}_2}$$

$$J_{\Gamma}^0 = J_{\text{RO}_2} + J_{\text{H}_2\text{O}}^0 + J_{\text{N}_2}^0$$

Для высокозольных топлив дополнительно учитывают энтальпию золы

$$J_{\text{зол}} = \frac{A^P}{100} \cdot \alpha_{\text{ун}} \cdot (C \cdot \vartheta)_{\text{зол}}$$



$$2. \text{ при } \alpha > 1 V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + \Delta V_{\text{в}}$$

$$J_{\Gamma} = J_{\Gamma}^0 + \Delta J_{\text{возд}}$$

$$\Delta J_{\text{возд}} = (\alpha - 1) \cdot J_{\text{возд}}$$

$$J_{\text{возд}} = V^0 \cdot (C \cdot \vartheta)_{\text{возд}}$$

### Тепловой баланс котла.

Он характеризует распределение теплоты, вносимой в топку, на полезно используемую и тепловые потери.

$$Q_p^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \left( \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right), \text{ где}$$

$Q_p^P$  – располагаемая теплота топлива;

$Q_1$  – полезно используемая теплота;

$Q_2$  – потери теплоты с уходящими газами;

$Q_3$  – потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива;

$Q_4$  – потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива;

$Q_5$  – потери теплоты от наружного охлаждения котла;

$Q_6$  – потери теплоты с физической теплотой шлака.

$$\text{Если } q_i = \frac{Q_i}{Q_p^P} \cdot 100\%, \text{ то } q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%.$$

### Располагаемая теплота топлива.

Такой теплотой называется, та теплота, которой топливо располагает при сжигании.

$$Q_p^P = Q_{\text{н}}^P + Q_{\text{тл}} + Q_{\text{в.вн.}} + Q_{\text{пар.}} - Q_{\text{карб}}$$

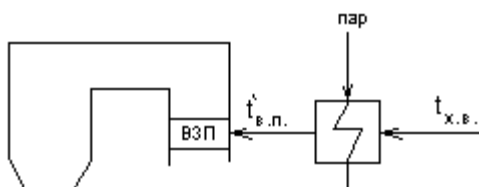
1.  $Q_{\text{н}}^P$  – теплота сгорания. Является функцией состава топлива;

2.  $Q_{\text{тл}}$  – физическая теплота топлива

$$Q_{\text{тл}} = C_{\text{тл}} \cdot t_{\text{тл}}, \text{ где } C_{\text{тл}} = C_{\text{ух}} \cdot \frac{100 - W^P}{100} + C_{\text{вл}} \cdot \frac{W^P}{100} \text{ (для углей) или } C_{\text{маз}} = 1,74 + 0,0025 \cdot t_{\text{маз}}$$

(для мазута);

3.  $Q_{\text{в.вн.}}$  – теплота, вносимая в топку с воздухом при его нагреве.



$Q_{в.вн.} = \beta' \cdot (J'_{в.п.} + J_{х.в.})$ , где  $\beta' = \alpha_T'' - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{п.е.} + \Delta\alpha_{вп}$  – коэффициент расхода;

$J'_{вп} = V^0 \cdot ct'_{вп}$  – энтальпия перед воздухоподогревателем ;  $J_{х.в.} = V^0 \cdot ct_{хв}$  – энтальпия холодного воздуха

4.  $Q_{пар}$  – теплота, вносимая в топку с паром при паровом распылении мазута

$Q_{пар} = \sigma_{пар} \cdot (i_{п} - 2500)$ , где  $\sigma_{пар} = 0,3 - 0,35, \frac{кг}{кг}$  – относительный расход пара на распыление мазута;

5.  $Q_{карб}$  – теплота, расходуемая на разложение карбонатов при сжигании высокозольных топлив



$$Q_{карб} = 40(CO_2)_{карб}^p$$

### Полезно используемая теплота.

Это та теплота, которая расходуется на нагрев воды, парообразование и перегрев пара.

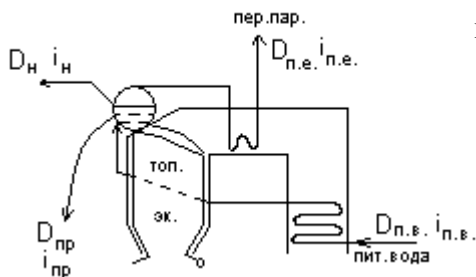
$D_{пр}$  – расход продувочной воды для вывода части солей с целью предотвращения накипеобразования.

$$D_{пр} = (1 \div 10\%) D_{п.е.}$$

$$D_{п.в.} = D_{п.е.} + D_{н.} + D_{пр.}$$

$$Q_1 = \frac{D_{п.е.}}{B} (i_{п.е.} - i_{п.в.}) + \frac{D_{н.}}{B} (i_{н.} - i_{п.в.}) + \frac{D_{пр.}}{B} (i_{пр.} - i_{п.в.})$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{Q_p^p} \cdot 100$$



При слоевом сжигании угля  $q_1 = 80\%$ , а при сжигании мазута и природного газа  $q_1 = 94\%$ .

Потери тепла с уходящими газами.

Это та теплота, которую газы уносят через трубу в атмосферу при  $t = 120-170^\circ C$ .

$$Q_i = J_{yx} - J_{х.в.}$$

$$J_{yx} = J_{yx}^0 + (\alpha_{yx} - 1) \cdot J_B^0$$

$$J_B^0 = V^r \cdot (Cv)_B$$

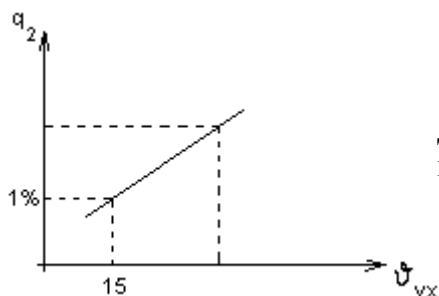
$$J_{х.в.} = \alpha_{yx} \cdot J_{х.в.}^0$$

$$J_{х.в.}^0 = ct_B \cdot V^0$$

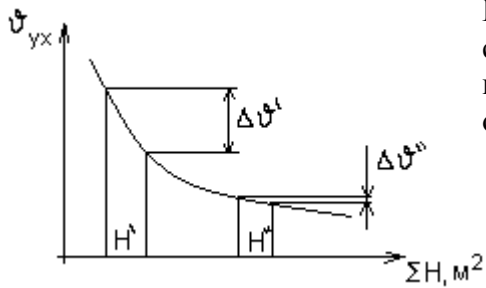
$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} \cdot 100 = 4 - 10\%$$

Факторы, влияющие на потерю теплоты с уходящими газами.

1. температура уходящих газов



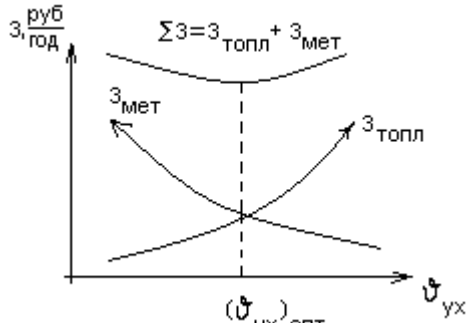
Для снижения  $v_{yx}$  размещают дополнительные поверхности нагрева.



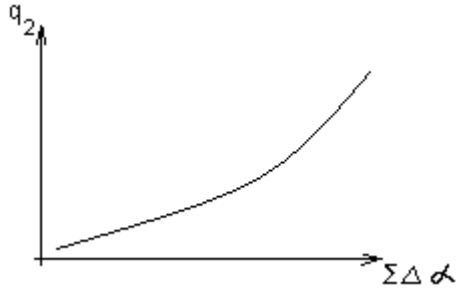
В области низких температур, даже незначительное снижение  $v_{yx}$  требует значительного количества поверхностей нагрева, поэтому оптимальную  $v_{yx}$  определяют технико-экономическими расчетами.

С ростом  $v_{yx}$ , растет  $J_2$ , а значит, снижается КПД, поэтому растет  $B$ , а значит и затраты на топливо.

Для снижения  $v_{yx}$ , требуется увеличение  $H_{нагр}$ , что требует денежных затрат.



## 2. Присос холодного воздуха



С ростом  $\Delta\alpha$ , растет объем и температура уходящих газов, соответственно возрастает их энтальпия, а значит, растет потеря с теплотой уходящих газов.

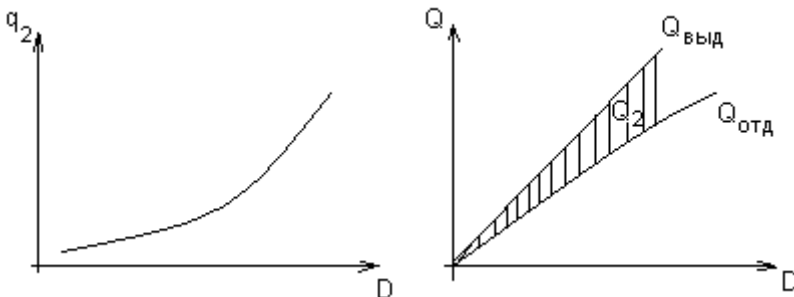
## 3. Влажность топлива.

С ростом влажности, растет содержание воды в топливе, а значит, растет  $q_2$ .

## 4. Загрязнение поверхностей нагрева.

С увеличением толщины загрязненного слоя снижается коэффициент теплопередачи  $k$ , снижается  $Q_{отд}$ , растет  $v_{yx} = >$  растет  $q_2$ .

## 5. паропроизводительность котла.



С ростом  $D$ , растет  $Q_{выд}$  пропорционально  $D^1$ .

С ростом  $D$ , растет  $Q_{отд}$  пропорционально  $D^6$ .

Меры борьбы с  $q_2$ :

1. чистота поверхностей нагрева;
2. устранение присосов.

## Лекция №8

### Потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива.

При сжигании топлива, кроме  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_2$  образуются  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  сжигание которых за пределами топки невозможно в виду низких температур. Та теплота, которая выделилась бы при их сжигании, называется потерей от химического недожога.

$$Q_3 = Q_{\text{CO}} \cdot V_{\text{CO}} + Q_{\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2} + Q_{\text{CH}_4} \cdot V_{\text{CH}_4}$$

если

$$V_{\text{CO}} = V_{\text{с.г.}} \cdot \frac{\text{CO}}{100}$$

то

$$Q_3 = V_{\text{с.г.}} (126 \cdot \text{CO} + 108 \cdot \text{H}_2 + 358 \cdot \text{CH}_4)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_p} \cdot 100$$

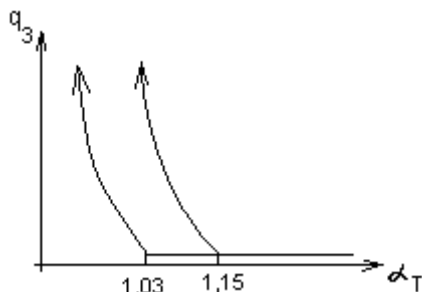
$q_3$  для

1. природного газа равно 0, 1-1%;
2. слоевого сжигания газа 0, 5-5%;
3. факельного сжигания угольной пыли 0-0, 5%.

#### Факторы, влияющие на $q_3$ :

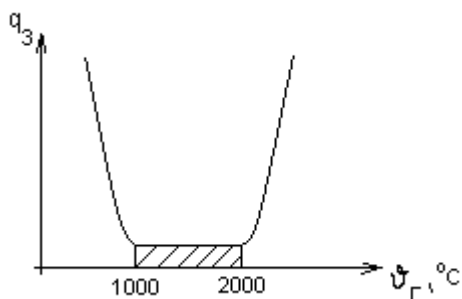
1. коэффициент избытка воздуха  $\alpha_T$ . При  $\alpha_T < \alpha_{\text{кр}}$  появляются зоны с недостатком окислителя = > образуются  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ .

Для природного газа и мазута  $\alpha_{\text{кр}} = 1,03$ , а для угольной пыли  $\alpha_{\text{кр}} = 1,15$ .



2. Температура в топке

При  $v_T < 1000$  снижается скорость реакции горения, растет содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и растет  $q_3$ . Если  $v_T > 2000$  идет процесс диссоциации (продукты полного сгорания распадаются на более простые).



3. тепловые напряжения топочного объема

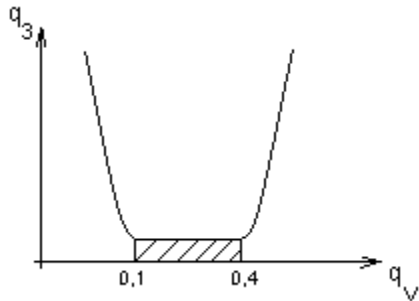
$$q_v = \frac{V \cdot Q_p^p}{V_{\text{топ}}}, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$$

$q_v$  характеризует время пребывания топлива в топочной камере.

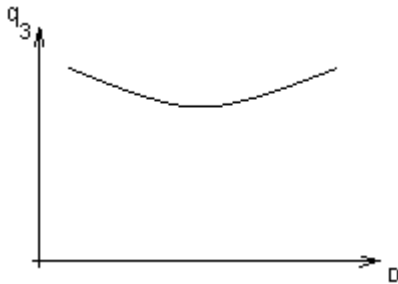
$$q_v \sim \frac{1}{\tau_{\text{преб}}}$$

При  $q_v < 0,1$  снижается  $B$ , при этом снижается  $v_{\Gamma}$ , соответственно снижается  $W_{\text{гор}}$ , а значит, растет  $q_3$ .

А если  $q_v > 0,4$ , то растет  $B$ , а значит, растет  $v_{\Gamma}$ , при этом растет  $W_{\Gamma}$ , следовательно снижается  $\tau_{\text{проб}}$ , поэтому растет  $q_3$ .

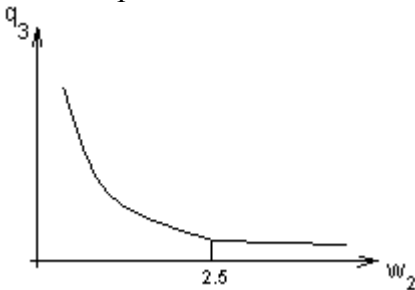


4. паропроизводительность котла.



5. скорость вторичного воздуха.

При снижении скорости вторичного воздуха  $\Rightarrow$  снижается скорость смесеобразования, а значит, растет  $CO$ ,  $H_2$  и  $CH_4$ , соответственно растет  $q_3$ .

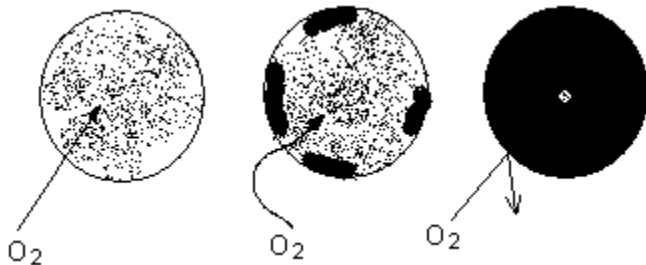


#### Пути снижения $q_3$ :

1. интенсивное предварительное смесеобразование при  $\alpha_{\Gamma} = \text{оптимальное}$ ;
2. высокие температуры  $v_2 = 1200 - 1700, ^\circ C$ ;
3. оптимальный расход для данной топки.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива.

При сжигании топлива, часть его не сгорает в топке и выносится за ее пределы с частицами золы и шлака. Та теплота, которая выделилась бы при дожигании горючих в шлаке и уносе называется потерей теплоты с механическим недожогом.



$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_p}, \text{ где } Q_4 = Q_4^{\text{шл}} + Q_4^{\text{ун}} = \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100} \cdot \frac{G_{\text{шл}}}{B} \cdot Q_{\text{гор}}^{\text{шл}} + \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100} \cdot \frac{G_{\text{ун}}}{B} \cdot Q_{\text{гор}}^{\text{ун}}$$

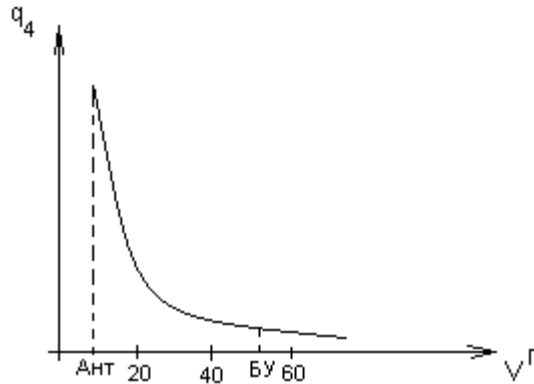
1.  $\Gamma$  – содержание горючих в шлаке и уносе;
2.  $G$  – расход шлака и золовых частиц;
3.  $Q_{\text{гор}}$  – теплота сгорания горючих в шлаке и уносе.

С учетом золового баланса получаем

$$1 = a_{\text{ун}} + a_{\text{шл}} \Rightarrow Q_4 = Q_4^{\text{шл}} + Q_4^{\text{ун}} = \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot Q_{\text{гор}}^{\text{шл}} + \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot Q_{\text{гор}}^{\text{ун}}$$

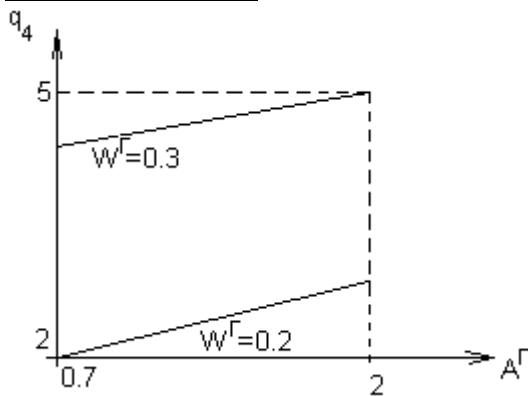
Факторы, влияющие на  $q_4$ :

марка топлива



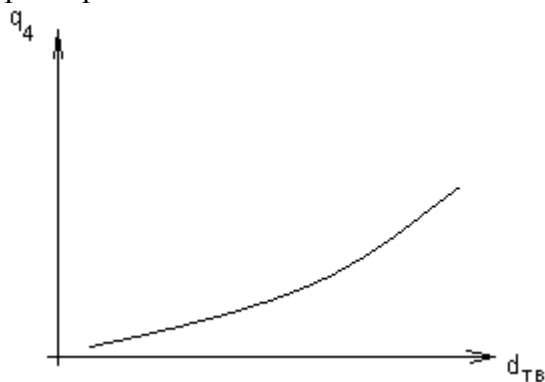
С ростом  $V^{\Gamma}$  снижается время воспламенения и растет пористость топлива, а следовательно снижается  $q_4$ .

1. зольность топлива



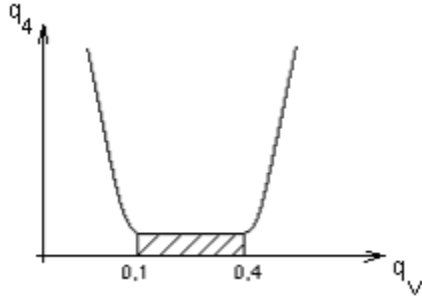
С ростом ухудшается доступ  $O_2$  к горючим и повышается  $q_4$ .

2. размер частицы

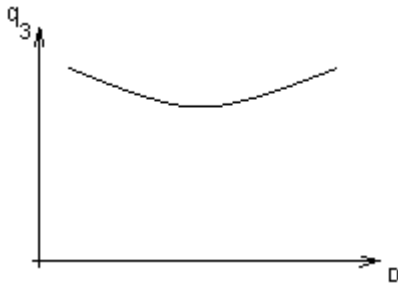


С ростом  $d$  растет толщина золы оболочки, а, значит снижается доступ кислорода, следовательно, растет  $q_4$ .

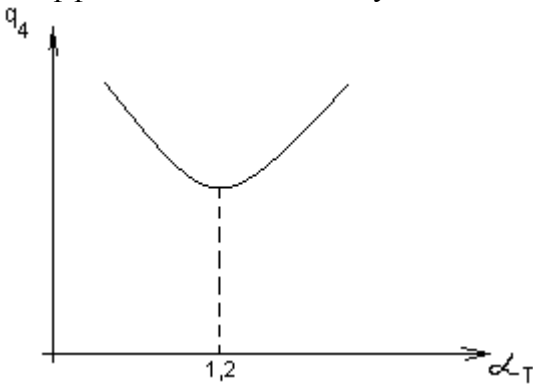
3. тепловое напряжение топки



4. паропроизводительность котла



5. коэффициент избытка воздуха

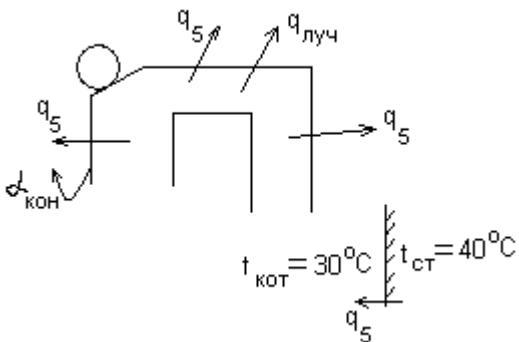


Если  $\alpha_T < 1, 2$ , то  $q_4$  растет из-за нехватки окислителя, а если  $\alpha_T > 1, 2$ , то  $q_4$  растет из-за увеличения скорости газов и снижения времени пребывания.

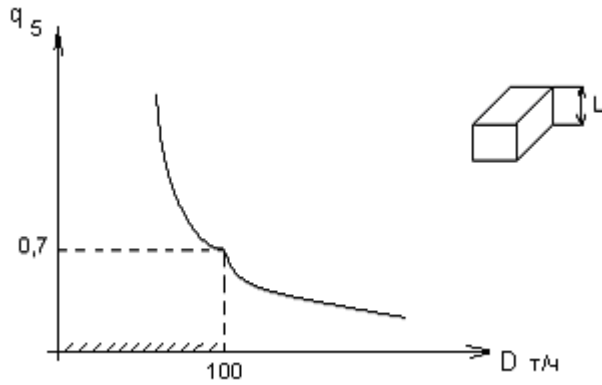
Потери теплоты от наружного охлаждения котла (через обмуровку).

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_p^p}$$

$$Q_5 = \frac{\sum H_{ст}}{B} \cdot [\alpha_{кон} \cdot (\bar{t} - t_{хв}) + q_{луч}]; q_T = [\alpha_{кон} \cdot (\bar{t} - t_{хв}) + q_{луч}] = 200 \div 300, \frac{Вт}{м^2}$$



С увеличением  $D$   $q_5$  снижается



$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_p} = \frac{\sum H_{ст} \cdot q_T}{B \cdot Q_p} \sim \frac{1}{L}$$

При переменных нагрузках

$$\frac{q_5}{q_5^{ном}} \cong \frac{D_{ном}}{D}$$

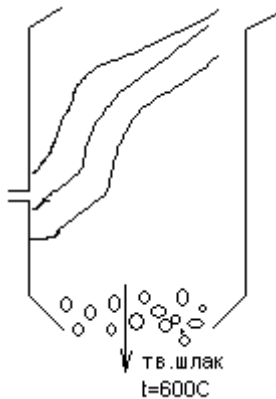
Потери с физической теплотой шлака.

При сжигании твердого топлива образуется шлак, который выводится из топки при  $t = 600-1500^\circ\text{C}$ .

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_p} = f(a_{шл}, t_{шл}, A^p)$$

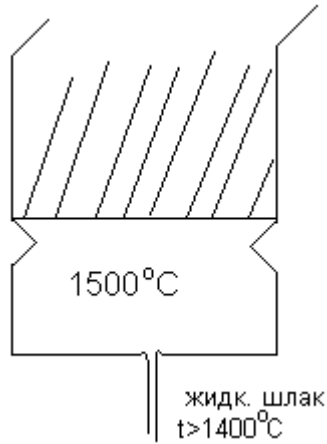
Виды топок.

1. С твердым шлакоудалением



$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_p}; Q_6 = a_{шл} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot ct_{шл}, \text{ при } a_{шл} \approx 0,05 \quad q_6 \approx 0$$

## 2. С жидким шлакоудалением



$$Q_6 = a_{\text{шл}} \cdot \frac{A^p}{100} \cdot c t_{\text{шл}} + q_{\text{шл}}^{\text{плавл}}$$

$$q_{\text{шл}}^{\text{плавл}} = 240-280, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$t_{\text{шл}} = 600-1500^\circ\text{C}$$

$$\text{При } a_{\text{шл}} = 0,15 \text{ } q_6 = 1\%.$$

### Коэффициент полезного действия котлов.

Это отношение теплоты полезно используемой к располагаемой теплоте топлива.

1. По прямому балансу

$$\eta_{\text{к}}^{\text{брутто}} = \frac{Q_1}{Q_p^p} = \frac{D_{\text{ПЕ}} (i_{\text{ПЕ}} - i_{\text{ПВ}})}{B \cdot Q_p^p} \cdot 100, \%$$

$$U = \frac{D_{\text{ПЕ}}}{B} - \text{испарительность топлива, для газового топлива и мазута } U = 15-16,$$

для КУ  $U = 7-8$ , для БУ  $U = 5-6$ .

2. По обратному балансу

$$\eta_{\text{к}}^{\text{брутто}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = q_1 = 80 - 94\%$$

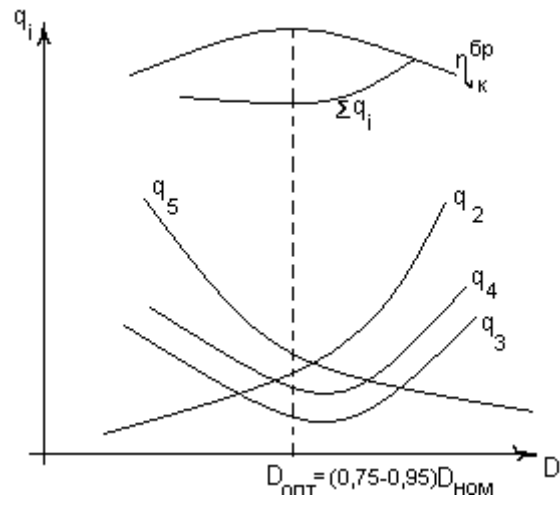
### Расход топлива.

$$B = \frac{D_{\text{ПЕ}} (i_{\text{ПЕ}} - i_{\text{ПВ}})}{\eta_{\text{к}}^{\text{брутто}} \cdot Q_p^p}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

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

При эксплуатации часть энергии на привод дымососа, вентилятора, элементов системы пылеприготовления, поэтому, с учетом собственных нужд:  $\eta_{\text{к}}^{\text{нетто}} = \eta_{\text{к}}^{\text{брутто}} - \frac{Q_{\text{собств.нужд}}}{B \cdot Q_p^p}$

Оптимальный режим работы парового котла



Определение  $\alpha_T^{\text{опт}}$ .

## Лекция №9

### Топочные камеры.

Они служат для сжигания топлива с целью получения энергии, заключенной в нем.

Предъявляемые требования:

1. развитие и завершение процессов горения;
2. обеспечение требуемой паропроизводительности;
3. максимальное шлакоулавливание;
4. охлаждение газов до требуемой температуры уходящих газов;
5. широкий диапазон регулирования.

#### Показатели работы

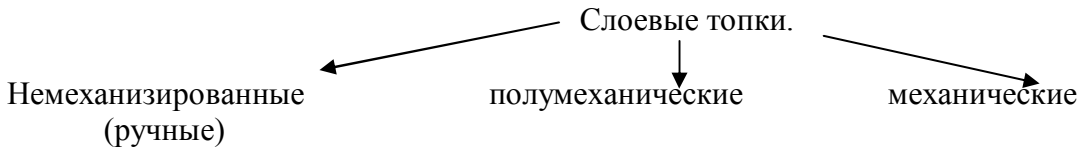
1. тепловая мощность  $Q_T = V \cdot Q_p^p$
2.  $\alpha_T$ ;
3.  $q_3, q_4$ ;
4.  $q_v = \frac{V \cdot Q_p^p}{V_T}$ ;
5.  $a_{ун}$ .

#### Слоевое сжигание твердого топлива

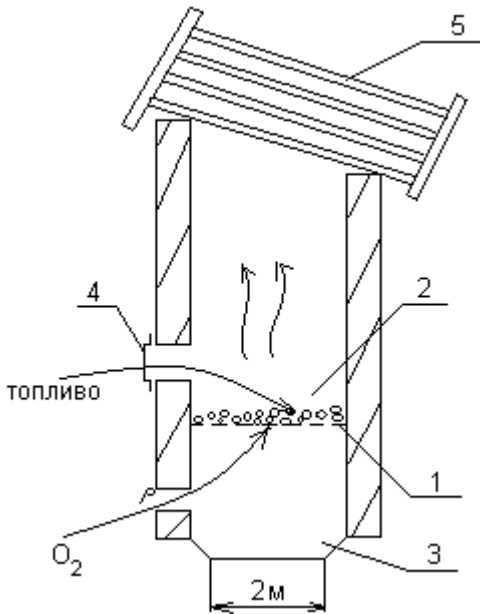
Организуется при сжигании углей в виде кусков на колостниковой решетке.

Включает:

1. подача топлива в слой;
2. перемешивание кусков в слое;
3. вывод шлака.



### Немеханические топки.

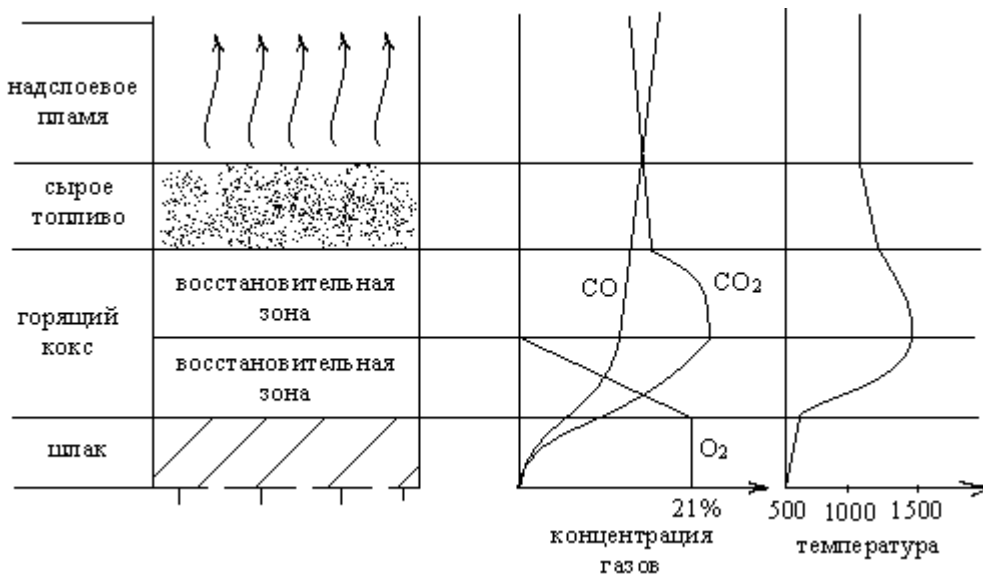


- 1 – решетка колосниковая;
- 2 – топочный объем;
- 3 – зольник;
- 4 – загрузочное окно;
- 5 – испарительный котельный пучок.

Доля живого сечения  $\omega = \frac{f_{\text{отв}}}{R} \cdot 100\% = 10 - 24\%$

Здесь организована противоточная схема движения топлива сверху вниз, то есть топливо движется сверху, воздух снизу вверх.

### Организация слоевого сжигания топлива



Воздух проходит через слой шлака и нагревается до  $600^{\circ}\text{C}$ . В окислительной зоне топливо сгорает, при этом происходит снижение концентрации  $\text{O}_2$  до 0%. В восстановительной зоне при  $\text{O}_2=0\%$  происходит раскисление  $\text{CO}_2$ .

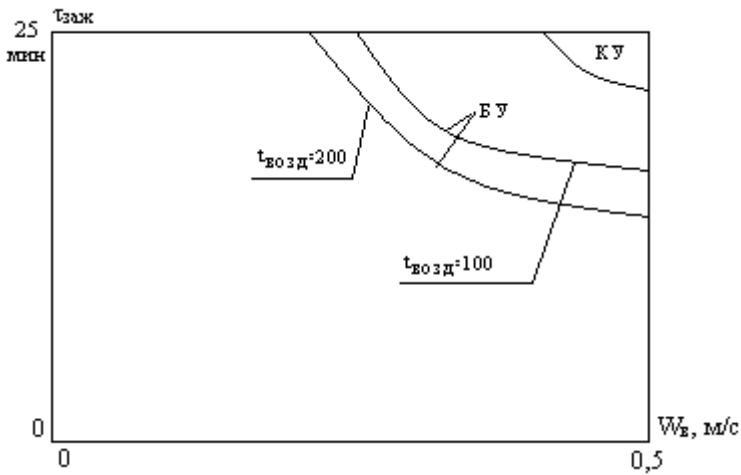
Для повышения эффективности сжигания:

1. ограничивают высоту слоя  $H_{\text{сл}}=50 - 100$ , мм
2. надслоевое дутье воздуха.

Общее время горения складывается из времени зажигания и времени непосредственного горения топлива. Во время зажигания входит:

1. нагрев;
2. испарение влаги;
3. выход летучих веществ.

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{заж}} + \tau_{\text{гор}}$$



Немеханизированные топки применяют при  $D < 2,5$ , т/ч.

Недостатки:

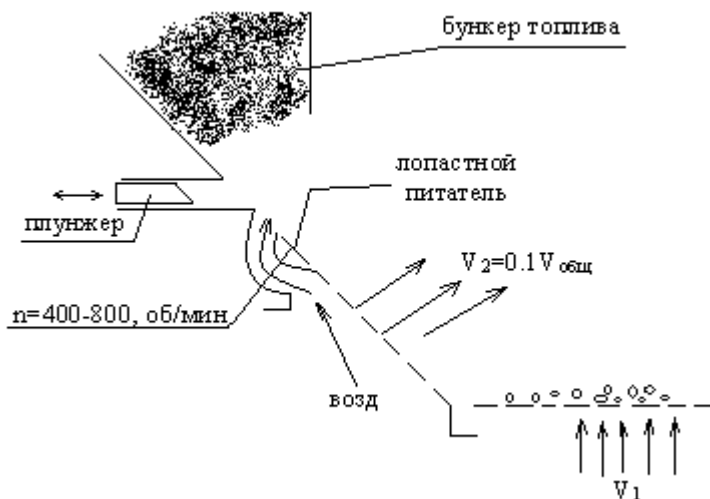
1. тяжелый физический труд;
2. цикличность процесса;
3. сложность регулирования топливо-воздух.

### *Полумеханические топки*

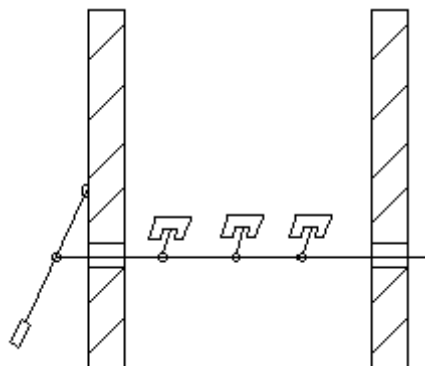
Применяют при  $D = 4-6,5$ , т/ч.

Такие топки включают в себя:

1. пневматический забрасыватель (ПМЗ)



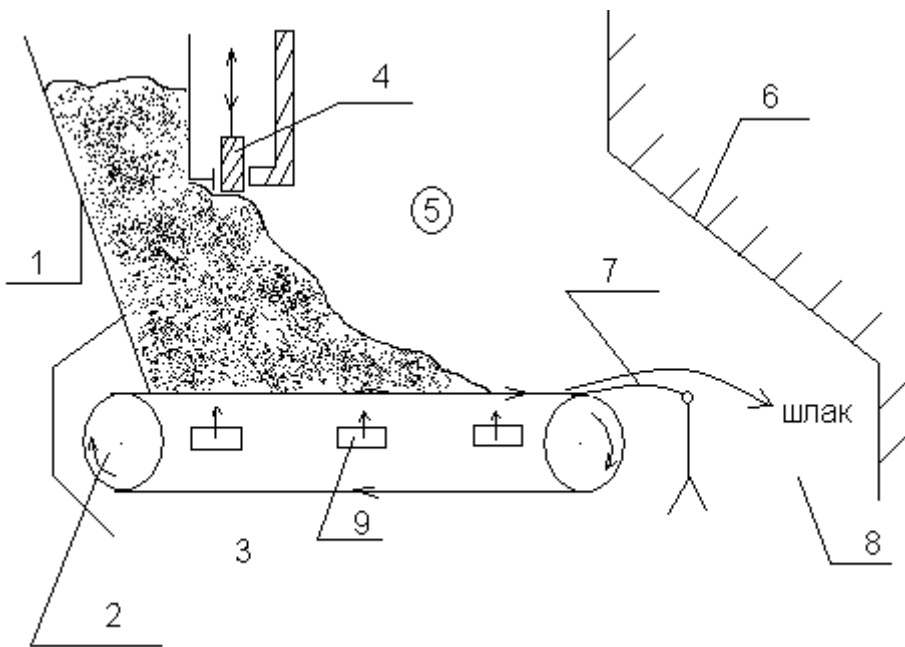
2. решетка с поворотными колостниками (РПК)



Поворотом колостников на  $20^\circ$  перемешивают слой, при этом происходит снижение  $q_4$  на 1%.

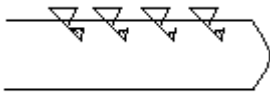
### *Механические топки.*

Они применяются при  $D = 6,5 - 20$  т/ч.

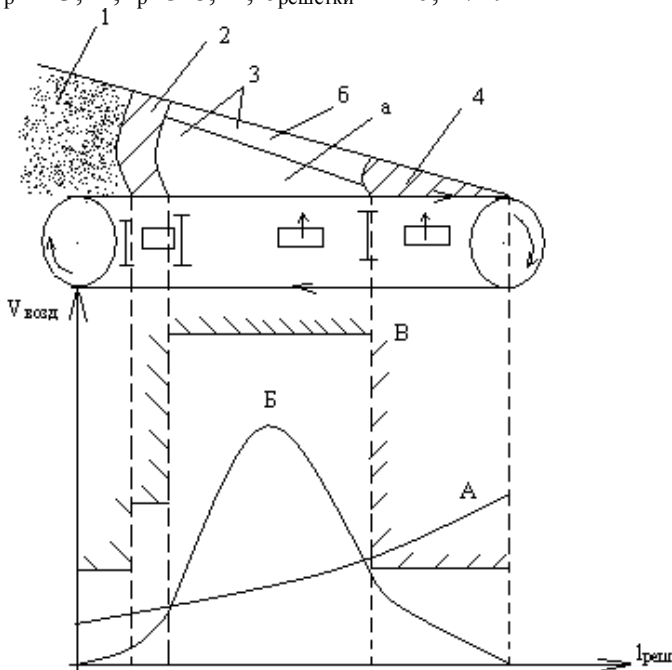


1. бункер топлива;
2. зубчатое колесо;
3. цепная решетка;
4. шибер;
5. топочное пространство;
6. огнеупорный свод;
7. шлакосниматель;
8. шлаковый бункер;
9. воздушные каналы.

В таких топках применяют безпровальную решетку (ЧШР – чешуйчатая решетка).



$b_p=2-3, \text{ м}; l_p=3-8, \text{ м}; v_{\text{решетки}}=1-20, \text{ м/ч.}$



1. сырое топливо;
2. зона тепловой подготовки;
3. зона горения
  - а) окислительная зона;
  - б) восстановительная зона;
4. зона шлака.

А – самопроизвольное распределение воздуха.

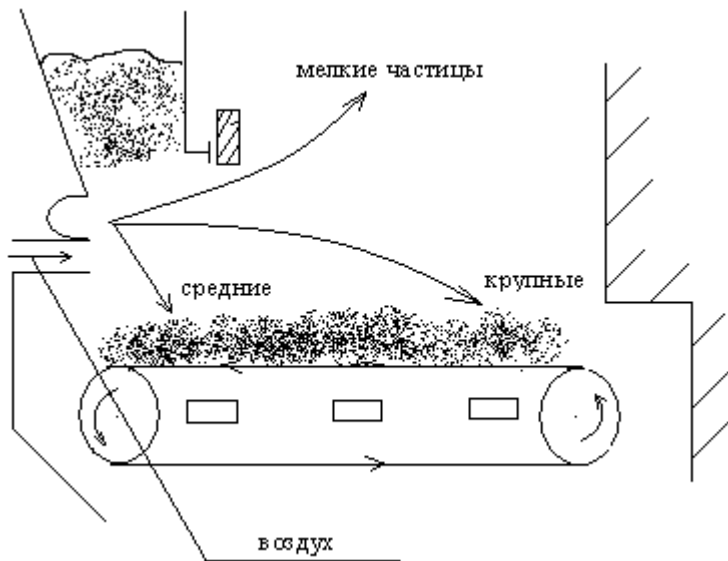
Б – теоретическое распределение воздуха;

В – секционное дутье. Оно организуется с помощью перегородок для эффективного сжигания топлива.

Для повышения полноты сгорания организуют над слоевое дутье с  $W_r = 50-60, \text{ м/с.}$

Механические топки применяют при сжигании АС и АМ.

**Факельно-слоевая топка.**



Так как решетка движется в обратном направлении, то

1.  $\tau_{\text{преб}} = \tau_{\text{гор}} \sim d_{\text{тв}}$ , при этом  $q_4$  снижается до 1%;
2. можно сжигать до 40 % мелочи.

Применяют для бурых и каменных углей.

Показатели слоевых топков:

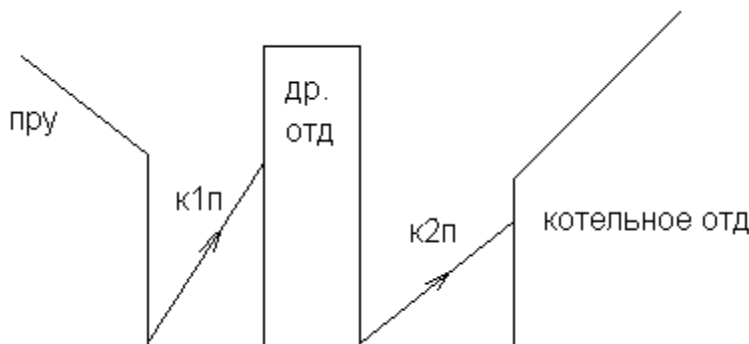
$$\alpha_T = 1,3-1,7; q_3 = 0,5-2\%; q_4 = 6-14\%; q_v = 0,2-0,4, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}; q_R = V \cdot Q_p^p / R = 0,6-1, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2};$$

$$t_{\text{тв}} < 250^\circ\text{C}$$

### Подготовка топлива к сжиганию

#### **Организация сжигания твердого топлива.**

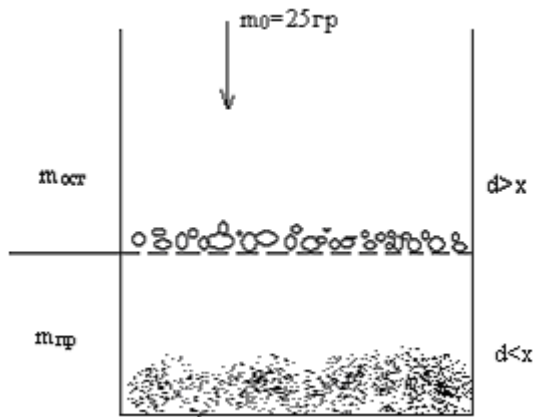
Уголь поступает на станцию в вагонах и подлежит дроблению.



Характеристики угольной пыли:

1. малая насыпная плотность ( $\rho_{\text{пл}}^{\text{нас}} = 400-500, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ )  
за 3-6 часов пыль слеживается ( $\rho_{\text{пл}} = 900, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ), теряет сыпучесть поэтому стенки бункера делает под углом 60°;
2. влажность пыли. Влажная пыль – слеживается, сухая – взрывоопасна. Поэтому оптимальная влажность для антрацита 1-2%, для каменного угля 5-10%, для бурого угля 10-20%, для торфа 30-35%;
3. полидисперсность (1-1000, мкм). Фракционный состав определяют путем рассева пыли на ситах с ячейками:  
x = 90    200    500    1000    мкм

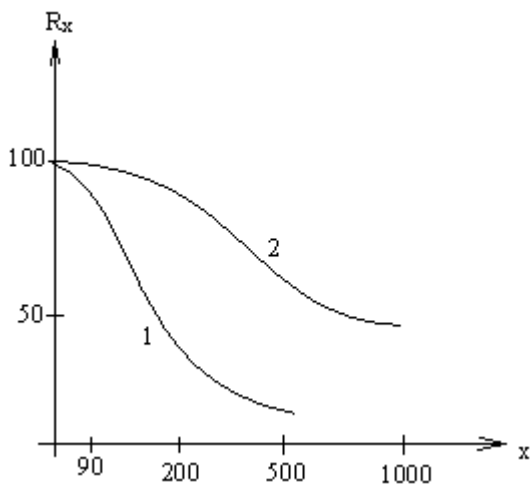
#### **Механизм рассева**



$$m_{ост} + m_{пр} = m_0$$

Полный остаток пыли на сите  $R_x = \frac{m_{ост}}{m_0} \cdot 100, \%$

По результатам рассева строится зерновая характеристика

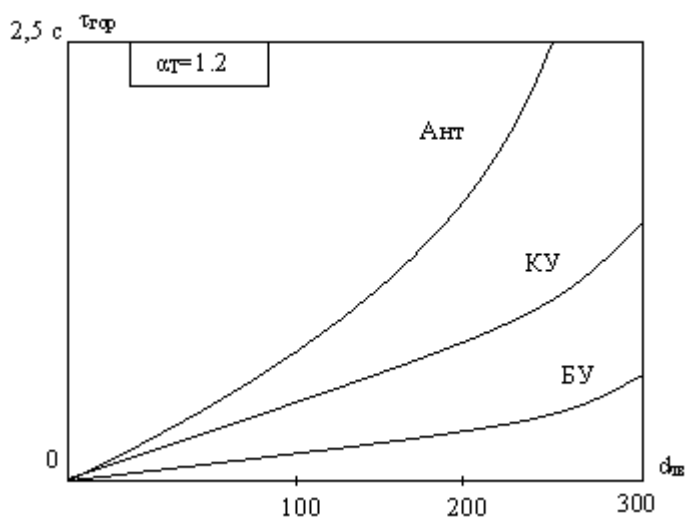


1 – тонкая пыль;

2 – грубая пыль.

$R_x = 100 \cdot e^{-b \cdot x^n}$ , где  $b$  и  $n$  константы

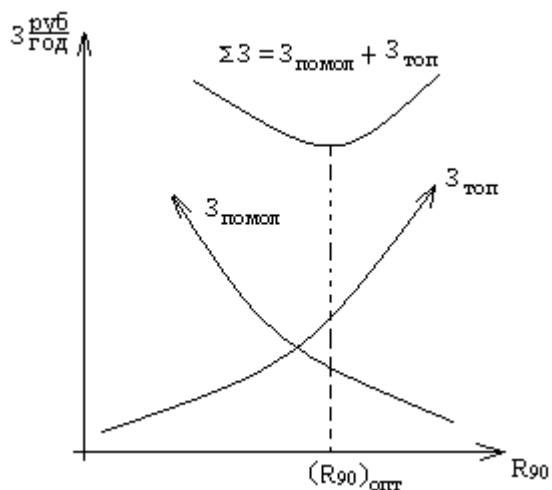
Время горения отдельной частицы зависит от ее размера и марки топлива



### Лекция №10

**Оптимальная тонкость помола.**

С ростом диаметра частицы растет масса горючих веществ, а значит, увеличивается время горения. С ростом  $V^Г$  уменьшается время воспламенения и снижается время горения.



С ростом размера частицы растет  $R_{90}$  и растет  $q_4$ , а значит, снижается КПД котла, следовательно растет расход топлива, поэтому увеличиваются затраты на топливо.

Для снижения размера частицы, необходимо снизить  $R_{90}$ , следовательно увеличатся затраты на помол.

$$R_{90}^{опт} = 4 + 0,8 \cdot V^Г, \%$$

Топливо	Ант, Т	КУ	БУ
$R_{90}^{опт}, \%$	7-8	20-35	50-60

Топливо с высоким  $V^Г$ , быстро воспламеняется и полнее сгорает, поэтому допускает более грубый помол.

### **Механическая прочность углей**

Она влияет на:

1. энергозатраты на помол;
2. производительность мельниц;
3. износ мелющих органов.

Коэффициент размолоспособности  $K_{ло} = \frac{\mathcal{E}_{Ант}}{\mathcal{E}_{иссл.в-во}} > 1$ . Для рабочего топлива вводятся поправки

на влажность и дробление  $K_{рт} = K_{ло} \cdot \frac{\Pi_{вл}}{\Pi_{др}}$ . Для каменных углей  $K_{рт} = 1,2-1,8$ , а для бурых углей

$K_{рт} > 2$ . По  $K_{рт}$  проектируют мельницы.

### **Абразивность твердого топлива**

Абразивность – способность частиц истирать поверхности мелющих органов.

$K_{абр} = \frac{\Delta G_{ст3}}{\Delta \mathcal{E}} = 0,3-0,8, \frac{\Gamma}{кВт \cdot ч}$ , где числитель – износ металла (Сталь 3), а знаменатель – энергозатраты. По  $K_{абр}$  судят о продолжительности межремонтной компании.

### **Взрываемость угольной пыли**

Угольная пыль в смеси с воздухом образует взрывоопасную смесь. Предельное значение  $O_2$  при котором взрыв не происходит.

$O_2^{пред} = 16 \quad 18 \quad 19, \%$   
торф БУ КУ

Вероятность повышается:

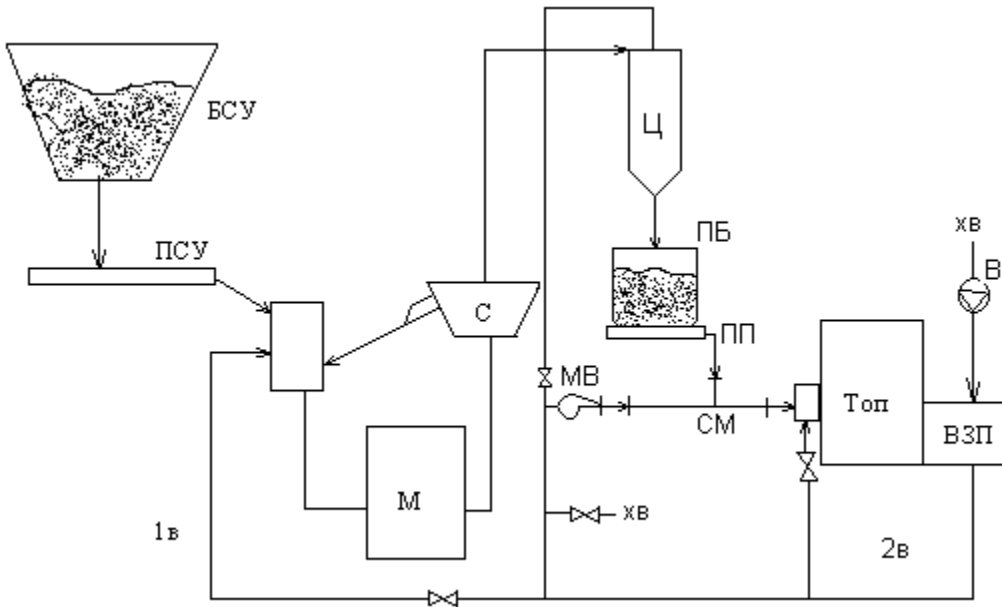
1. с ростом  $V^Г$ ;
2. при снижении  $W_{пл}$ ;
3. при снижении  $R_{90}$ ;
4. с ростом  $t_{аэросмеси}$ .

Поэтому  $t_{аэр}^{пред} = 70 \quad 100 \quad 130, ^\circ\text{C}$   
БУ КУ Ант

Для защиты пылесистемы от возможного взрыва, они оборудованы взрывными клапанами.

### Системы пылеприготовления

#### *Система пылеприготовления с промежуточным бункером.*



- БСУ – бункер сырого угля;  
 ПСУ – питатель сырого угля;  
 М – мельничное устройство;  
 С – сепаратор;  
 Ц – циклон. Он служит для отделения пыли от сушильного агента;  
 ПБ – промежуточный бункер;  
 ПП – питатель пыли;  
 СМ – смеситель;  
 МВ – мельничный вентилятор;  
 1в – первичный воздух;  
 2в – вторичный воздух.

$$V_{\text{общ}} \approx \alpha_T \cdot V^0 \cdot V_{\text{пл}}$$

$$V_1 = (0.15 \div 0.2) \cdot V_{\text{общ}}$$

$$V_2 = V_{\text{общ}} - V_1$$

#### Недостатки:

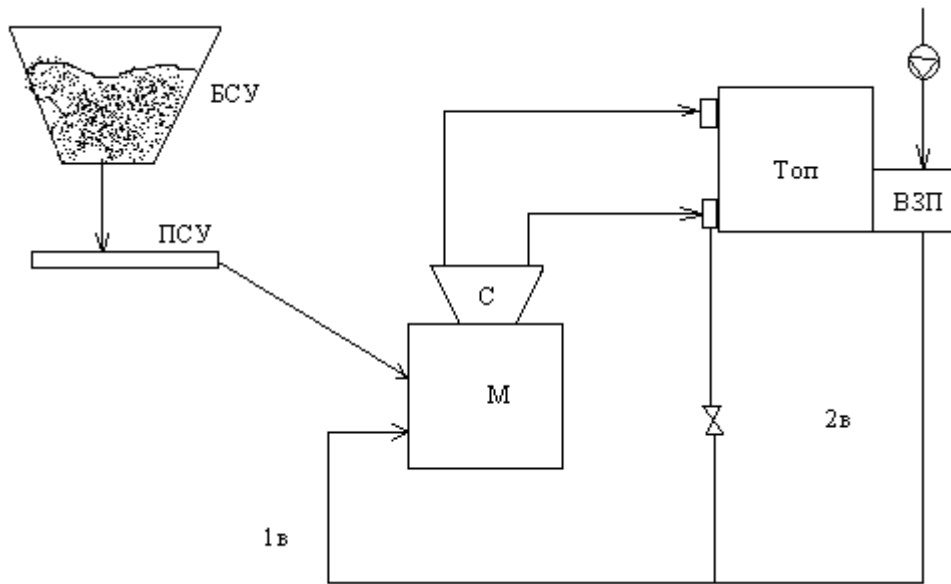
1. сложность;
2. высокие присосы;
3. высокое сопротивление.

#### Достоинства:

1. независимость работы мельницы от режима котла;
2. надежность (при аварии в мельнице она отключается, а котел продолжает работать).

Применяют при размоле антрацита и углей класса Т.

#### *Пылесистема с прямым вдуванием пыли в топку*



$$V_2 = (0.3 \div 0.6) \cdot V_{\text{общ}}$$

Свежеприготовленная пыль, не накапливаясь, сразу отправляется к горелкам.

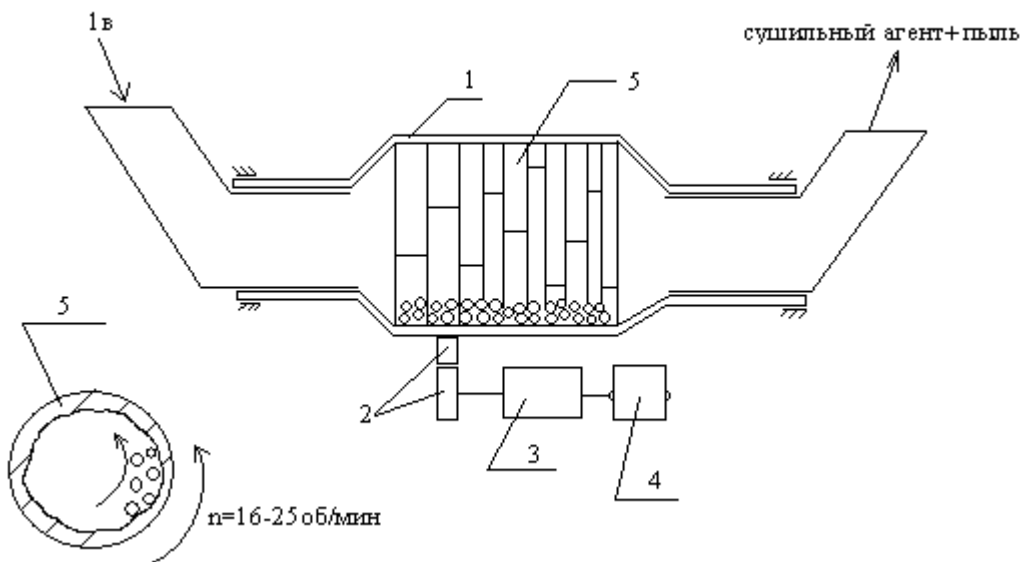
Достоинства:

1. простота;
2. малое сопротивление.

Недостатки:

1. зависимость работы мельницы от режима работы котла;
2. ненадежность (при аварии в мельнице котел останавливается).

Применяют при размол торфа, БУ, КУ, с  $V^f > 30\%$ .



- 1 – барабан;
- 2 – шестеренка;
- 3 – редуктор;
- 4 – электродвигатель;
- 5 – броневые плиты.

$$D_6 = 2 \div 4 \text{ м};$$

$$L_6 = 3 \div 8 \text{ м};$$

$$d_{\text{ш}} = 30 \div 60 \text{ мм};$$

$$t_1 = 380 \div 420^\circ \text{ С}.$$

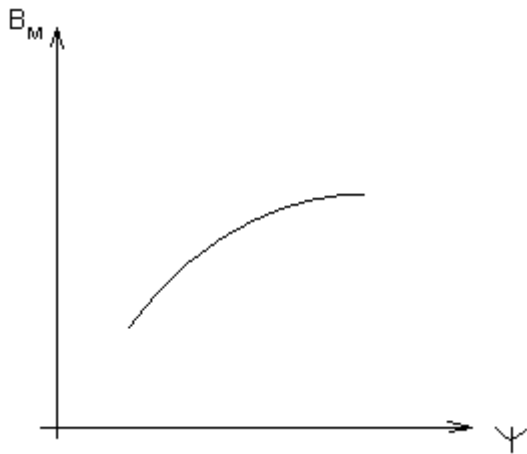
*Факторы, влияющие на размол:*

1. частота вращения барабана. С ростом частоты возрастает производительность мельницы, но при  $n > n_{\text{кр}} = \frac{42,3}{\sqrt{D_6}}$ , все шары прижмутся к внутренней поверхности барабана и  $B_M = 0$ ,

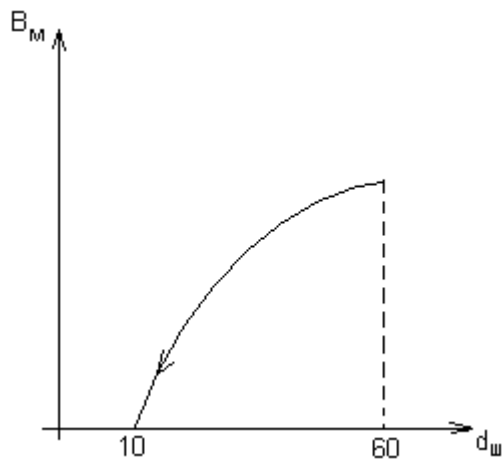
поэтому  $n_{\text{раб}} = 0,75 \cdot n_{\text{кр}}$ ;

2. доля шаровой загрузки:

$$\Psi = \frac{V_{\text{шар}}}{V_{\text{бар}}} \cong 0,25$$

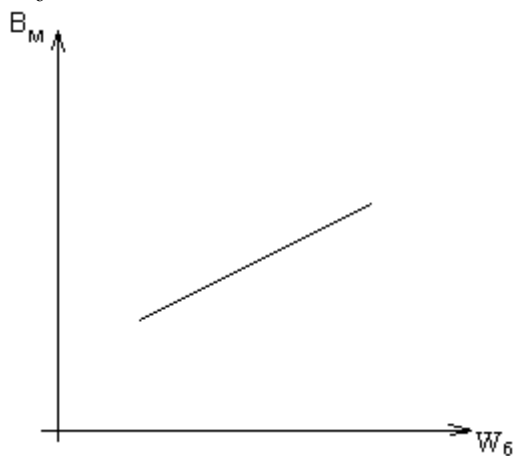


3. диаметр шаров. При уменьшении диаметра шаров, снижается  $B_M$ . Износ шаров составляет  $\approx 150 \div 300 \frac{\text{гр}}{\text{т.угля}}$



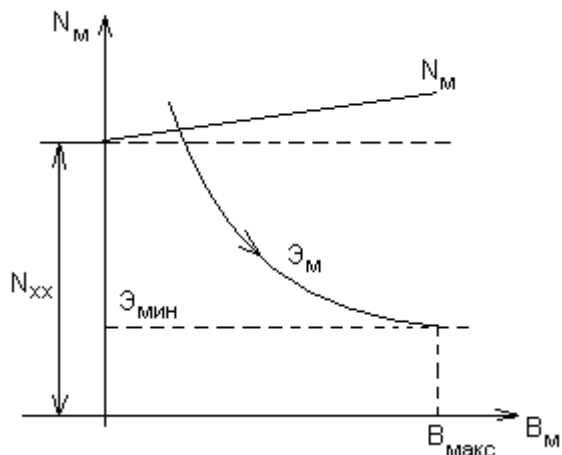
4. скорость вентиляции

$$W_6 = 1 \div 3 \text{ м/с}$$



5. удельные энергозатраты на помол

$$\mathcal{E}_m = \frac{N_m}{B_m}; N_m = N_{xx} + b \cdot B_m, \text{ кВт}$$



Достоинства:

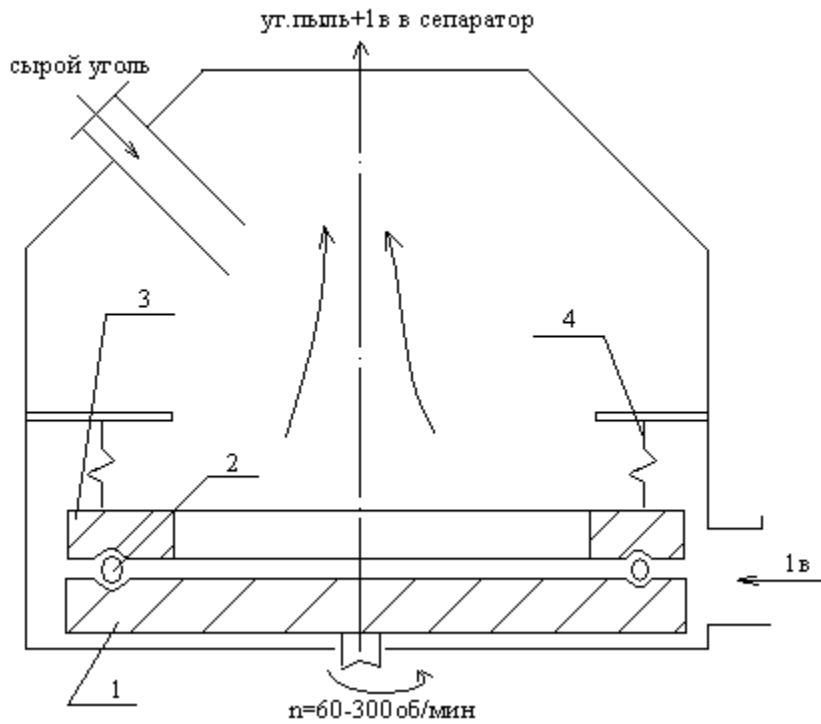
- пыль тонкого помола.

Недостатки:

- громоздкость;
- грохот;
- высокие энергозатраты  $\mathcal{E}_m = 30 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}$

Применяют при размоле антрацита и углей класса Т.

## Мельница шаровая среднеходная (МШС)



- 1 – размольный стол;  
2 – шары;  
3 – опорное кольцо;  
4 – пружины.

$$D_{ст} = 0,9 \div 1,4 \text{ м};$$

$$d_{ш} = 0,2 \div 0,4 \text{ м};$$

$$t_1 = 350^\circ \text{ С}.$$

$$n_{опт} = \frac{115}{\sqrt{D_{ст}}};$$

$$V_M \sim D_{ст}^3$$

Достоинства:

- меньшие энергозатраты;
- компактность.

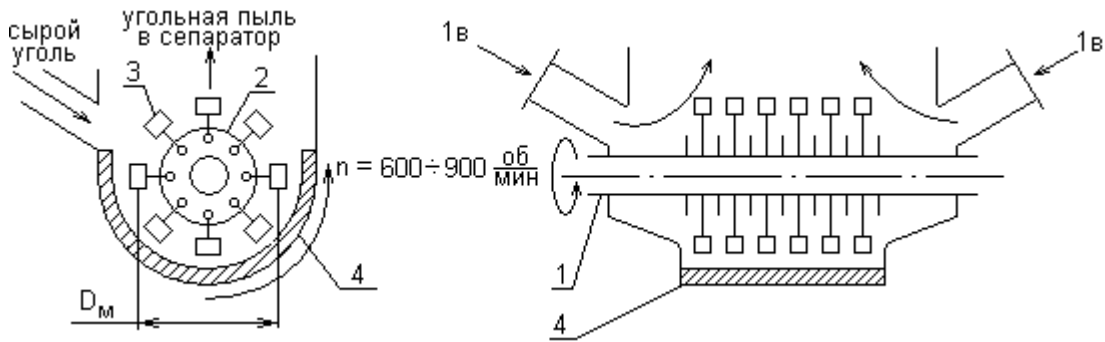
Недостатки:

- чувствительность к попаданию металлических предметов;
- сложность эксплуатации.

Применяют при размолке каменных углей.

## Лекция №11

### Молотковая мельница.



Позиции:

1 – вал.

2 – диски.

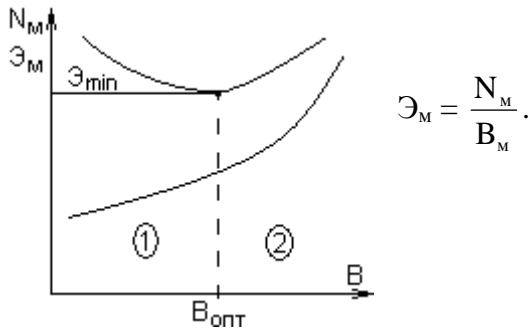
3 – молотки.

4 – броневые плиты.

1в – первичный воздух ( $t = 380\text{?}420\text{?C}$ ).

$\delta_{пл} \approx 30 \text{ мм}$ . Производительность мельницы  $V_M \sim (n \cdot D_M)^3$ .

Определение  $V_{опт.м.}$ :



Достоинства:

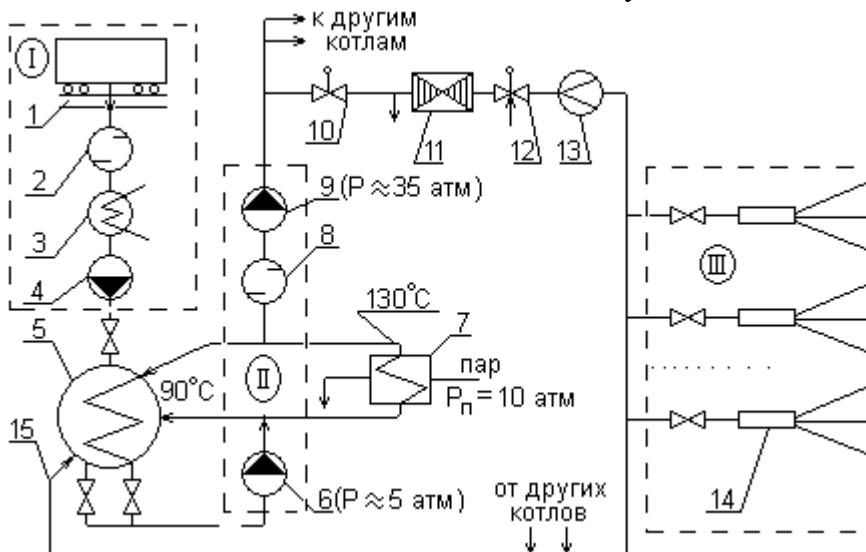
- простота.
- низкие энергозатраты (до 12кВтч/т).

Недостатки:

- грубый помол.
- значительный износ молотков (500?600 ч ~ 50% износа).

Применяют для размола торфа, БУ, КУ с  $V^f > 30\%$ .

### Схема мазутного хозяйства.



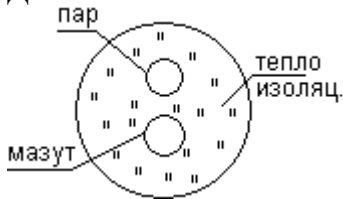
I – приёмно-сливочное устройство.

II – мазуто-насосная.

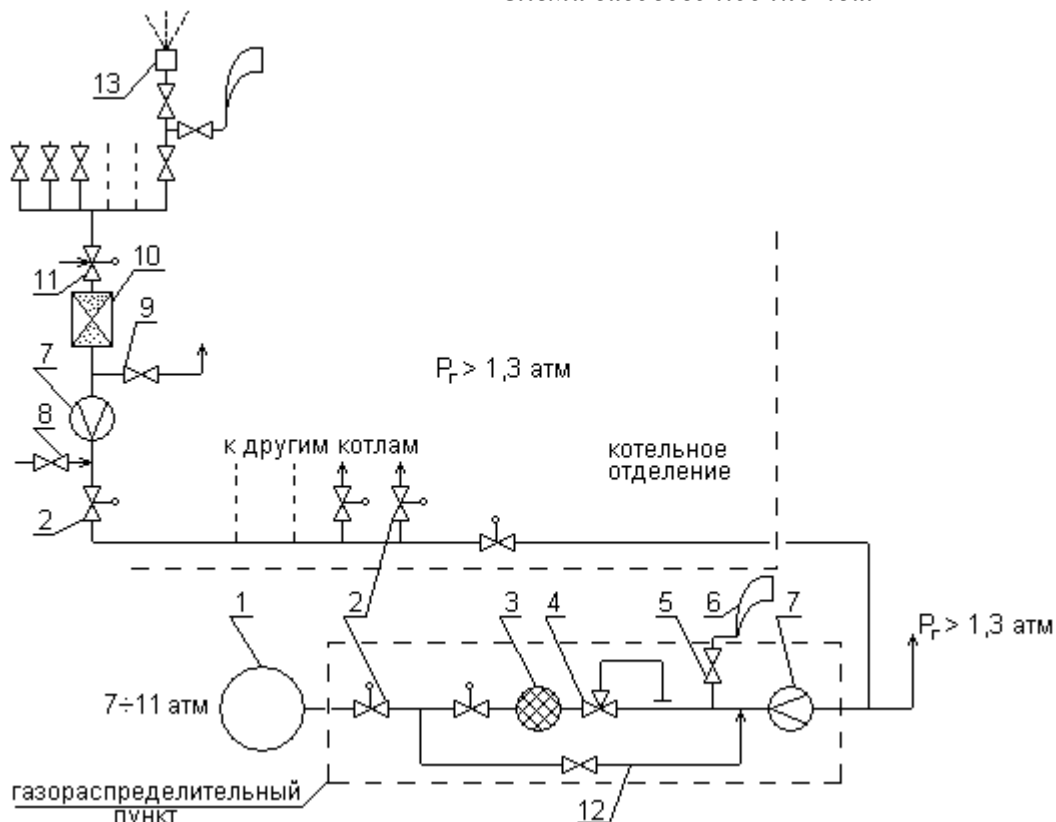
III – газомазутная точка.

- 1 – эстакада по сливным желобкам.
- 2, 8 – фильтры грубой и тонкой очистки.
- 3 – приёмная ёмкость.
- 4 – перекачивающий насос.
- 5 – расходная ёмкость (90°C).
- 6,9 – насосы первого и второго подъёма.
- 7 – подогреватель мазута.
- 10 – запорная задвижка.
- 11 – отсечной клапан для срочного отключения топлива.
- 12 – регулятор давления для изменения расхода топлива.
- 13 – расходомер.
- 14 – форсунки.
- 15 – линия возврата мазута.

Для исключения застывания мазута, мазутопроводам придаются паровые спутники:



*Схема газового хозяйства.*



Позиции:

- 1 – газовая магистраль.
- 2 – задвижка с электроприводом.
- 3 – фильтр.
- 4 – регулятор давления.
- 5 – предохранительный клапан (для аварийного сброса газа).
- 6 – газовая свеча (трубопровод в атмосферу).
- 7 – расходомер.
- 8 – подача сжатого воздуха.
- 9 – линия к запальнику.
- 10 – отсечной газовый клапан (ОКГ).

11 – регулирующий клапан.

12 – байпасная линия (мера предосторожности на случай аварии основной линии).

13 – газовая горелка.

При выводе газопровода в ремонт, он продувается сжатым воздухом через свечи 6. При этом соблюдают условие  $CH_{4\text{остаточное}} < 1\%$ .

Перед растопкой все газоходы заполняются топливом, при этом должно быть  $O_{2\text{остаточное}} < 1\%$ .

*Факельные топочные устройства:*

1) пылеугольные.

2) газомазутные.

### Пылеугольные горелки.

Бывают *вихревые* и *прямоточные*.

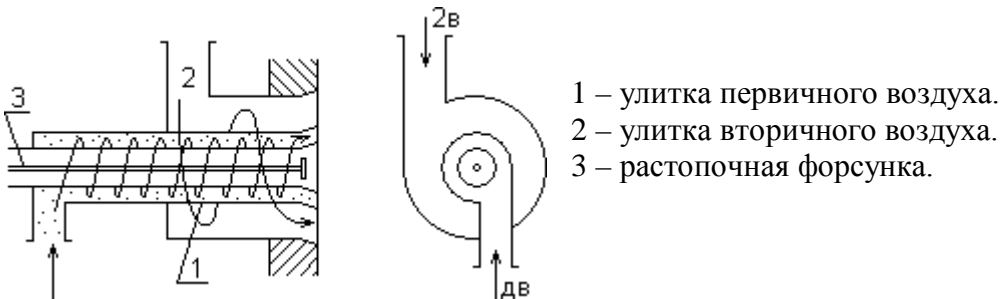
*Вихревые:*

1) Горелка ОРГРЭС.



$$\gamma - \text{угол раскрытия факела} = 30 \text{ КУ} - 10 \text{ Т} - 110 \text{ АШ} = f(V^{\Gamma}).$$

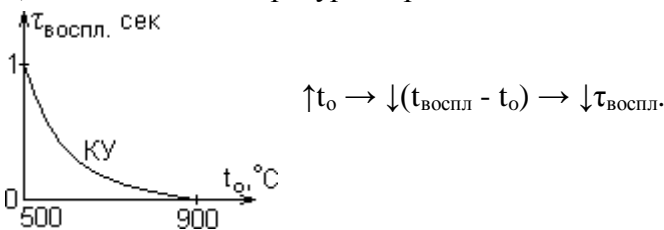
2) Горелка ТКЗ (таганрогский котельный завод).



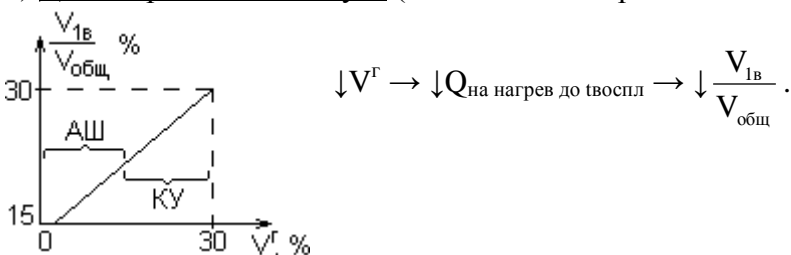
Все вихревые горелки даёт короткий, широкий, недальнобойный факел:  $\frac{L_D}{D_{\text{амбр}}} = 3 \div 4$ .

*Факторы влияющие на воспламенение:*

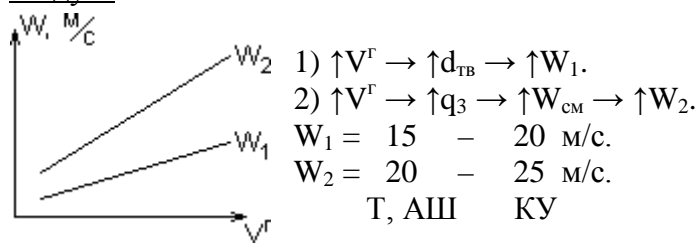
1) Начальная температуры аэросмеси:



2) Доля первичного воздуха (для снижения времени воспламенения её ограничивают).



3) Для нормальной работы горелок принимают оптимальные скорости первичного и вторичного воздуха:



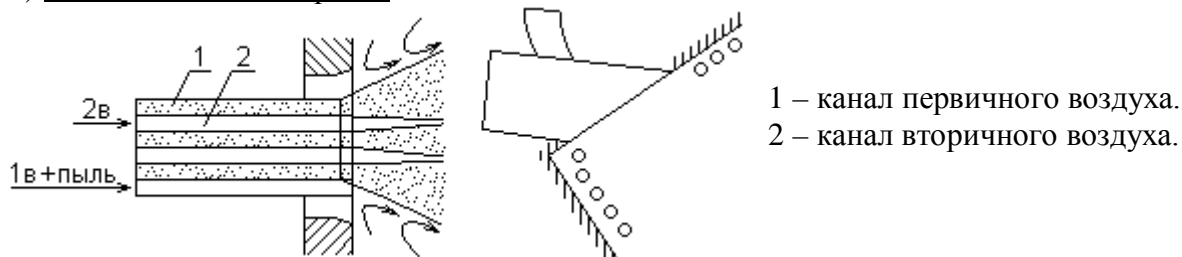
Достоинства:

- 1) эффективность смесеобразования.
- 2) широкий диапазон регулирования.
- 3) недальнобойность.

Применяют АШ, Т, КУ (при условии использования ШБМ и МШС).

Прямоточные:

- 1) Угловая щелевая горелка.



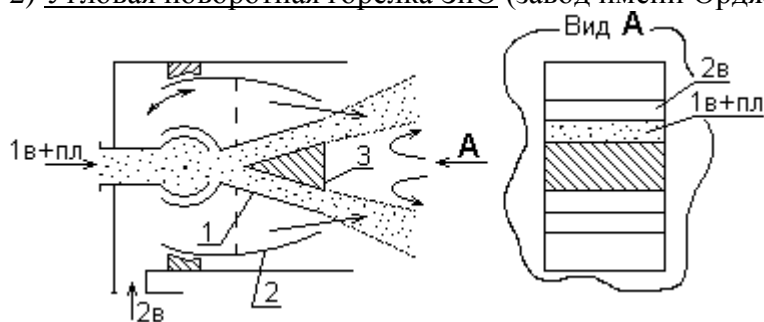
Особенности:

- 1) вялое неинтенсивное смесеобразование.
- 2) отсутствие турбулизирующего эффекта.
- 3) малый угол раскрытия факела.
- 4) высокая дальнобойность.

Т, АШ КУ

## Лекция №12

2) Угловая поворотная горелка ЗиО (завод имени Орджоникидзе):



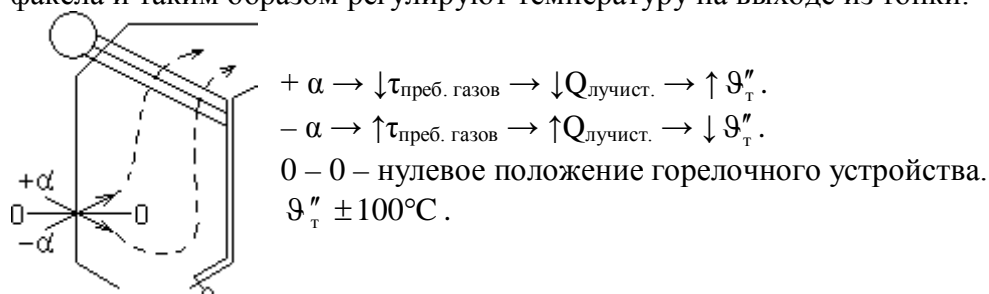
Позиции:

1 – сопло первичного воздуха.

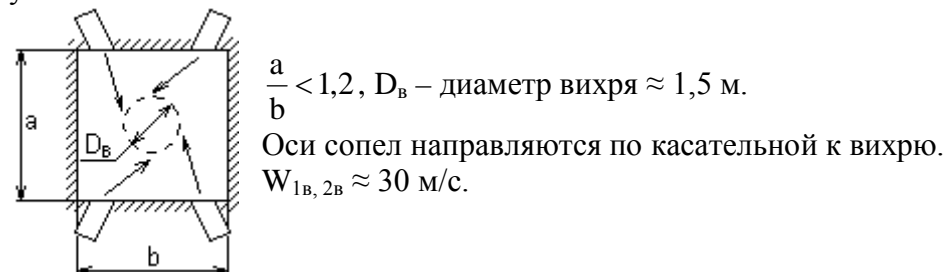
2 – сопло вторичного воздуха.

3 – рассекаТЕЛЬ.

Поворотом сопел вверх/вниз ( $\pm 15^\circ$ ) меняют направление ввода аэросмеси в топку, положение факела и таким образом регулируют температуру на выходе из топки:

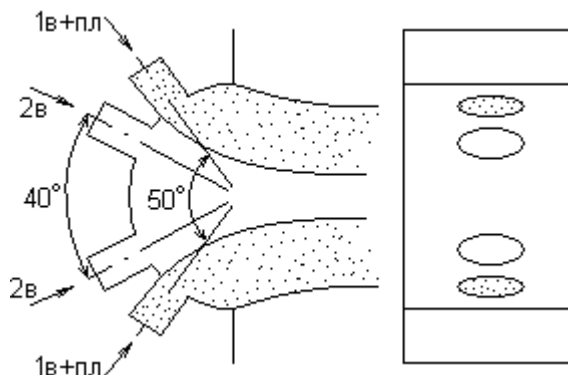


Все прямооточные дают слаборасширяющийся дальнобойный факел. Для снижения дальнобойности, ускорения воспламенения и повышения сгорания топлива горелки размещают по углам топки:

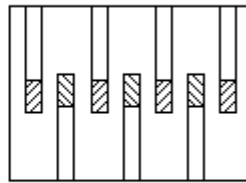
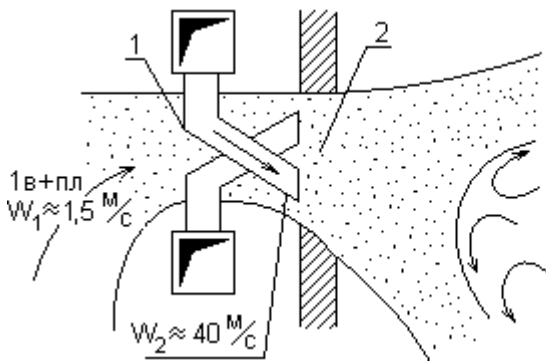


Применяют для сжигания бурых и каменных углей.

3) Плоскофакельная горелка:



4) Эжекционная горелка – амбразура (центральный котлотурбинный институт):



Позиции:

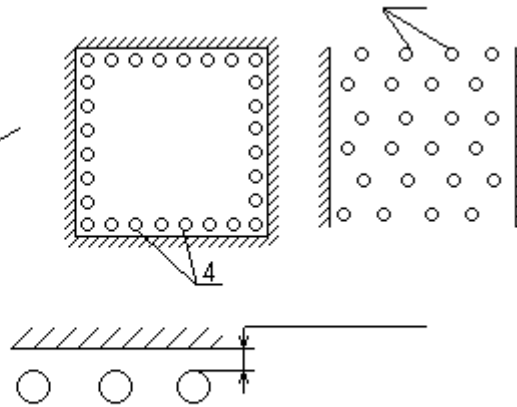
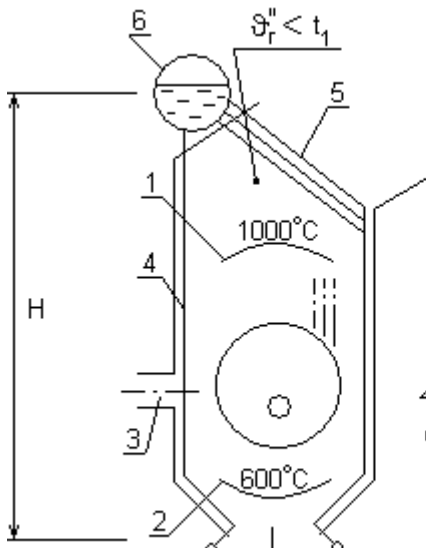
1 – эжекционные сопла.

2 – амбразура.

Сопла 1 делят аэрозоль на плоские вертикальные струи. Их развёрнутая компоновка способствует разносу факела вверх и вниз и ускоряет воспламенение.

Применяют при сжигании торфа, БУ, КУ (с  $V^r > 30\%$  и размоле в молотковых мельницах).

### Топка с твёрдым шлакоудалением.



Позиции:

1 – топочный объём.

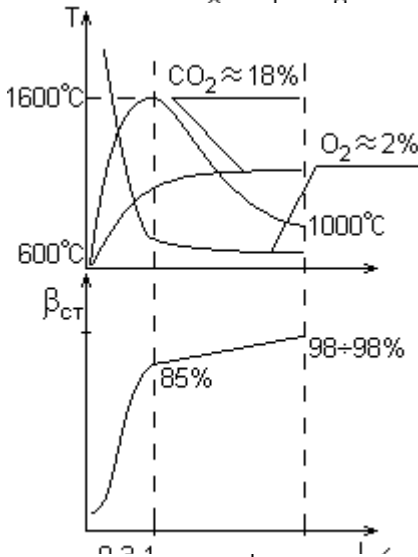
2 – «холодная» воронка.

3 – амбразура.

4 – топочные экраны.

5 – фестон.

6 – барабан.



$t \approx 600^\circ\text{C}$ ,  $d_n = 50-60 \text{ мм}$ ,  $H = 10?40 \text{ м}$ .

Теплонагрузка экранов  $q_{\text{экр}} = 0,1?0,3 \text{ МВт/м}^2$ . Допустимая температура  $\vartheta_r'' = 1000?1100^\circ\text{C}$ .

Выгорание топлива по длине факела неравномерно.

$\beta_{\text{ст}}$  – полнота сгорания.

$l/l_{\text{ф}}$  – относительная длина факела.

Показатели работы:

БУ КУ  
 $\alpha_r'' = 1,2$ ,  $q_3 = 0,5\%$ ,  $q_4 = 0,5?2\%$ ,  $q_v^p = 0,15?2 \text{ МВт/м}^3$ .

Достоинства:

1)  $q_6 \approx 0$  (низкая  $a_{\text{шл}}$ , низкая  $t_{\text{шл}}$ ).

Недостатки:

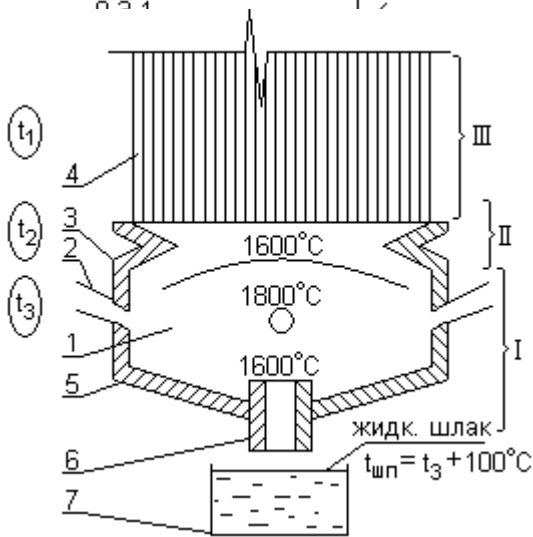
1) значительный вынос частиц золы в газоходы 95% и как следствия:

а) загрязнение поверхностей нагрева.

б) абразивный износ труб.

Применяют при сжигании торфа, БУ и КУ с  $V^r > 30\%$ .

### Топка с жидким шлакоудалением.



Позиции:

- 1 – камера горения, покрытая огнеупорным материалом (в ней сгорает 90% топлива).
- 2 – горелки.
- 3 – пережим (за счёт него  $a_{шл} \approx 15\%$ ).
- 4 – камера охлаждения (здесь сгорают оставшиеся 10%).
- 5 – под.
- 6 – летка.
- 7 – шлакоприёмное устройство (ШПУ).

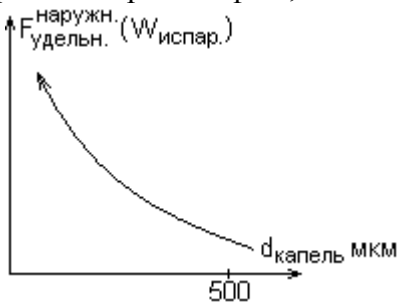
- I – зона расплавленного шлака.
- II – зона вязкого размягчённого состояния.
- III – зона гранулированных частиц.

Показатели работы:

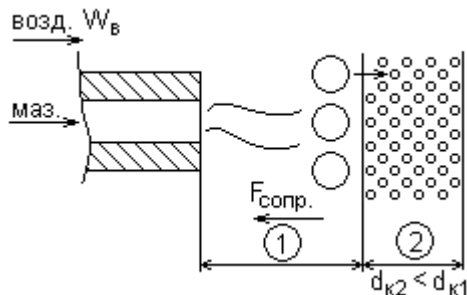
$\alpha_T'' = 1,15$ ,  $q_3 = 0,03\%$ ,  $q_4 = 2,4\%$ ,  $q_v^p = 0,225 \text{ МВт/м}^3$ ,  $q_6 \approx 1\%$  (высокая  $a_{шл}$  и высокая  $t_{шл}$ ).  
 Применяют при сжигании углей с низким выходом летучих веществ ( $V^r < 15\%$  напр. Т, АШ).

### Организация сжигания жидкого топлива.

Мазут горит в паровой фазе, поэтому скорость горения определяется скоростью испарения топлива:



Для повышения скорости горения необходимо распыление топлива на мелкие капли  $< 500 \text{ мкм}$ . Распыление осуществляется форсунками и проводится в две стадии:



- 1 – распад струи за счёт собственных колебаний на крупные капли,  $d_{к1} \sim 1/W_{струи}$ .
- 2 – дробление крупных капель на мелкие.

$P_{внеш} = \frac{F_{внутр}}{S}$  – внешнее давление, где  $S$  – поперечное сечение капли.

$P_{внутр} = \frac{4\sigma}{d_k}$  – внутренне давление, где  $\sigma$  – поверхностное

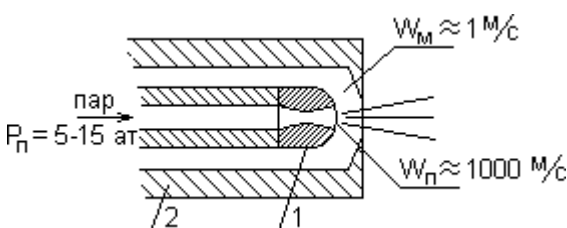
натяжение капли.

Если  $P_{внеш} > P_{внутр} \Rightarrow$  происходит дробление капли.

$d_k^{max} = \frac{8\sigma}{\rho_v (W_k - W_v)^2}$ . Для уменьшения  $d_k$  необходимо:

- 1) увеличивать  $(W_{отн}) = (W_k - W_v)$ .
- 2) уменьшать поверхностное натяжение нагревом. При кипении  $\sigma = 0$ .

### Паровые форсунки.



- Позиции:  
 1 – сопло.  
 2 – корпус.

$t_m \approx 100^\circ\text{C}$ ,  $\text{БУ} \approx 5^\circ$ ,  $d_k \sim 1/W_{пар}$ .

Достоинства:

- 1) качественное распыление на мелкие капли.

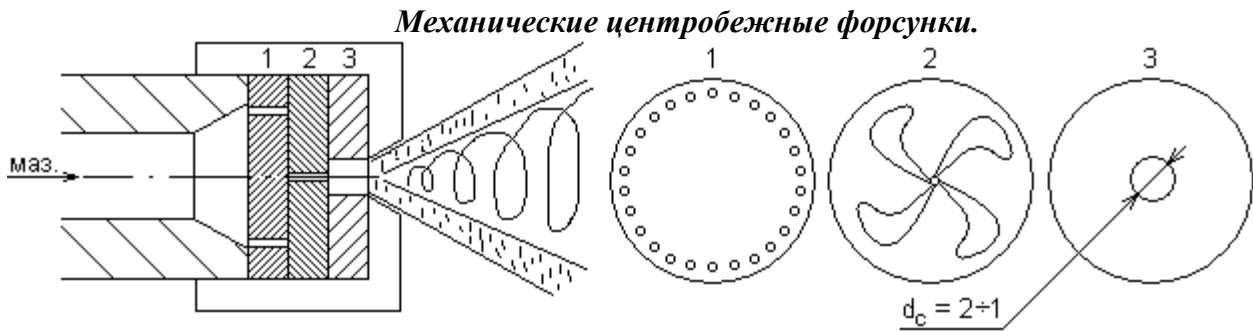
2) широкий диапазон регулирования 25%?100%.

**Недостатки:**

1) высокий расход пара  $\frac{G_{п}}{B_{м}} = 0,3?0,4$  кг/кг.

2) высокие потери  $q_2$  ( $\uparrow V_{H_2O}$ ).

Применяют при растопке пылеугольных топок.



Позиции:

1 – распределитель.

2 – завихритель.

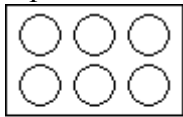
3 – шайба (выходная).

$P_{м} = 15?35$  ат,  $t_{м} = 120?130^{\circ}C$ ,  $BУ \leq 2,5^{\circ}$ .

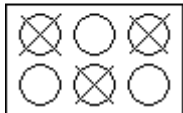
В результате закручивания мазут в топку поступает в виде конической плёнки  $d_{к} \sim \frac{1}{P_{м}^{0,5}}$ .

При снижении нагрузки  $B_{ф} = k \cdot \Delta P_{ф} \rightarrow \downarrow P_{м}$ . При  $B < 60\%$  от  $B_{ном}$ , когда  $P_{м} < 12$  ат.  $\rightarrow \uparrow \uparrow d_{к}$ , то есть заметно возрастает размер капель и в связи с этим возрастают  $q_3$  и  $q_4$ . Поэтому глубокое регулирование нагрузки осуществляется путём отключения части горелок:

Фронтальная стенка котла



$D = 100\%$  – зима.



$D = 50\%$  – лето.

**Достоинства:**

1) меньше энергозатраты.

2) компактность.

**Недостатки:**

1) узкий диапазон регулирования 60% – 100%.

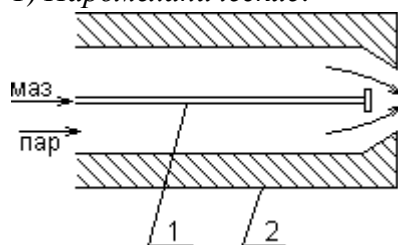
2) высокие требования к очистке.

Применяют при постоянном сжигании мазута.

## Лекция №13

### Комбинированные форсунки.

#### 1) Паромеханические.



Позиции:

1 – механическая форсунка.

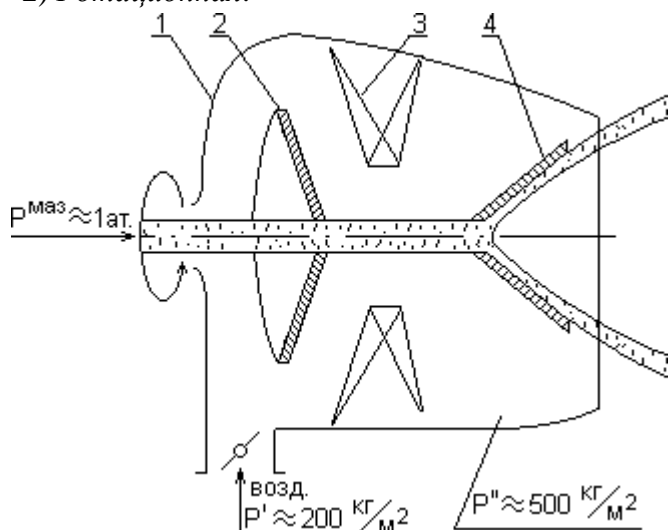
2 – корпус.

$$\frac{G_{\text{п}}}{B_{\text{м}}} = 0,05 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

При  $D = 100\%$  – распыл механический (пар не требуется).

При  $D < 60\%$  – паровой + механический распылы.

#### 2) Ротационная.



Позиции:

1 – полый ствол.

2 – лопасти вентилятора.

3 – лопасти завихрителя.

4 – вращающийся конус.

При вращении конуса топливо в топку поступает в виде конической плёнки, которая распадается на капли, превращающиеся в более мелкие под влиянием воздуха.

Достоинства:

1) широкий диапазон регулирования (25? 100%).

2) нетребовательность к очистке.

Недостатки:

1) грубый распыл.

2) сложность конструирования и эксплуатации.

Применяют при сжигании низкосортных топлив.

### Дисперсионные характеристики.

При распылении размер капель составляет  $d_k = 1?800$  мкм. Он зависит от:

1) типа форсунки.

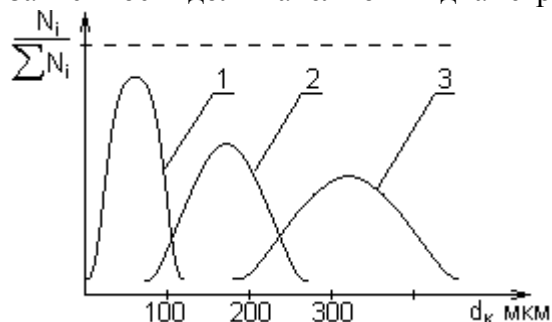
2) производительности ( $\uparrow B_{\text{ф}} \rightarrow \uparrow d_{\text{сопл}} \rightarrow \uparrow d_k^{\text{ср}}$ ).

3) марки мазута:

ВУ <sub>50</sub> , ?	40	100	200
$t_{\text{заст}}$ , °С	+10	+25	+35
Марка	M40	M100	M200

4) давления и температуры ( $\text{с } \uparrow(t_{\text{м}} \text{ и } P_{\text{м}}) \rightarrow \downarrow d_k$ ).

Зависимость доли капель от их диаметра подчиняется закону распределения вероятности:



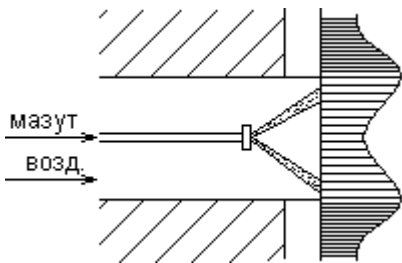
Позиции:

1 – паровая форсунка.

2 – механическая форсунка.

3 – ротационная.

Распределение капель по сечению горелки, также неравномерно. Эпюра плотности распределения капель (частая штриховка – крупные капли):



Крупные капли выходят за пределы зоны активного горения и оказываются в области, где температура  $< 1000^{\circ}\text{C}$ , а  $\alpha < 1$ , что повышает  $q_3$  и  $q_4$ .

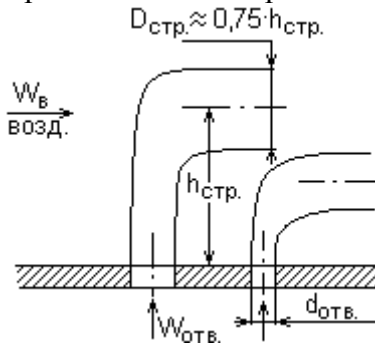
Для эффективного сжигания необходимо интенсивное перемешивание топлива и окислителя, что достигается воздушными регистрами.

### Организация сжигания природного газа.

Подача газа:

- 1) Центральная.
- 2) Периферийная.

Фрагмент коллектора:



$h_{стр.}$  = глубина проникновения струи в воздушный поток определяется соотношением динамических напоров топлива и

$$\text{воздуха: } h_{стр.} \sim d_{отв} \cdot \frac{W_{отв}}{W_B} \cdot \left( \frac{\rho_f}{\rho_B} \right)^{0,5}$$

При  $\{\uparrow d_{отв}, \uparrow W_{отв}, \downarrow W_B\}$   $h_{стр.}$  растёт.

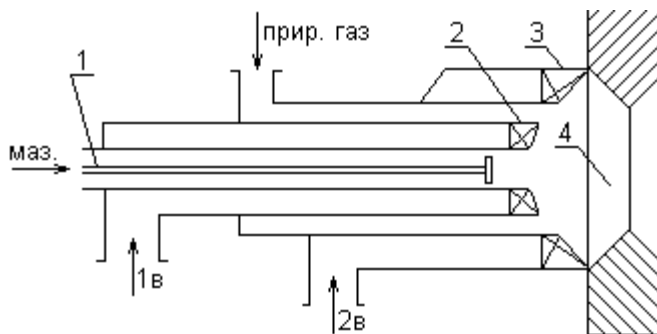
### Характеристики:

$D_{отв}$ ,  $W_{отв}$ ,  $W_B$  – принимают таким образом, чтобы исключить слияние труб и их касание амбразуры.

### Газомазутные горелки.

Так как для газа и мазута теоретический объём воздуха  $\approx 10 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а  $Q_H^p = 37,43 \text{ МДж/кг}$ , то в этих горелках возможно раздельное сжигание того или другого топлива.

1) ГМГ-М:



Позиции:

1 – мазутная форсунка.

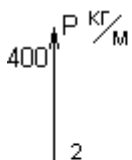
2 – завихритель первичного воздуха  $\left( \frac{V_1}{V_{общ}} \right) \approx$

$\approx 15\%$ .

3 – завихритель вторичного воздуха.

4 – биконическая амбразура.

При снижении нагрузки снижаются напоры газа и воздуха:



$$W_g = 200,800 \text{ кг/ч.}$$

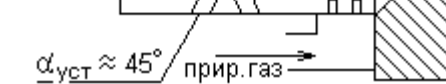
$$\alpha'' \approx 1,1, \quad q_3 = 0,1,1\%, \quad q_4 = 0,0,2\%.$$

Применяют в котлах малой мощности.

2) Горелка БКЗ:

Позиции:

1 – форсунка.

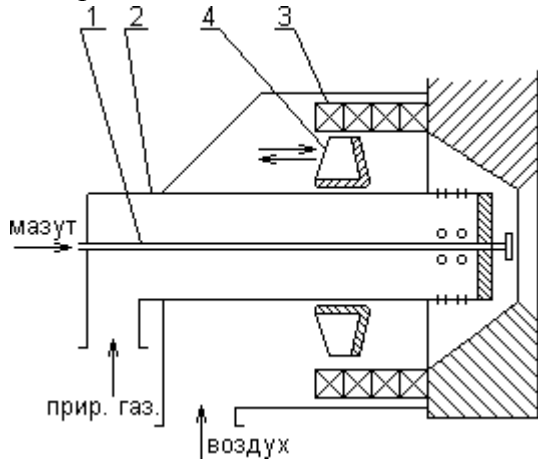


- 2 – газораспределительный коллектор.
- 3 – воздушный регистр.

$W_{отв} \approx 80 \text{ м/с}$ ,  $W_{в} \approx 40 \text{ м/с}$ ,  $d_{отв} = 4\text{?}6 \text{ мм}$ ,  $V_{г} = 400\text{?}1500 \text{ кг/ч}$ .

Применяют в котлах средней мощности.

3) Горелка ТКЗ:



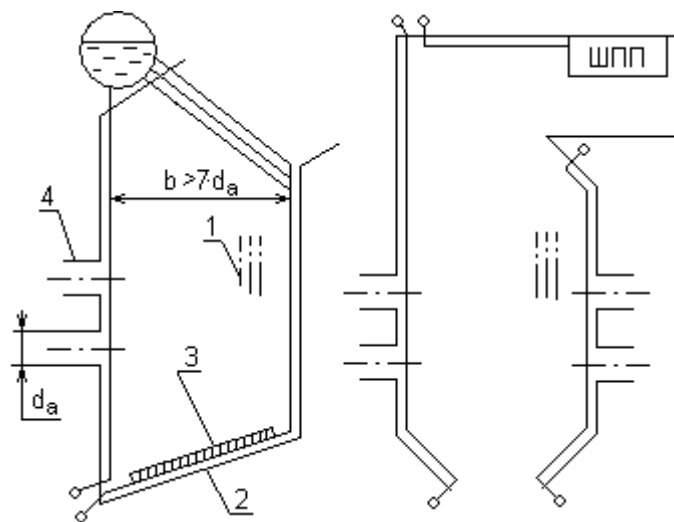
Позиции:

- 1 – форсунка.
- 2 – газораспределительный коллектор.
- 3 – секция лопаточного аппарата.
- 4 – дисковый шибер (при его смещении влево/вправо регулируется расход воздуха, при сохранении степени закручивания воздушного потока).

$W_{отв} \approx 80 \text{ м/с}$ ,  $W_{в} \approx 40 \text{ м/с}$ ,  $P_{г} = 300\text{?}1000 \text{ кг/м}^2$ ,  $V_{г} = 1\text{?}6 \text{ т/ч}$ .

Применяют в котлах большой мощности.

**Газомазутные топки.**



Позиции:

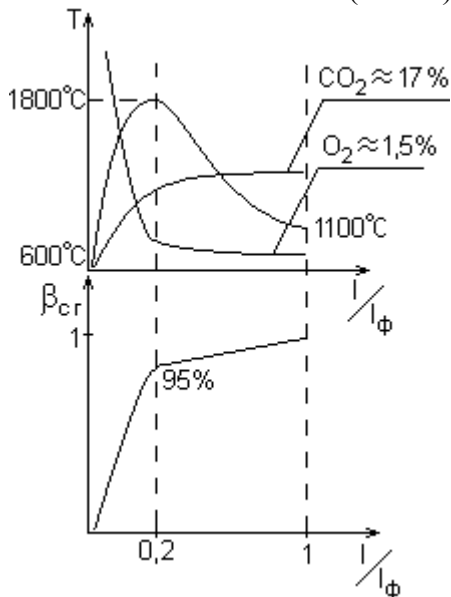
- 1 – топочные экраны.
- 2 – под.
- 3 – огнеупорное покрытие (для защиты труб от пережога при низкой D).
- 4 – амбразуры.

Расположение горелок:

а) фронтальное (смещение факела к заднему экрану и пережог его труб).

б) встречное (много горелок, поэтому эксплуатировать сложнее).

Основная часть топлива (~ 95%) сгорает зоне горелок:



Режимные характеристики:

$$q_{\text{экp}}^{\text{max}} \approx 0,4 \div 0,5 \text{ МВт/м}^2, \quad \alpha_t'' = 1,03 \div 1,1.$$

$$q_{\text{экp}}^{\text{доп}} \approx 0,3 \div 0,35 \text{ МВт/м}^2, \quad q_3 = 0 \div 0,5\%, \quad q_4 = 0\%$$

мазут природный  
газ

#### Основные характеристики паровых котлов.

- 1) Паропроизводительность – D т/ч, кг/с.
- 2) Давление перегретого пара – P<sub>пе</sub> МПа, ат.
- 3) Температура перегретого пара – t<sub>пе</sub> °С.
- 4) Температура питательной воды – t<sub>пв</sub> °С.

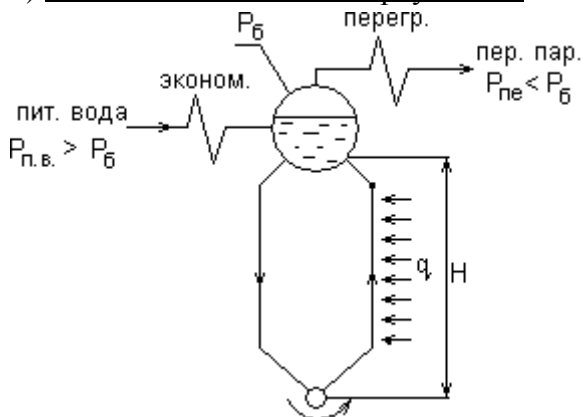
Паровые котлы классифицируют по давлению:

Тип котла	P <sub>пе</sub> , МПа	t <sub>пе</sub> , °С	t <sub>пв</sub> °С	D, т/ч
низкого	1,3	< 250	102	4-6-10-20-50
среднего	4	450	150	25-35-50-75
высокого	10	510	215	140-230-320
сверхвысокого	14	545	230	420-500-640-670
сверхкритического	25,5	545	260	950-1600-2600-4000

## Лекция №14

### Схемы водопаровых трактов котла.

#### 1) Котёл с естественной циркуляцией:



$$1 - X'' = 0,03 \div 0,2 \text{ кг/кг.}$$

$$P_{\text{оп}} = H \cdot \rho' \cdot g, \quad P_{\text{под}} = H \cdot \rho_{\text{см}} \cdot g, \quad S_{\text{движ}} = H \cdot (\rho' - \rho_{\text{см}}) \cdot g.$$

Засчёт  $S_{\text{движ}}$  рабочая среда циркулирует с кратностью

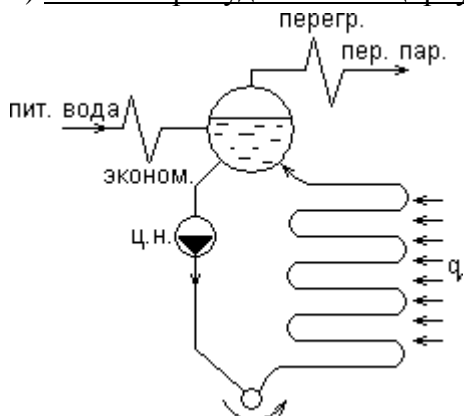
$$\text{циркуляции: } k = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{п}}} = \frac{1}{X''} = 5 \div 30$$

Недостаток: нарушение циркуляции, когда  $\frac{D}{D_{\text{ном}}} < 40\%$

$$- \downarrow D \rightarrow \downarrow V \rightarrow \downarrow q \rightarrow \uparrow X \rightarrow \downarrow \rho_{\text{см}} \rightarrow \downarrow S_{\text{движ}} \rightarrow \downarrow k.$$

Приведённый недостаток является основным для барабанных котлов.

#### 2) Котёл с принудительной циркуляцией:



ц.н. – циркуляционный насос.

$S_{\text{движ}}^{\text{прин}} > S_{\text{движ}}^{\text{ест}}$  в связи с чем:

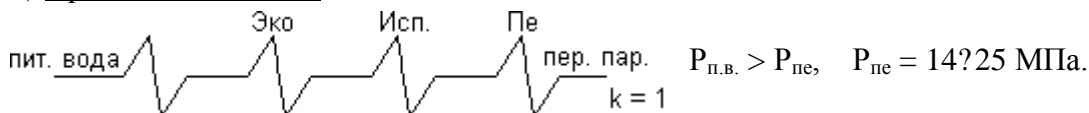
1) снижается  $k$  до 2?5.

2) испарительные поверхности можно выполнять в виде змеевиков.

3) надёжная работа при низких нагрузках.

Применяют в котлах утилизаторах.

#### 3) Прямоточный котёл:



Достоинство возможность работы на сверхкритических параметрах.

### Типы и типоразмеры паровых котлов.

Е – котёл с естественной циркуляцией.

П – прямоточный котёл.

Типоразмеры:

Е – 420 – 13,8 – 545 КЖ

1    2    3    4    5

1 – естественная циркуляция.

2 – паропроизводительность, т/ч.

3 – давление за перегревателем, МПа.

4 – температура перегретого пара, °С.

5 – каменный уголь, жидкое шлакоудаление.

Пп – 950 – 25,5 – 545/545 ГМ

1    2    3    4    5

1 – прямоточный с промежуточным пароперегревателем.

2 – паропроизводительность, т/ч.

3 – давление за перегревателем, МПа.

4 – тем-ра перегретого пара / тем-ра перегретого пара вторичного пароперегревателя, °С.

5 – газомазутный.

Заводские типоразмеры:

Т – таганрогский котельный завод:

ТГМП – 1202 – таганрогский, газомазутный, прямоточный.

ТГМЕ – 464 – таганрогский, газомазутный, естественная циркуляция.

ТПП – 210 – таганрогский, пылеугольный, прямоточный.

П – подольский машиностроительный завод:

П – 57, П – 59, П – 67.

БКЗ – барнаульский котельный завод:

БКЗ – 75 – 39 – ФБ  
1 2 3 4

1 – барнаульский котельный завод.

2 – паропроизводительность, т/ч.

3 – давление за перегревателем, МПа.

4 – фрезерный торф, бурый уголь.

БелКЗ – белгородский котельный завод:

Б – 50 – 40 (эквивалент Е – 50 – 40).

ГМ – 50.

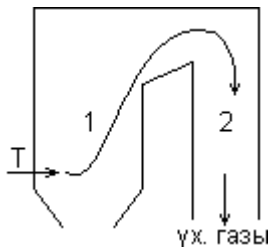
БиКЗ – бийский котельный завод:

ДКВр – 10 – 13 – водогрейный.

КВ – ГМ – 50 – водогрейный, 50 Гкал/ч.

### *Профили паровых котлов.*

1) П – образный:



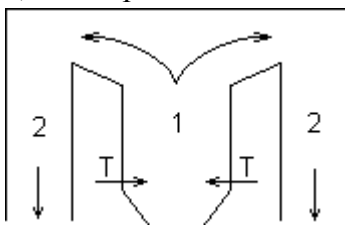
Позиции

1 – топка.

2 – газоходы.

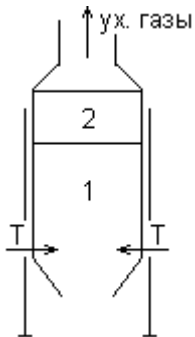
Недостаток неравномерное заполнение топки и газоходов продуктами сгорания.

2) Т – образный:



Недостаток сложность отвода уходящих газов дымососами.

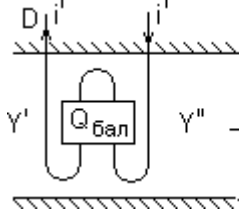
3) Башенный:



## Компоновка и тепловая схема парового котла.

Взаимное расположение газоходов и поверхностей нагрева.

Для произвольной поверхности:

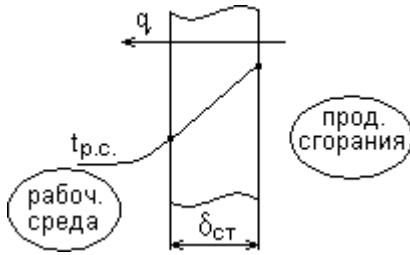


$$\text{Тепловосприятие: } Q = \frac{D}{B} \cdot (i'' - i') = Q_{\text{бал}} = \varphi \cdot (Y'' - Y').$$

$$\text{Уравнение теплопередачи: } Q_{\text{т}} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot H}{B}.$$

$$\text{Общее тепловосприятие: } Q_p^p \cdot \eta_k^{\text{бр}} = \sum_1^n Q_6^i.$$

Температура стенки трубы поверхности нагрева:



$$q = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_o) = q = \alpha_2 \cdot (t_o - t_{\text{р.с.}}) \Rightarrow t_{\text{ст}} = t_{\text{р.с.}} + q \cdot \left( \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$

– температура наружной стенки трубы.

$$\text{Для чистых труб } \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \approx \frac{3 \cdot 10^{-3}}{40} \approx 0 \Rightarrow t_{\text{ст}} = t_{\text{р.с.}} + \frac{q}{\alpha_2}.$$

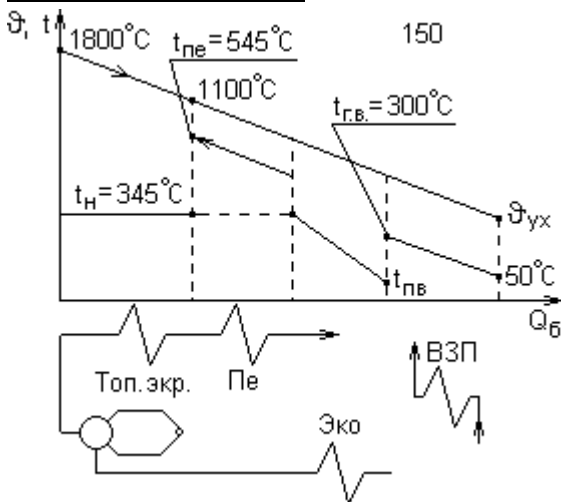
Основная задача эксплуатации сводится к тому, чтобы  $t_{\text{ст}} < t_{\text{металл}}^{\text{допуст}}$ :

- 1)  $\downarrow t_{\text{р.с.}}$  нельзя, т.к.  $t_{\text{р.с.}} = f(P_{\text{п}})$ .
- 2)  $\downarrow q$  нельзя, т.к. при  $\downarrow q \rightarrow \uparrow H$ .
- 3)  $\uparrow \alpha_2 \sim W_{\text{р.с.}}^{0,6}$ .

Требования к компоновке:

- 1) Поверхности с высокой температурой рабочей среды, размещать в месте с высокой температурой газов ( $\uparrow t_{\text{р.с.}} \rightarrow \uparrow \vartheta_r$ ).
- 2) Осуществлять противоточную схему движения ( $\Delta t_{\text{прот.}} > \Delta t_{\text{прям.}}$ ).
- 3) Выполнять требования обусловленные надёжностью работы металла труб ( $t_{\text{ст}} < t_{\text{металла}}^{\text{допуст}}$ ).

Тепловая схема котла:



## Гидродинамика парового котла.

Для нормальной работы котла необходим надёжный теплоотвод от поверхности нагрева к рабочей среде, чтобы имело место неравенство  $t_{\text{ст}} < t_{\text{металла}}^{\text{допуст}}$ . Условия охлаждения металла зависят от режима течения и структуры рабочей среды.

Характеристики движения потока:

Массовое паросодержание:  $X = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{п}} + G_{\text{в}}} \text{ кг/кг.}$

Массовая скорость:  $W_{\rho} = \frac{G}{f} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с).}$

Приведённые скорости воды и пара:  $W'_o = \frac{G_B}{\rho' \cdot f}$  м/с,  $W''_o = \frac{G_{п}}{\rho'' \cdot f}$  м/с.

Скорость циркуляции:  $W_o = \frac{G_{см}}{\rho'' \cdot f}$  м/с.

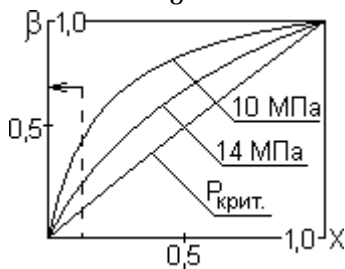
Скорость пароводяной смеси:  $W_{см} = \frac{G_{см}}{\rho_{см} \cdot f} = W'_o + W''_o = W_o \cdot (1 + X(\frac{\rho''}{\rho'} - 1))$  м/с.

Объёмное паросодержание:  $\beta = \frac{V_{п}}{V_{п} + V_B} = \frac{W_{п}}{W_{см}} \cdot \frac{f_{п}}{f} = \frac{\varphi}{C}$ , где  $\varphi = \frac{f_{п}}{f}$  – истинное паросодержание, а

$\frac{1}{C}$  – характеризует относительную скорость потоков ( $W_{п}$  и  $W_{см}$ ). Для подъёмных труб топочных экранов  $W_{п} > W_{см}$ , поэтому  $\beta > \varphi$ .

1) с  $\uparrow X \rightarrow \uparrow \beta$ .

2) с  $\uparrow P \rightarrow (\frac{\rho''}{\rho'} \rightarrow 1) \rightarrow (\beta \rightarrow X)$

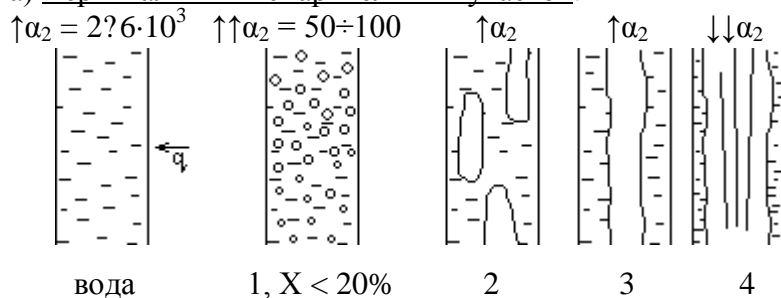


**Режимы течения и структура рабочей среды в испарительных поверхностях нагрева.**

Зависит от:

- 1) X.
- 2) q.
- 3)  $W_{потока}$ .
- 4) P

а) Вертикальный испарительный участок:



1 – пузырьковый режим.

$d_{пуз} \approx 1.2$  мм.  $\alpha_2^{пуз} = 0.34 \cdot P^{0.43} \cdot q^{0.7}$ , от обоих параметров степенная зависимость с различной кривизной.

с  $\uparrow P \rightarrow \uparrow t_{нас} \rightarrow \downarrow \sigma_{пуз} \rightarrow \downarrow d_{пуз} \rightarrow \uparrow \alpha_2$ .

с  $\uparrow q \rightarrow \uparrow$  Кол-во пузырей  $\rightarrow \uparrow \alpha_2$ .

2 – снарядный режим.

$X_2 > X_1$ .

3 – стержневой.

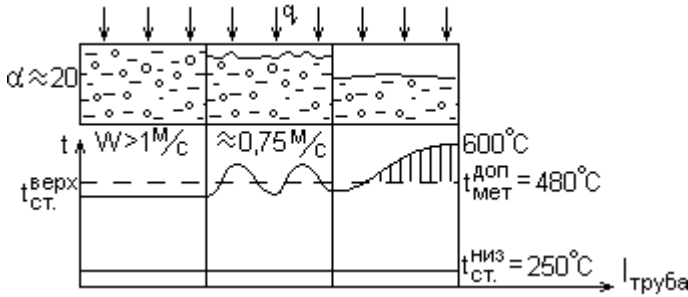
$X_3 > 60\%$ .

4 – эмульсионный.

$X_4 > 90\%$ .

## Лекция №15

### б) Горизонтальный испарительный участок:



Дополнительное влияние здесь оказывает скорость потока:

При  $\downarrow W$  за счёт разности плотностей воды и пара происходит расслоение смеси с захлёстыванием верхней образующей. Это приводит к перегреву и разрыву труб в результате длительного влияния усталостных напряжений.

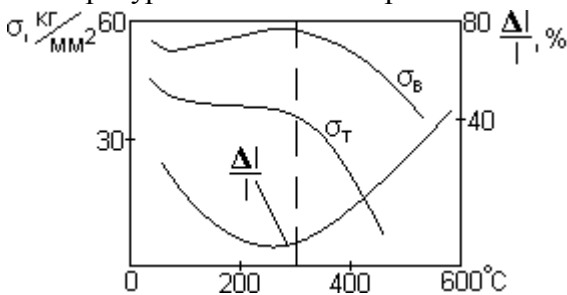
При  $W < 0,5$  м/с происходит перегрев и пережог верхней образующей.  
Для исключения пережога:

- $\frac{D}{D_{ном}} > 0,4.$

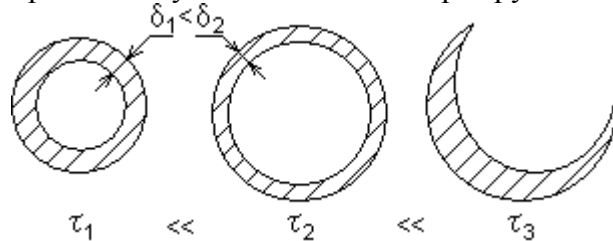
- защита слабонаклонных участков огнеупорным материалом (под).

### **Особенности работы металла труб поверхностей нагрева.**

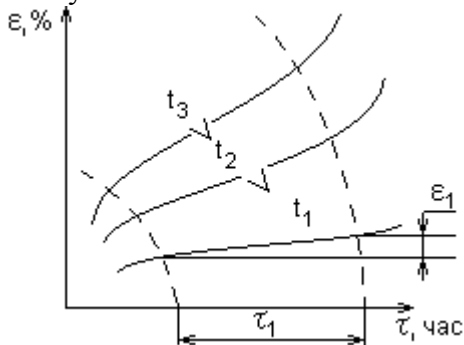
Поверхности нагрева работают в тяжёлых условиях ( $P = 60?180$  ат,  $t = 200?600^{\circ}C$ ). С увеличением нагрузки возрастает напряжение в металле и его относительное удлинение. С увеличением температуры металлы его прочность снижается, а пластичность возрастает:



При  $t > 450^{\circ}C$  в металле возникает ползучесть, что приводит к увеличению диаметра труб и их разрыву:



Поэтому при определённой температуре металла марку стали выбирают с учётом диаграммы ползучести:



Скорость ползучести металла не должна превышать допустимой величины:  $v_{пол} = \frac{\epsilon_1}{\tau_1} < v_{пол}^{доп} = 10^{-5} \%$ /ч, т.е. за  $10^5$  часов  $\epsilon < 1\%$ .

### **Газовая коррозия труб и окалинообразование.**

Поверхности нагрева омываются высокотемпературными газами и подвергаются газовой коррозии (окалинообразованию).



При  $t > 500^{\circ}C$  З.О.П. не держится и начинается газовая коррозия. Это характерно для Ст10 и Ст20.

Для повышения окалиностойкости и прочности металла в него добавляют легаты. (хром (X), молибден (Мо), ванадий (Ф), никель (Н), титан (Т), марганец (Г), кремний (С)).  
 X, Mo, T – для повышения жаропрочности и окалиностойкости.  
 Г, С – для повышения механической прочности.

### Марки сталей.

#### 1) Барабаны котлов.

$P < 100$  ат. (15К, 20К) – низколегированная сталь,  $Mn < 0,9\%$ .

$P > 100$  ат. (16ГНМ, 16ГС – С = 0,16%,  $Mn > 0,9\%$ ,  $Ni > 0,7\%$ ,  $Mo < 1\%$ ).

#### 2) Поверхности нагрева.

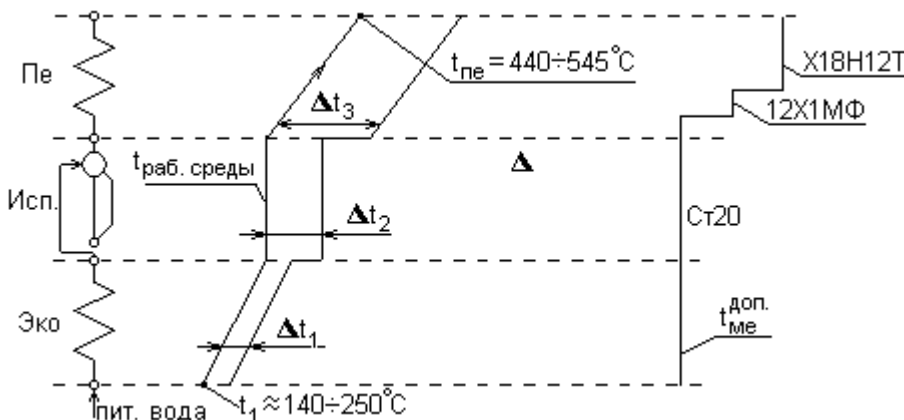
экономайзер, топочные экраны и перегреватель (с  $t_{пе} < 400^\circ\text{C}$ ) – Ст10, Ст20.

перегреватель с  $t_{пе} = 400\text{?}500^\circ\text{C}$  – 12Х1МФ (С = 0,12%,  $Cr > 1 \approx 1,2\%$ ,  $Mo \approx 0,55\%$ ,  $V \approx 0,35\%$ ).

перегреватель с  $t_{пе} = 545\text{?}560^\circ\text{C}$  – высоколегированный, Х18Н12Т (С очень мало,  $Cr = 18\%$ ,  $Ni = 12\%$ ,  $T \approx 0,5\%$ ).

ВЗП и каркас котла (работают при  $P = 1$  ат. и  $t < 400^\circ\text{C}$ ) – Ст3 (самая дешёвая сталь).

### Температурный режим работы труб барабанного котла.



Основная задача эксплуатации – обеспечение надёжного теплоотвода от металла к рабочей среде  
 $t_{ст} < t_{ме}^{доп}$ .

$$t_{ст} \approx t_{р.с.} + \frac{q}{\alpha_2} = t_{р.с.} + \Delta t \text{ – общий случай.}$$

#### 1) экономайзер:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow v_r < 400^\circ\text{C} \rightarrow \downarrow q \approx 5 \text{ кВт}/(\text{м}^2). \\ \downarrow t_{р.с.} < 340^\circ\text{C}. \\ \uparrow \alpha_2 \approx 2\text{?}5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \end{array} \right\} \Delta t_1 = 1\text{?}5^\circ\text{C}$$

#### 2) топочные экраны:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow v_r > 1600^\circ\text{C} \rightarrow \downarrow q \approx 200\text{?}500 \text{ кВт}/(\text{м}^2). \\ \downarrow t_{р.с.} < 350^\circ\text{C}. \\ \uparrow \alpha_2 \approx 50\text{?}100 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \end{array} \right\} \Delta t_1 = 5\text{?}15^\circ\text{C}$$

#### 3) перегреватель:

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow v_r < 800^\circ\text{C} \rightarrow \uparrow q \approx 30 \text{ кВт}/(\text{м}^2). \\ \downarrow t_{р.с.} > 400^\circ\text{C}. \\ \downarrow \alpha_2 < 1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \end{array} \right\} \Delta t_1 = 30\text{?}100^\circ\text{C}$$

## Лекция №16

### Водоподготовка.

Для промышленных котельных и ТЭЦ характерны значительные потери конденсата ввиду его загрязнения и невозвращения с производств. Поэтому подпитка каналов водой составляет 0,4-0,6 от  $D_{ном}$ . Восполнение потерь осуществляется сырой водой из водоёмов, в которых содержится:

- 1) растворённые соли Ca, Na, Mg, Fe, Al и других.
- 2) взвешенные и коллоидные частицы.
- 3) растворённые газы O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и т.д.

В исходном виде сырая вода для подпитки непригодна так как:

- 1) соли Ca и Mg образуют накипь, которую очень трудно удалить. Накипь образуется из-за того что  $C_{К.В.} > C_{К.В.}^{нак} \Rightarrow$  соли(Ca и Mg)↓. Имеют место следующие изменения:

$$t_{ст} = t_{p.c.} + q \cdot \left( \frac{\delta_{ст}^{нак}}{\lambda_{ст}^{нак}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = t_{ст}^{чист.Ме} + \Delta t_{ст}^{нак}; \quad \Delta t_{ст}^{нак} = q \cdot \frac{\delta_{ст}^{нак}}{\lambda_{ст}^{нак}} \approx 250^\circ\text{C}$$

т.е. температура стенки будет

равна  $t_{p.c.} + \Delta t_{нак} = (255 + 250) = 500^\circ\text{C} > t_{ст}^{доп} \Rightarrow$  пережёт стенок.

- 2) взвешенные и коллоидные частицы образуют осадок (шлам), который забивает трубную систему, нарушает циркуляцию и создаёт аварийные режимы работы.

- 3) растворённые газы:

- a. вызывают газовую коррозию металла.
- b. ухудшают теплоотдачу.

Состав воды:

- 1) взвесь ( $d_{тв} > 0,5$  мкм), удаляется отстаиванием.
- 2) коллоидальные частицы ( $d_{тв} < 0,5$  мкм) отстаиванием не удаляются.
- 3) растворённые соли Ca, Mg, Na, Fe, Al:  
CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> – хорошо растворимые  
CaSO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaSiO<sub>2</sub> – плохо растворимые

Накипь обусловлена присутствием солей Ca и Mg, которые характеризуют жёсткость воды:

$$Ж_{общ} = \frac{Ca^{+2}}{20} + \frac{Mg^{+2}}{16} \frac{\text{мг-экв}}{\text{кг}}, \text{ здесь } Ca^{+2} \text{ и } Mg^{+2} \text{ – концентрация катионов Ca и Mg, а 20 и 16}$$

– эквивалент их масс.

$$\text{Общая жёсткость воды} = Ж_{временная} + Ж_{постоянная}$$

$$Ж_{временная} \text{ – обусловлена присутствием в воде бикарбонатов, } Ж_{временная} = \frac{HCO_3^-}{61} \frac{\text{мг-экв}}{\text{кг}}.$$

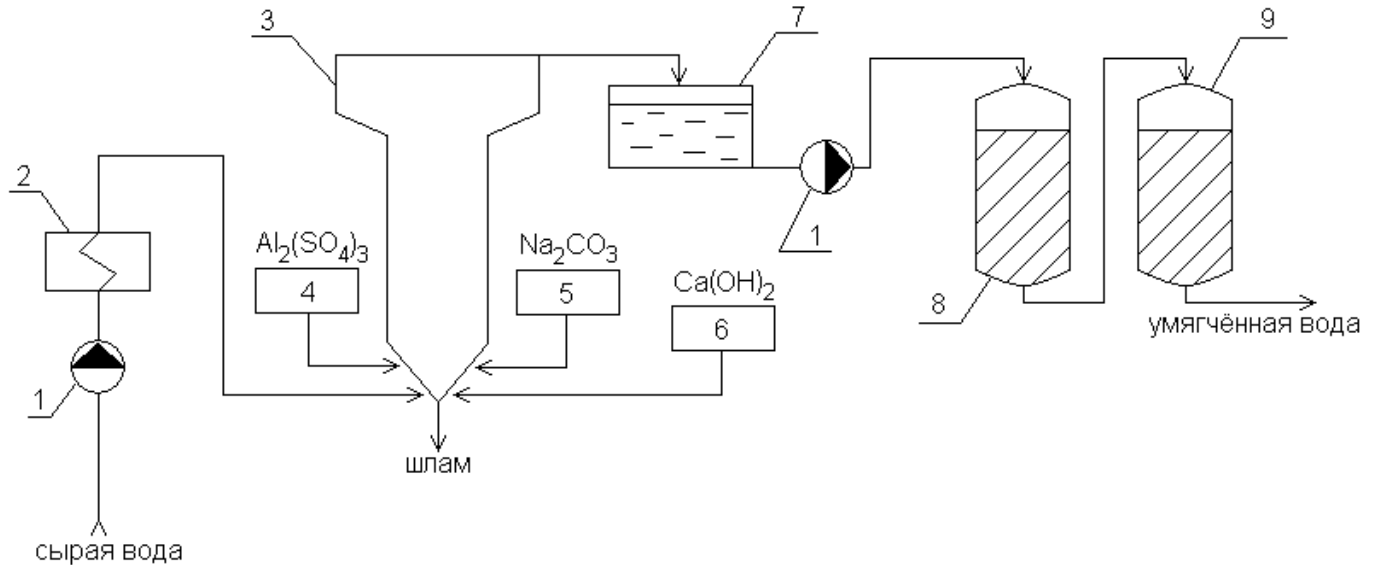
Может быть устранена подогревом воды до 80°C.

Щёлочность воды определяется присутствием NaOH, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>HCO<sub>3</sub> и равна  $Щ = OH^- + HCO_3^- + CO_3^{2-}$ .

Исходный состав воды некоторых рек:

$Ж, \frac{\text{мг-экв}}{\text{кг}}$	3,3	4,7	5,3
река	Волга	Дон	Кама

### Схема подготовки добавочной воды.

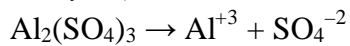


Позиции на схеме:

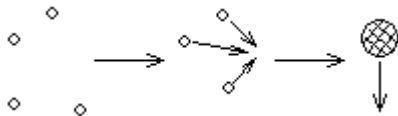
- 1 – насос; 2 – теплообменник; 3 – осветлитель; 4, 5, 6 – дозаторы коагулянта, соды и извести; 7 – бак; 8 – механический фильтр; 9 – катионовый фильтры;

Этапы:

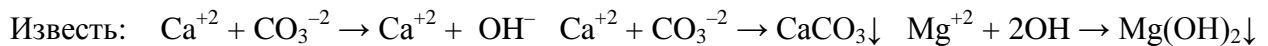
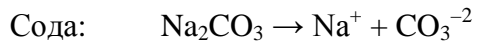
- 1) Коагуляция – взвешенные частицы слипаются в хлопья, выпадающие в осадок:



Происходит гидролиз алюминия, который протекает ступенчато:



- 2) Параллельно коагуляции в осветлителе 3 проводят известково-содовую обработку.



- 3) В фильтре 8 происходит задержание остатков осадков при прохождении воды через слой песка или антрацита.

- 4) Умягчение проводят в катионитовых фильтрах 9.



Диаметр частиц ионитового материала  $d \approx 1$  мм.

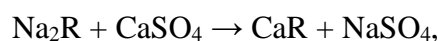
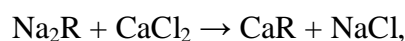
Диаметр фильтра  $D = 1,3$  м.

Высота фильтра  $H = 3,6$  м.

Скорость фильтрации  $w_{\text{фильтр}} = 3,7$  см/с.

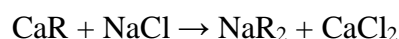
#### Виды катионитовых установок:

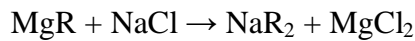
а) Na – катионирование:  $\text{Na}_2\text{R} + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaR} + 2\text{NaHCO}_3$ ,  
здесь R – катионический радикал.



$\text{Na}_2\text{R} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaR} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ , аналогичные реакции происходят с солями Mg. CaR и MgR остаются в фильтре.

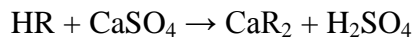
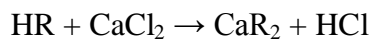
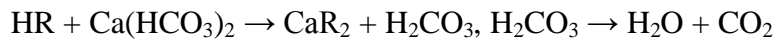
Со временем фильтр истощается и его ставят на регенерацию 5% раствором NaCl:





$\text{MgCl}_2$  и  $\text{CaCl}_2$  отводятся.

б) H – катионирование



$\text{HR} + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaR}_2 + \text{H}_2\text{SiO}_3, \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ , аналогичные реакции происходят с солями Mg.

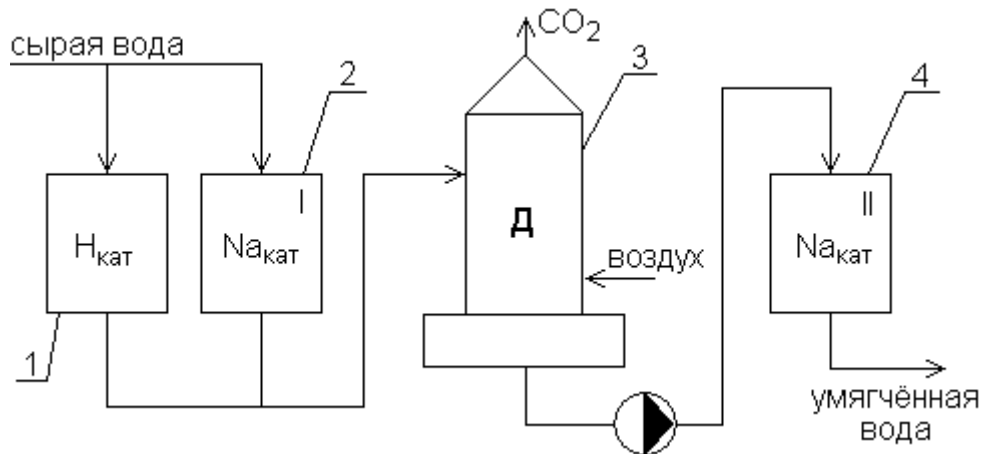
Недостатки: растворение в воде  $\text{CO}_2$  и присутствие кислот.

Регенерацию осуществляют 1% раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$ :



### Схемы катионных установок.

1) Параллельное (H–Na) катионирование:



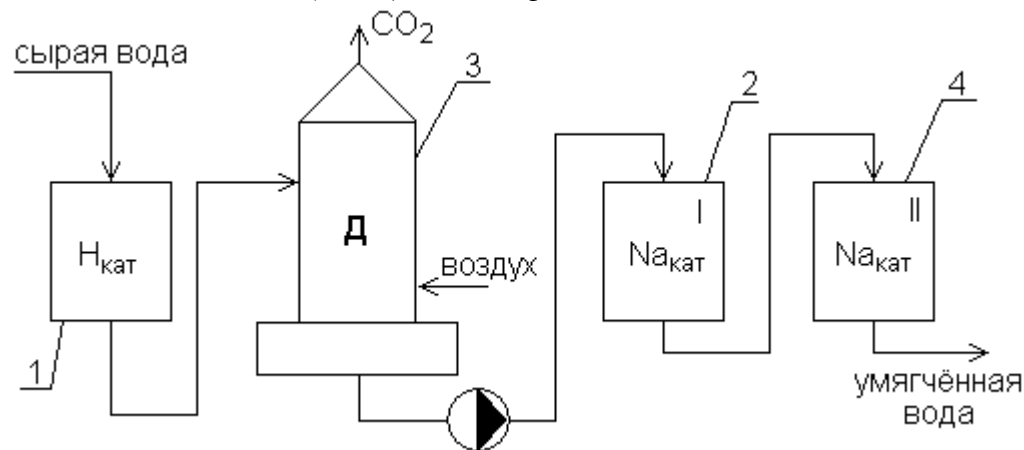
*Позиции:*

1, 2 – катионитовые фильтры, 3 – декарбонизатор (удаляет  $\text{CO}_2$ ), 4 – барьерный фильтр (для исключения проскока кислот  $\text{Na}_2\text{R} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{R} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Минимальное солесодержание перед барьерным фильтром  $C_{\text{CO}_2}^{\text{min}} \approx 3 \text{ мг/л}$ .

Остаточная жёсткость умягчённой воды  $J_{\text{ост}} \approx 0,01 \frac{\text{МГ} - \text{ЭКВ}}{\text{КГ}}$ .

2) Последовательное (H–Na) катионирование:



Минимальное солесодержание перед барьерным фильтром  $C_{\text{CO}_2}^{\text{min}} \approx 3 \text{ мг/л}$ .

### Деаэрация воды.

В воде возможно присутствие  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ , что:

- 1) ухудшает теплоотдачу.
- 2) ведёт к внутренней газовой коррозии.

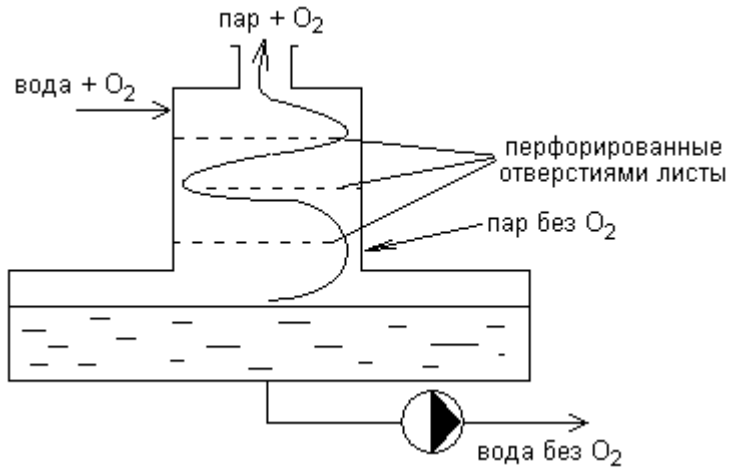
Виды деаэрации:

1) Термическая деаэрация.

Закон Генри:  $C_{\Gamma} = K_a \cdot P_{\Gamma}$ , здесь  $C_{\Gamma}$  – концентрация газов в растворе,  $K_a$  – константа адсорбции.

$t \uparrow \rightarrow C_{\Gamma} \downarrow$  и при  $t = t_{\text{кип}} \rightarrow C_{\Gamma} = 0$ .

Схема деаэратора атмосферного типа:



вода падает вниз в виде дождя.

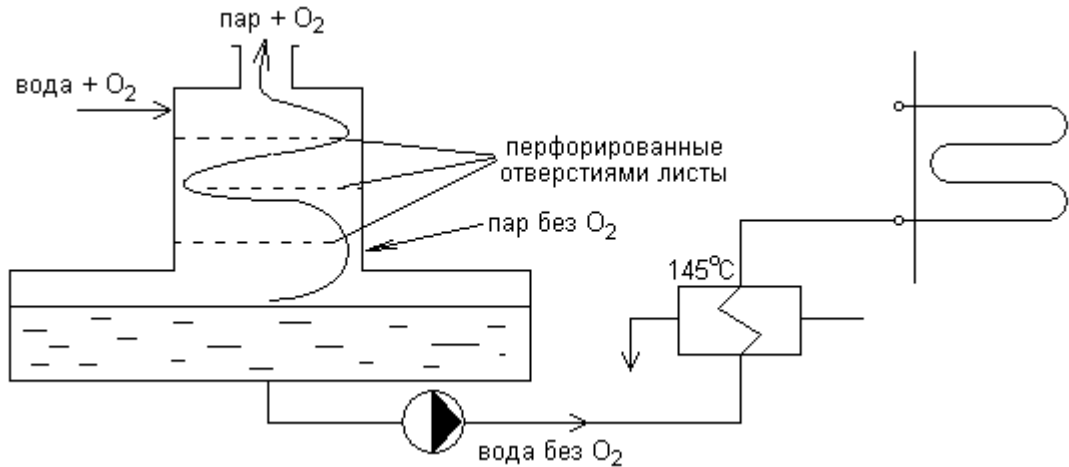
$P = 1,2 \text{ ат}$ ,  $t_k = 104^{\circ}\text{C}$

2) Химическая деаэрация.

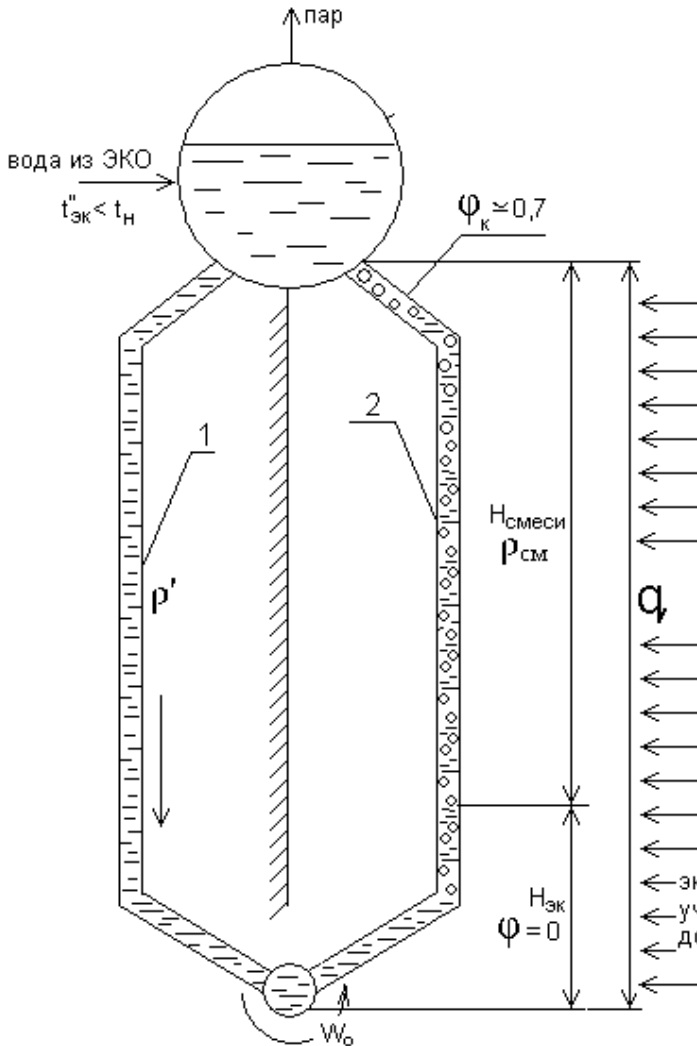
Гидразин  $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Аммиак  $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NH}_4 \cdot \text{CO}_3 + \text{H}_2$

После термического деаэратора вода поступает в экономайзер:



## Гидродинамика контура естественной циркуляции.



Позиции:

1 – необогреваемые опускные трубы ( $\rho'$ ).

2 – подъёмные трубы ( $\rho_{см}$ ).

Движущий напор  $S_{дв} = H_{см} \cdot g \cdot (\rho' - \rho_{см})$

Если  $\rho_{см} = \rho' \cdot (1 - \phi_{ср}) + \rho'' \cdot \phi_{ср}$ , то:

$S_{дв} = (H - H_{ЭК}) \cdot g \cdot \phi_{ср} \cdot (\rho' - \rho'')$

$S_{дв}$  растёт при:

- 1)  $H \uparrow$
- 2)  $(t_H - t_{ЭК}'') \downarrow$
- 3)  $q \uparrow$
- 4)  $P \downarrow \rightarrow \uparrow(\rho' - \rho'')$

Движущий напор расходуется на преодоление сопротивления опускных и подъёмных труб.

$S_{пол} = S_{дв} - \Delta P_{под}$  тогда основное уравнение циркуляции  $S_{дв} = \Delta P_{под}$

← экономайзерный  
← участок на  
← догрев воды до  $t_H$

*Контур естественной циркуляции:*

- 1) простой.
- 2) сложный.

Рассмотрим подробнее.

### Простой контур естественной циркуляции.

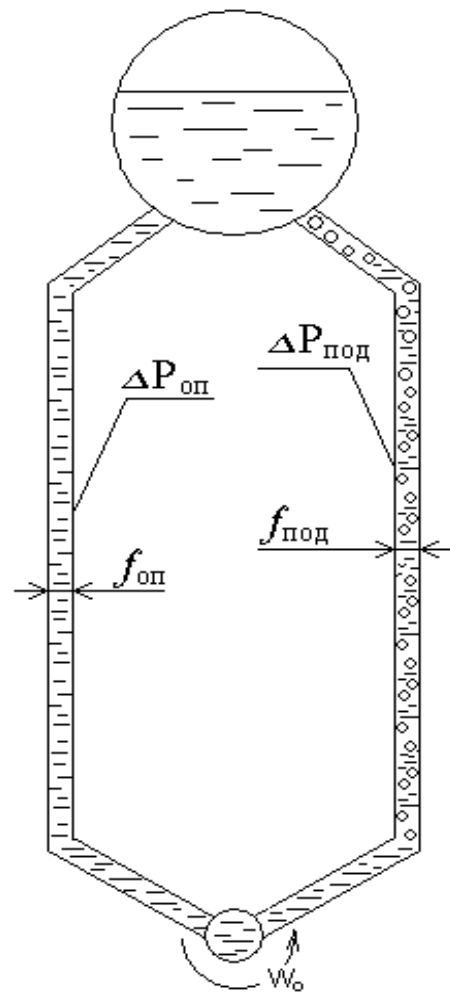
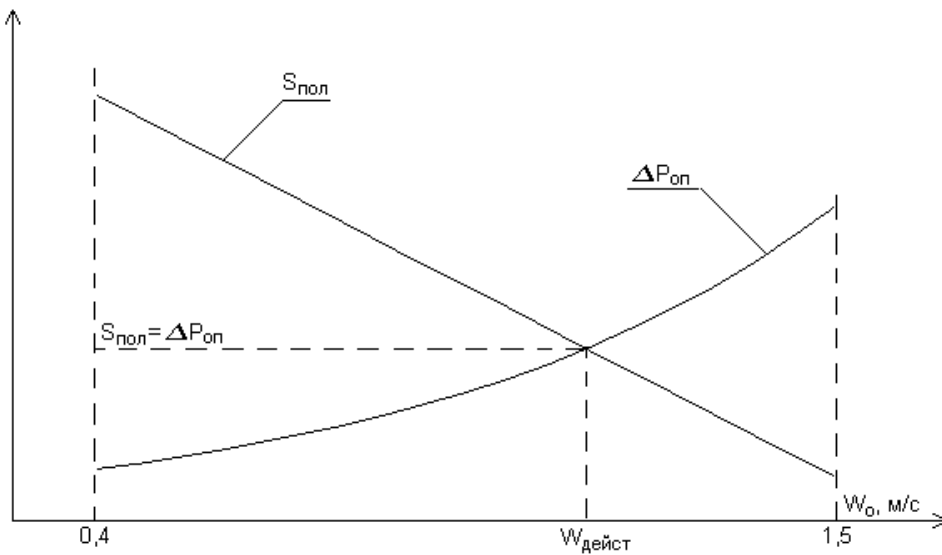
Схема приведена ниже.

$W_0 = \frac{G_{см}}{f_{под} \cdot \rho'}$  – скорость циркуляции.

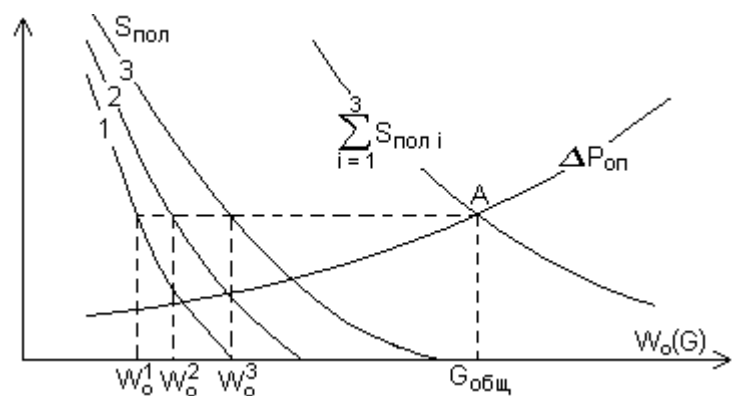
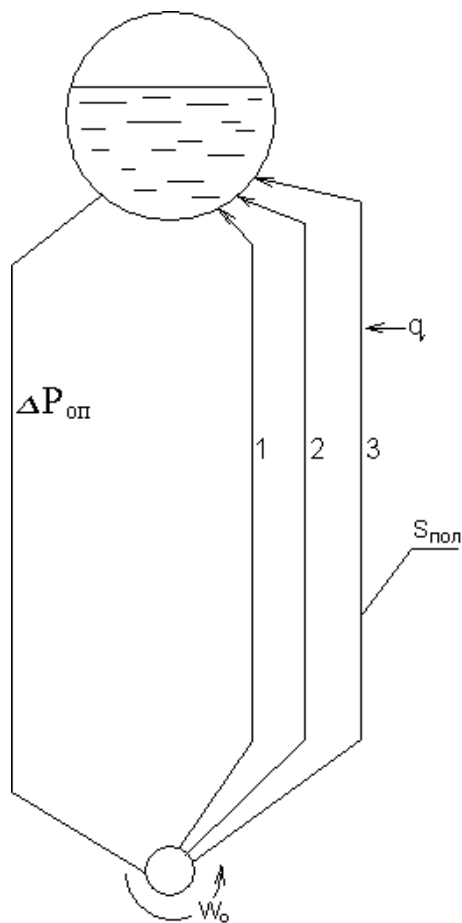
$$S_{пол} = S_{дв} - \Delta P_{под} = S_{дв} - \sum_1^n \xi_{под} \cdot \frac{W_0^2}{2} \cdot \rho' \cdot [1 + x_{ср} \cdot (\frac{g''}{g'} - 1)];$$

$$\Delta P_{под} = \sum_1^n \xi_{оп} \cdot \frac{W_{оп}^2}{2} \cdot \rho' = \sum_1^n \xi_{оп} \cdot \left( \frac{W \cdot f_{под}}{f_{оп}} \right)^2 \cdot \frac{\rho'}{2};$$

По  $W_0^{действ}$  определяется  $G_{воды} \Rightarrow k = \frac{G_v}{G_n} \rightarrow \frac{1}{X''} \rightarrow X''$ .



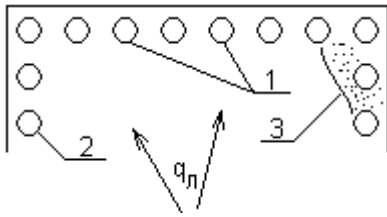
**Сложный контур естественной циркуляции.**



В трубах с  $W_{\min}$  засчёт ухудшения теплоотдачи произойдёт перегрев и перегог трубы.

## *Надёжность режимов циркуляции.*

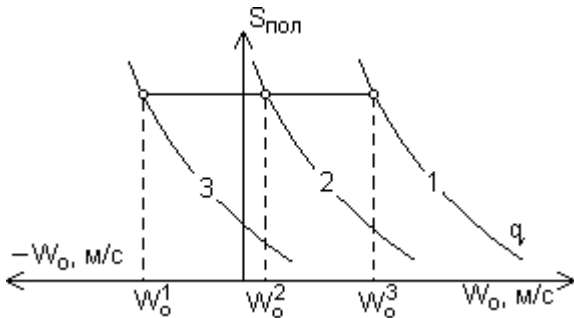
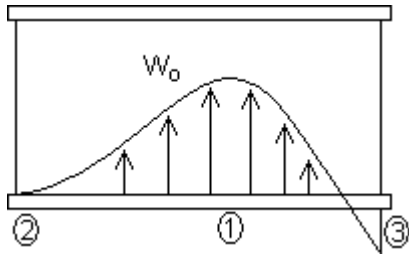
Зависит от неравномерности обогрева труб данного топочного экрана.



- 1 – хорошо обогреваемые трубы.
- 2 – затенённые трубы.
- 3 – плохо обогреваемые (загрязнены).

Отдельные трубы ввиду затенённости или загрязнения воспринимают тепла меньше, чем основные:

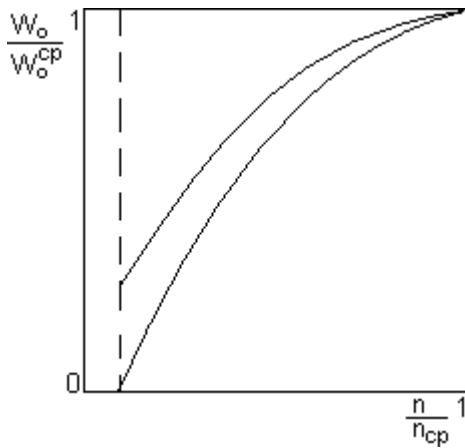
$$c \downarrow q \rightarrow \uparrow \rho_{cm} \rightarrow \downarrow S_{дв} \rightarrow W_o \rightarrow \downarrow k \approx 2 \rightarrow \uparrow X'' \text{ до } 50\% \rightarrow \uparrow t_{cr}.$$



$$q_1 > q_2 > q_3$$

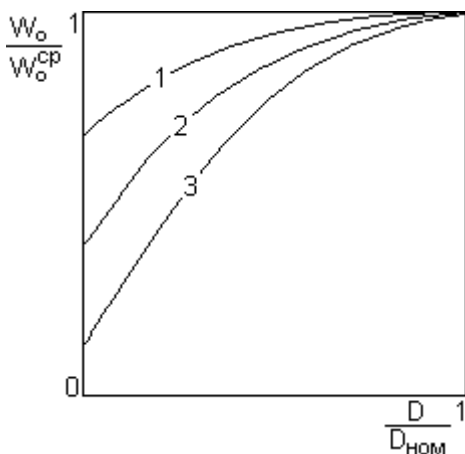
W зависит от:

1) расположения труб в экране.



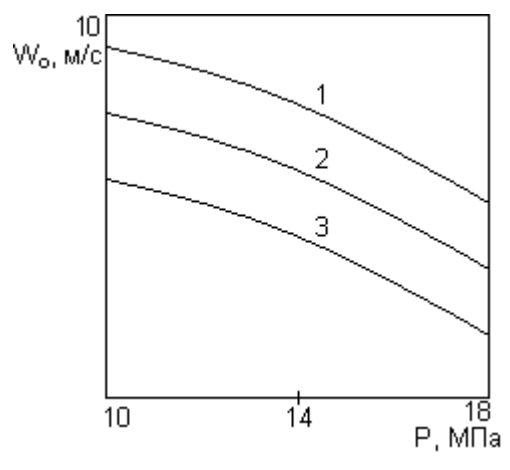
- 1 – чистые трубы.
- 2 – загрязнённые трубы.

2) паропроизводительности.



- 1 – средние.
- 2 – промежуточные.
- 3 – угловые.

3) давления.

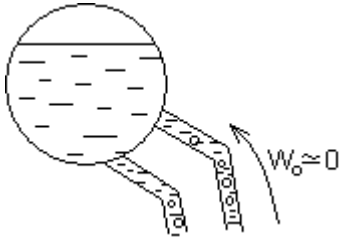


## Лекция №17

### Полная гидравлическая характеристика К.Е.Ц. и оценка надёжности режимов.

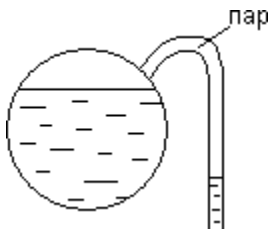
Аварийные режимы:

1) Застой циркуляции при вводе подъёмных труб в водяной объём.



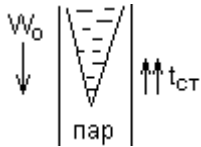
$$\alpha_2^n \ll \alpha_2^{n+B} \rightarrow \uparrow\uparrow t_{ст} \rightarrow \text{пережог.}$$

2) Свободный уровень при вводе подъёмных труб в паровом объёме (расслоение пароводяной смеси).



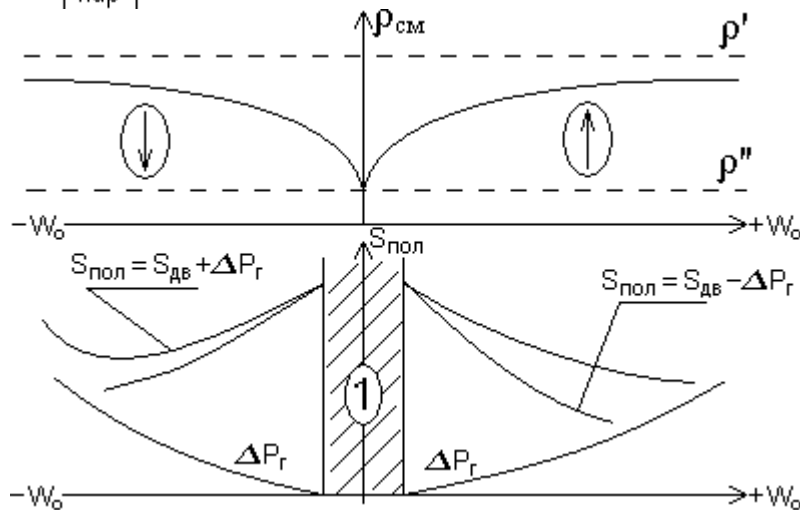
Пережог труб происходит по тем же причинам.

3) Опрокидывание циркуляции  $W_0 < 0$ .



$$S_{дв} = H \cdot g \cdot (\rho' - \rho_{см}).$$

$$W_0 = 0, \quad S_{дв}^{max} = H \cdot g \cdot (\rho' - \rho'')$$

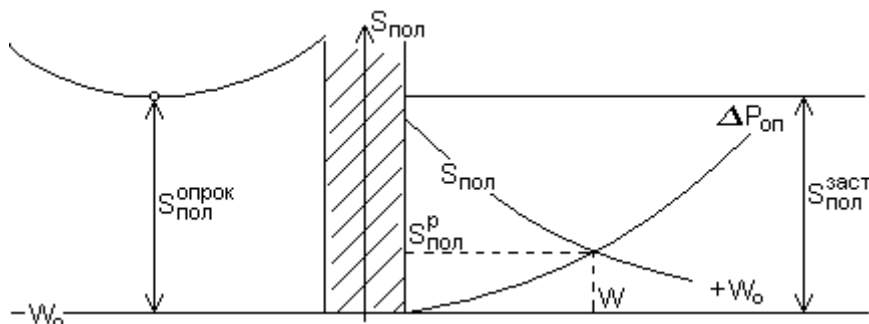


1 – область подпитки контура водой при её упаривании.

Полезный напор  $S_{пол} = S_{дв} \pm \Delta P_{под}$   
 $\Delta P_{под} = \Delta P_г = \Delta P_{тр} + \Delta P_{мест}$

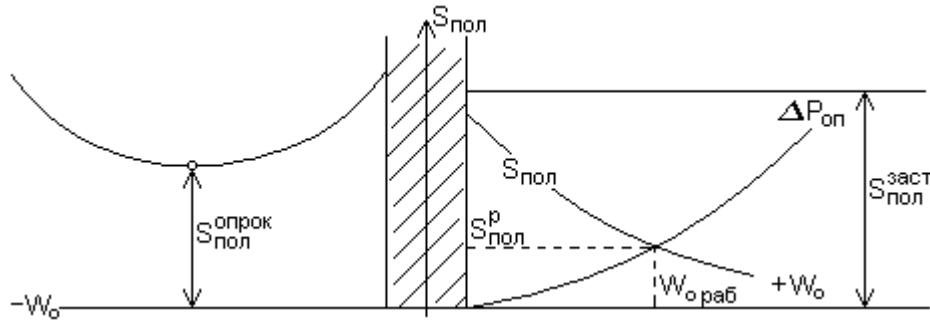
Вероятность возникновения аварийных режимов зависит от давления:

а) Низкое давление –  $W_0$



т.к.  $S_{пол}^{опрок} > S_{пол}^{заст}$ , то при низком давлении наиболее вероятен режим застоя циркуляции.

б) Высокое давление



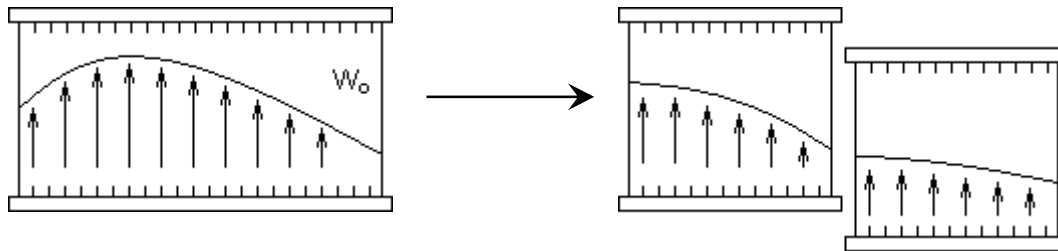
с  $\uparrow P \rightarrow \uparrow t \rightarrow \downarrow \sigma_{пузырь} \rightarrow \downarrow d_{пуз} \rightarrow \downarrow W_{отн} = W_v - W_{п}$

Более вероятно опрокидывание циркуляции. Для надёжности циркуляции необходимо:

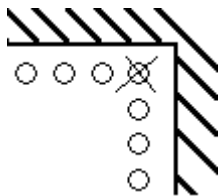
$$\frac{S_{пол}^{заст}}{S_{пов}^{раб}} \geq 1,1, \quad \frac{S_{пол}^{опр}}{S_{пол}^р} \geq 1,1, \quad W_{о}^{раб} = 3 \div 4 W_{о}^{мин} > 0,5 \text{ м/с.}$$

**Меры борьбы с авариями.**

1) Раздельные экраны:



2) Трубы из углов топки удаляют:



3) для того чтобы снизить  $\Delta P_{оп}$  ограничивают  $d_{оп} = 100 - 160 \text{ мм. } \frac{\sum f_{под}}{\sum f_{оп}} = 3 \div 4.$

4) Своевременная расшлаковка (чистка).

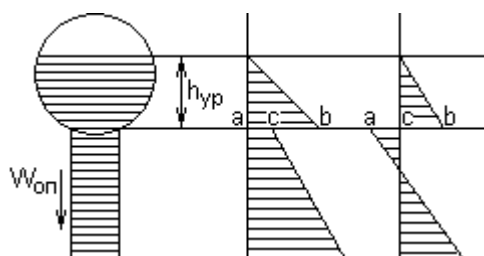
**Причины парообразования в опускных трубах.**

1) Захват пара из парового или водяного пространства.

2) Кавитация

$$\Delta P_{ст} = h_{ур} \cdot g \cdot \rho' = ab, \quad \Delta P_{дин} + \Delta P_{вх} = (1 + \xi_{вх}) \cdot \frac{W_{оп}^2}{2} \cdot \rho' = bc, \quad \text{при } \Delta P_{ст} < \Delta P_{дин} + \Delta P_{вх} - \text{кавитация.}$$

Поэтому условие отсутствия кавитации  $h_{ур} \geq (1 + \xi_{вх}) \cdot \frac{W_{оп}^2}{2}$ ;



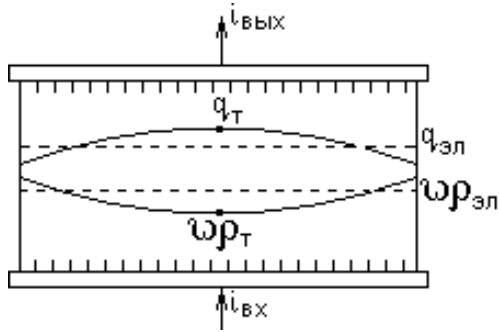
Дополнительные ограничения:

1)  $h_{ур} = 0,5 \text{ м.}$

2)  $W_{оп} < 2,5 \text{ м/с.}$

3) медленное изменение нагрузки при переменных режимах:  $\frac{\Delta D}{\Delta \tau} < \frac{2\% D_n}{\text{мин}}$  при  $\frac{\Delta P_0}{\Delta \tau} < \frac{0,05 \text{ МПа}}{\text{мин}}$ .

**Тепловая и гидравлическая неравномерность в поверхностях нагрузки.**



Гидравлическая неравномерность обусловлена:

- 1) различной длиной и формой труб.
- 2) Характером подвода/отвода рабочей среды.
- 3) Гидравлической нестабильностью потока.

Неравномерность тепловосприятости обусловлена:

- 1) Неодинаковым обогревом труб.
- 2) Неодинаковым загрязнением труб.

Коэффициенты характеризующие неравномерности:

гидравлической неравномерности  $\rho_r = \frac{\omega p_T}{\omega p_{ЭЛ}}$ .

неравномерности тепловосприятости  $\eta_T = \frac{q_T}{q_{ЭЛ}}$ .

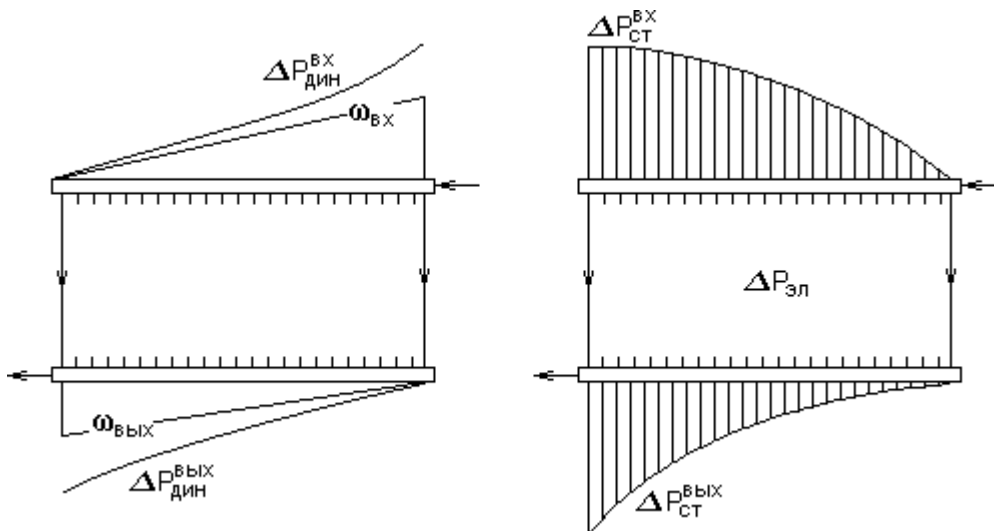
конструктивной нетождественности  $\eta_k = \frac{H_T}{H_{ЭЛ}} \cong 1$ .

тепловой развёртки  $\rho_q = \frac{\Delta i_T}{\Delta i_{ЭЛ}} = \frac{\Delta i_T}{i_{ВВХ} - i_{ВХ}} = \frac{q_T H_T}{q_{ЭЛ} H_{ЭЛ}} = \frac{\eta_T}{\rho_r}$  – т.е. тепловая разверка по ширине

секции зависит от тепловой и гидравлической неравномерности, при этом в отдельных трубах при  $\omega p_{\min}$  ( $\rho_r < 1$ ) и  $q_{\max}$  ( $\eta_T > 1$ ) имеет место  $\rho_r \gg 1 \rightarrow \uparrow \uparrow t_{p. \text{ср.}} \rightarrow \uparrow \uparrow t_{ст.} = t_{p. \text{ср.}} + \Delta t$ , а этого не должно быть, поэтому  $\rho_q^{\text{допустимая}} = 1,9(\text{ЭКО}) - 1,3(\text{Топ. экраны}) - 1,15(\text{Пе})$ .

**Влияние способов подвода и отвода рабочей среды на гидравлическую характеристику секции.**

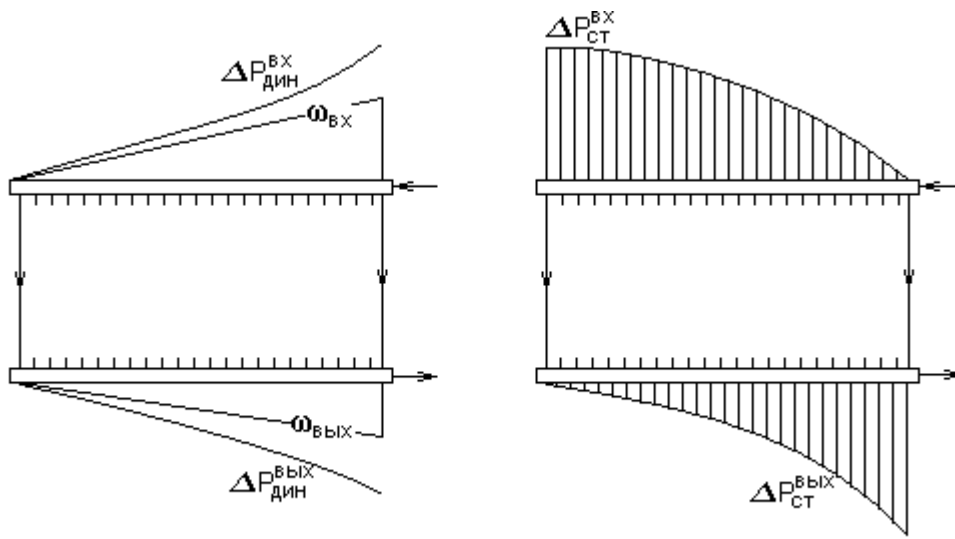
1) Z – образная схема:



так как полный напор  $\Delta P_{\text{полн}} = \Delta P_{ст.} + \Delta P_{дин} = \text{const} \Rightarrow \downarrow \Delta P_{дин} \rightarrow \uparrow \Delta P_{ст}$

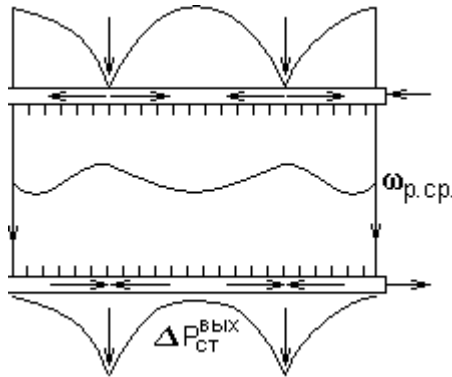
$\Delta P_{\text{лев}} = \Delta P_{ст}^{ВВХ} + \Delta P_{ЭЛ} + \Delta P_{ст}^{ВВХ}$ ,  $\Delta P_{\text{прав}} = 0 + \Delta P_{ЭЛ} + 0$ , т.к.  $w_{p. \text{ср.}} \sim D \sim \Delta P_{ст}^{0,5}$ .

2) П – образная схема:



$\Delta P_{\text{лев}} = \Delta P_{\text{ст}}^{\text{вх}} + \Delta P_{\text{эл}} + 0$ ,  $\Delta P_{\text{прав}} = 0 + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{ст}}^{\text{вых}}$ , т.к.  $\Delta P_{\text{лев}} = \Delta P_{\text{прав}}$  то распределение среды по ширине более равномерное.

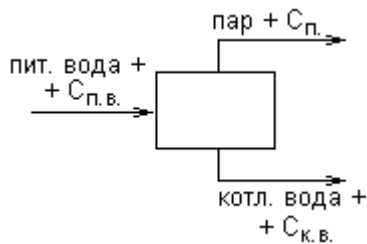
Для устранения гидравлической неравномерности повышают количество отводов и подводов рабочей среды к коллекторам:



При двух подводах  $w_{\text{кол}}$  уменьшается в 4 раза  $\rightarrow \Delta P_{\text{ст}}$  уменьшается в 16 раз.

**Водный режим работы паровых котлов. Мероприятия по предотвращению отложений в водопаровом тракте.**

С питательной водой в котёл поступают растворённые соли, которые накапливаются в котловой воде и частично переходят в пар.

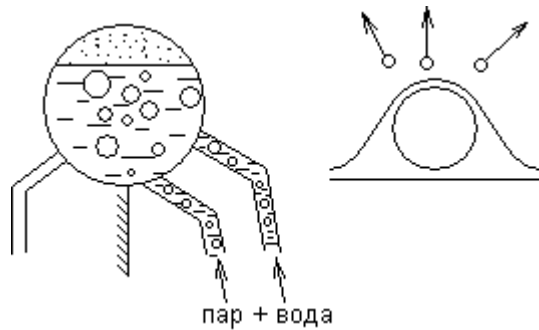


Причины перехода солей из котловой воды в пар:

- 1) унос паром капельной влаги  $\omega = \frac{m_{\text{кап}}}{m_{\text{кап}} + m_{\text{пара}}} \cdot 100\%$ .
- 2) растворимость солей в паре (коэффициент растворимости  $k_p$ );  $C_n = 0,01 \cdot (\omega + k_p) \cdot C_{\text{к.в.}} \frac{\text{МГ}}{\text{КГ}}$ .

**Капельный унос.**

Обусловлен разрушением пузырей на поверхности слоя в барабане:



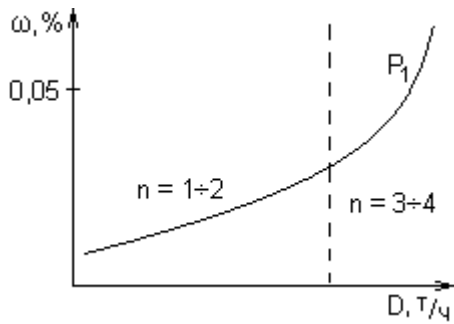
$$E_{\sigma} + E_{\text{пов. нат.}} = E_{\text{кап.}}$$

Крупные капли возвращаются в слой, а мелкие уносятся паром в пароперегреватель и испаряются внутри змеевиков. Это приводит к отложению растворённых в них веществ с последующим пережогом труб.

## Лекция №18

### Факторы влияющие на капельный унос:

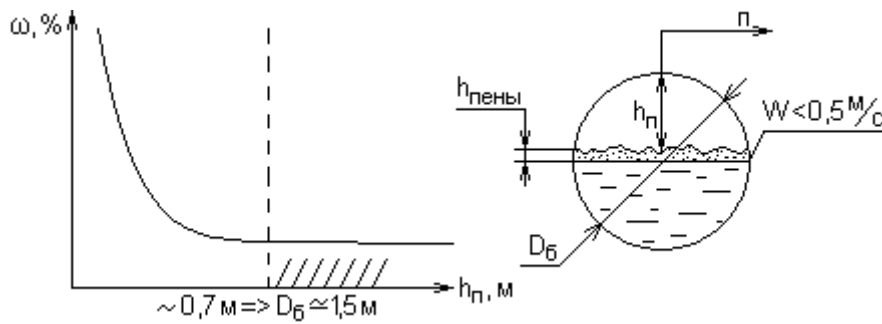
1) Паропроизводительность котла



$$\omega = A \cdot D^n \quad n = f(D).$$

2) Давление в барабане.  $\uparrow P \rightarrow \uparrow E_{\text{пара}}^{\text{энергия}}$ .

3) Высота парового пространства

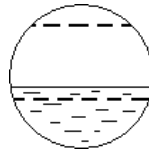


4) Соленосодержание котловой воды ( $\uparrow C_{\text{к.в.}} \rightarrow \uparrow \sigma_{\text{пуз}} \rightarrow \uparrow \delta_{\text{плёнки}} \rightarrow \uparrow h_{\text{пены}} \rightarrow \downarrow h_{\text{п}} \rightarrow \omega \downarrow$ ).

#### Меры борьбы с капельным уносом.

1) Гашение энергии струй пароводяной смеси. Достигается:

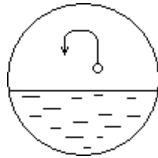
- а) за счёт равномерного распределения подъёмных труб по длине барабана.
- б) установкой дырчатых щитов:  $d_{\text{отв}} = 5? 10 \text{ мм}$ .



2) Отделение капельной влаги. Достигается за счёт:

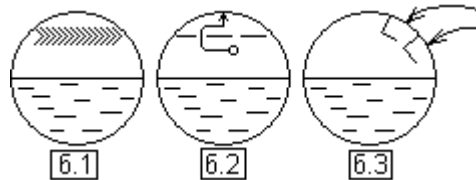
а) гравитационной сепарации

$$\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{п}}} < 600$$

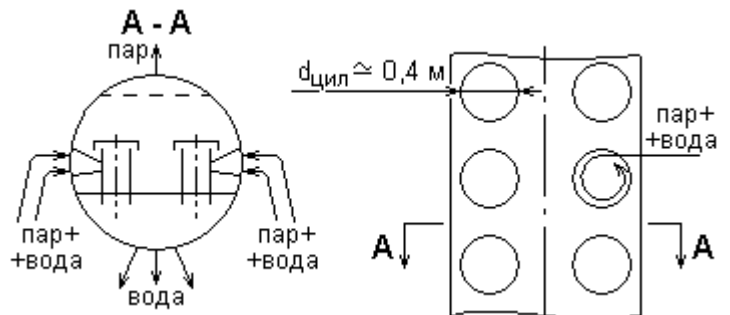


б) инерционной сепарации

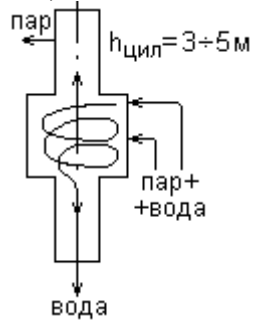
- б.1) пароприёмные щиты.
- б.2) жалюзийные сепараторы.
- б.3) отбойные щитки.



б.4) внутрибарабанные циклоны.



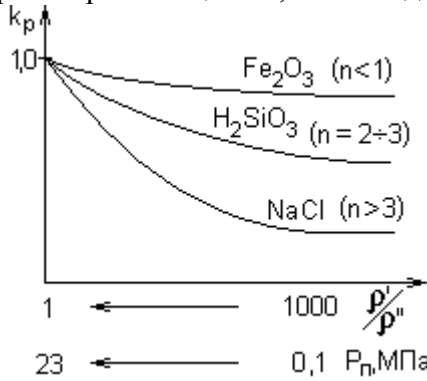
6.5) Выносной циклон.



Устанавливают в последнюю ступень испарении с max солесодержанием котловой воды.

**Избирательный унос солей с паром.**

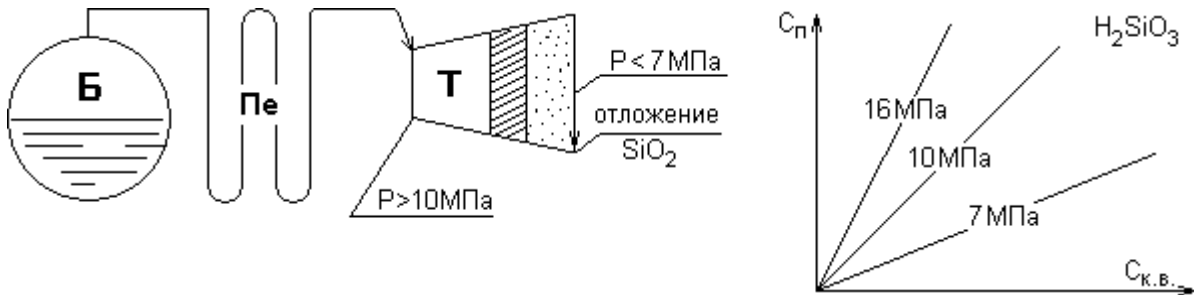
Пар и вода имеют одну химическую природу. Поэтому при высоком давлении пар также хорошо растворяет вещества, как и вода. Коэффициент распределения веществ между паром и водой:



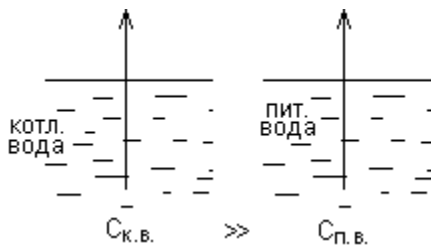
$$k_{распр} = \frac{C_n}{C_{к.в.}} = \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^{-n} = f(P_n), \text{ где } n \text{ зависит от природы химического соединения:}$$

Растворимость в пару это вредное явление. Разберём на примере  $H_2SiO_3$ .

При высоком давлении  $H_2SiO_3$  ( $H_2SiO_3 \rightarrow H_2O + SiO_2$ ) растворяется в паре, а в проточной части турбины, где давление падает до  $P < 7$  МПа,  $SiO_2$  выпадает в осадок ввиду ухудшения растворимости. При этом ухудшаются показатели турбины, что требует её останова:

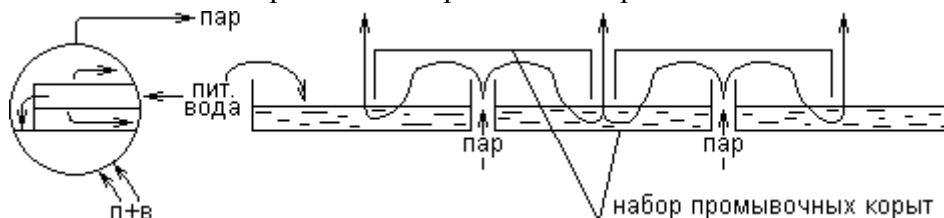


Основной метод борьбы – это контакт пара с питательной водой:



$$C_n = k_p \cdot C_{к.в.} \gg C_n = k_p \cdot C_{п.в.}$$

Это достигается барботажной промывкой пара.



### Водный режим работы барабанных котлов (организация безнакипного режима).

С питательной водой в котёл поступают растворённые соли, которые при кипении накапливаются в ней. Если  $C_{к.в.} > C_{к.в.}^{нак} \rightarrow$  соли Ca и Mg будут образовывать накипь на поверхности экранных труб ( $\uparrow t_{стенки} \rightarrow$  разрыв), поэтому необходимо, чтобы всегда имело место неравенство  $C_{к.в.} < C_{к.в.}^{нак}$ , что достигается:

- 1) непрерывной продувкой (постоянный отвод части котловой воды с солями из системы).
- 2) периодической продувкой через 10–12 ч. из нижних коллекторов экранов отводится щлам.

Процент продувки  $P = \frac{D_{пр}}{D} \cdot 100\% = 1 \div 10\%$ , величину P определяют из солевого баланса:

$$\left. \begin{aligned} D_{п.в.} \cdot C_{п.в.} &= C_{п.} \cdot D_n + C_{пр.} \cdot D_{пр.} \\ D_{п.в.} &= D_n + D_{пр.} \end{aligned} \right\} P = \frac{C_{п.в.} - C_{п.}}{C_{пр.} - C_{п.в.}} \cdot 100\%$$

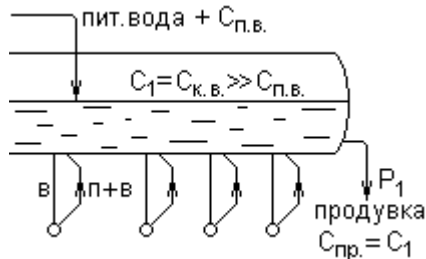
#### Недостаток продувки:

потери теплоты с продувочной водой ( $\downarrow \Delta \eta_k \approx 0,5\%$ )

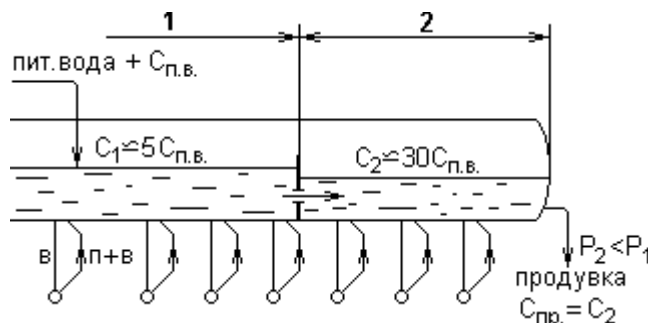
#### Пути снижения P:

- 1)  $\downarrow C_{п.в.}$  (на химводоочистке).
- 2) Вывод продувочной воды с максимальным солесодержанием.

#### Схема одноступенчатого испарения

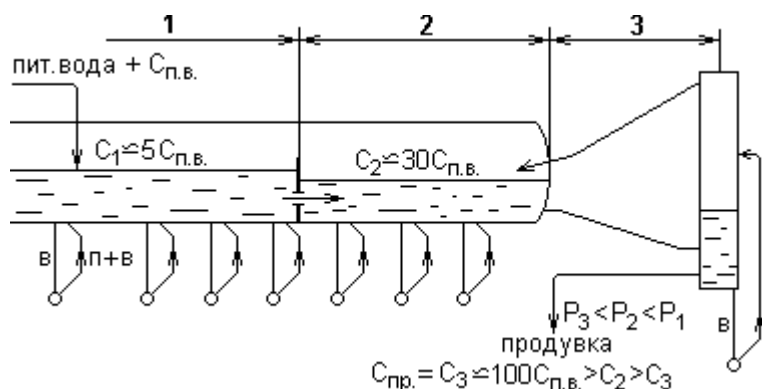


#### Схема двухступенчатого испарения:



- 1 – первая ступень испарения (чистый отсек).
- 2 – вторая ступень испарения (солевой отсек).

#### Схема трёхступенчатого испарения:



- 3 – третья ступень испарения (выносной циклон).

#### Достоинства многоступенчатого испарения:

- Повышается экономичность котла.

- Повышается чистота пара.

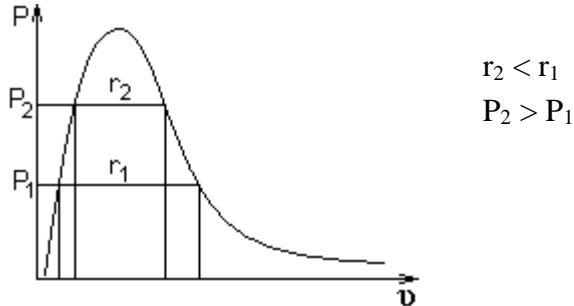
### Коррекционный метод обработки котловой воды.

Заключается в подаче в барабан тринатрийфосфата. Обработка проводится в щелочной среде в результате чего образуется легкоподвижный неприкипающий шлам, который выводится из экранов периодической продувкой.

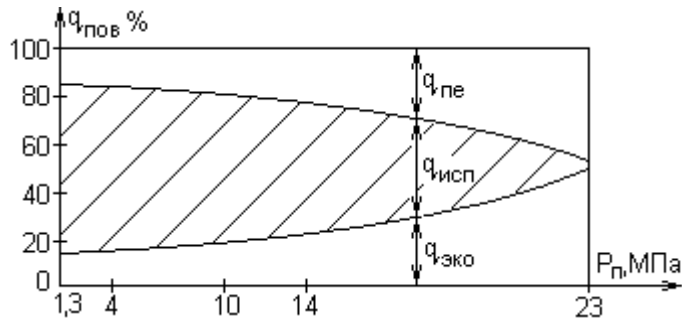


$\text{MgSO}_4$  – аналогично.

### Парообразующие поверхности барабанных котлов.



$$\text{Удельное тепловосприятие поверхности } q_{\text{пов}} = \frac{Q_{\text{пов}}}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{\Delta i_{\text{пов}}}{i_{\text{п.е.}} - i_{\text{п.в.}}}$$



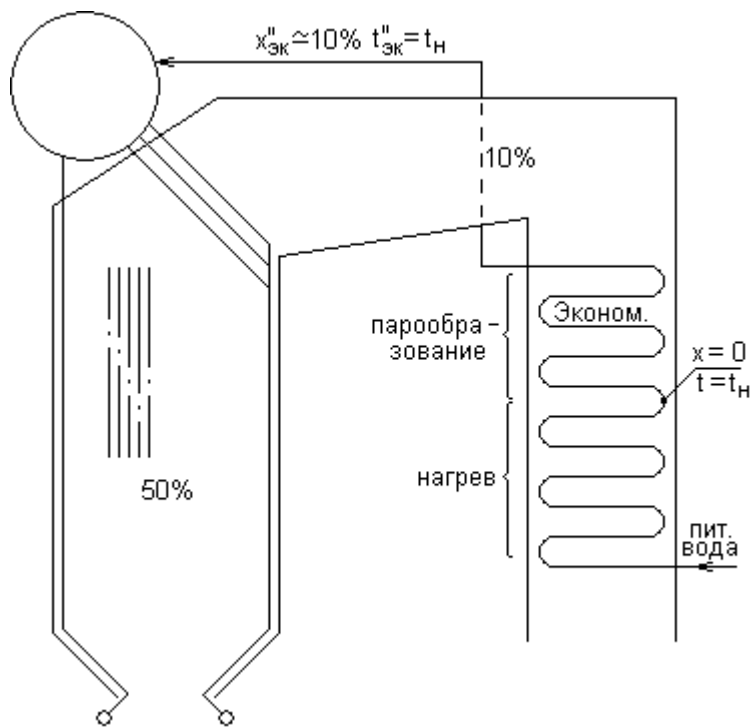
$\uparrow P \rightarrow \downarrow r \rightarrow \downarrow \Delta i_{\text{исп}} \rightarrow \uparrow \Delta i_{\text{пов}} \rightarrow \downarrow q_{\text{исп}}$ , т.е. с увеличением  $P$  роль испарительных поверхностей в котле снижается, а перегревательных и экономайзерных возрастает.

а) Котёл низкого давления ( $P = 1,3$  МПа).  $q_{\text{исп}} \approx 65\% > q_{\text{луч}}^{\text{топ}} \approx 50\%$ . Для парообразования в этих условиях одних экранов недостаточно, необходимо использование дополнительных конвективных испарительных поверхностей (котельный пучок):

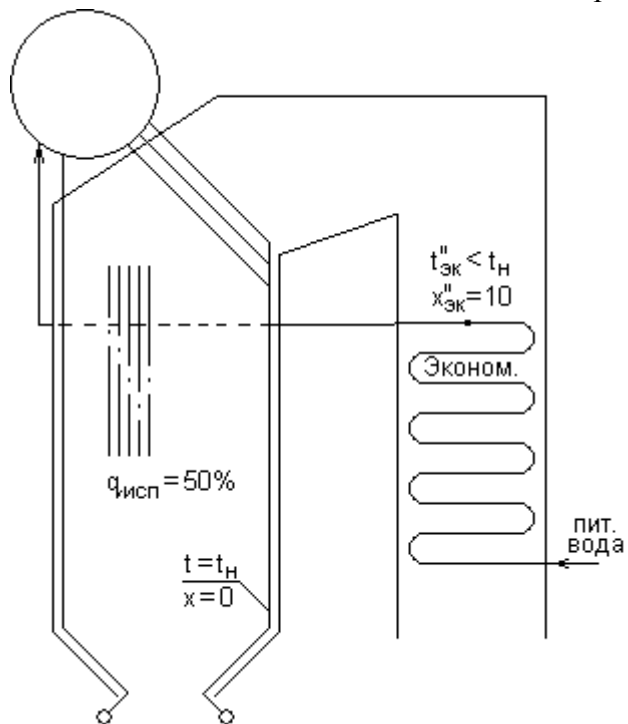


ДкВр – 10 – 13

б) Котёл среднего давления ( $P = 4$  МПа). Так как  $q_{\text{исп}} \approx 60\% > q_{\text{луч}}^{\text{топ}} \approx 50\%$ , то часть теплоты необходимой для парообразования передают в выходную ступень экономайзера, при этом экономайзер становится *кипящим*:



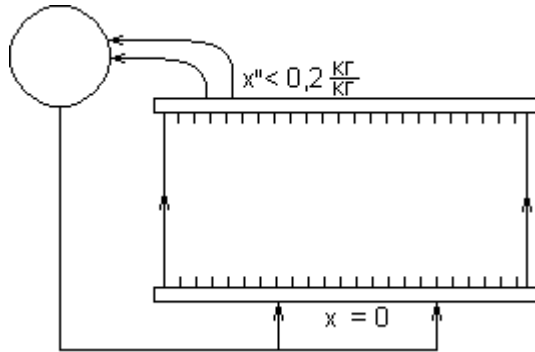
в) Котёл высокого давления ( $P = 10\text{--}14$  МПа).  $q_{\text{исп}} \approx 40\text{--}50\% \approx q_{\text{луч}}^{\text{топ}}$ . Для выработки пара достаточно использовать только топочные экраны и экономайзер не кипящего типа:



## Лекция №19

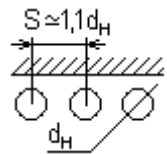
### Топочные экраны.

Это секции из параллельно включённых труб, покрывающих стены топки.



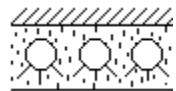
Типы экранов:

#### 1) Гладкотрубный:



$d \approx \delta = 60 \dots 3$  мм. В России обычно используют сталь Ст 20.  
Применяют в котлах малой и средней мощности.

#### 2) Шиповой:



К трубам привариваются (перпендикулярно осям) прутки (шпы  $d_{ш} = 10$  мм,  $h_{ш} = 25$  мм). Применяют в топках с жидким шлакоудалением для ускорения воспламенения топлива и улучшения вывода шлака в чистом виде.

#### 3) Газоплотный (из плавиковых труб):



Такие экраны непроницаемы для газов ( $\Delta\alpha = 0$ ).

#### Преимущества:

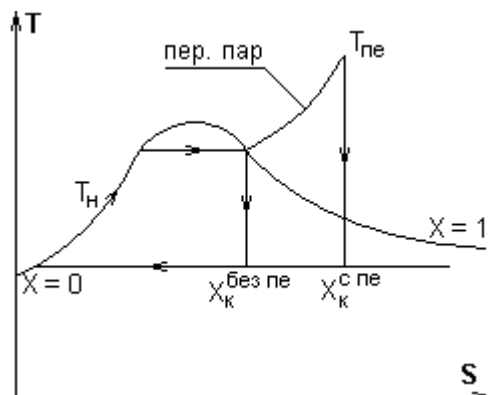
повышается тепловосприятие экранов и отсутствуют присосы в топку.

### Пароперегреватель.

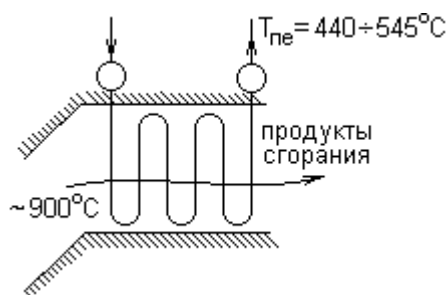
Служат для нагрева пара от температуры насыщения до требуемой температуры ( $t_n = 200 \dots 340^\circ\text{C}$ ,  $t_{пе} = 440 \dots 545^\circ\text{C}$ ).

Перегрев необходим по следующим причинам:

- 1) Повышается КПД теплоэнергетической установки в целом и, как следствие, снижается расход топлива.
- 2) Повышается надёжность работы турбины в связи с повышением степени влажности пара на выходе:



### Конвективный пароперегреватель.

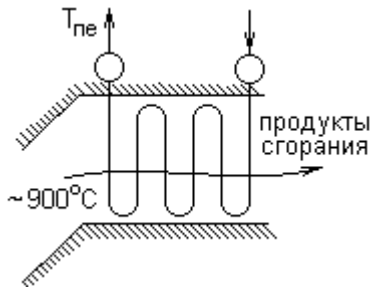


#### Прямоточная схема:

$d_{тр} = 32 - 38 - 42$  мм.

$\delta_{ст} = 3 - 5$  мм.

$$\Delta t_{\text{прям}} = \min \Rightarrow N_{\text{прям}} = \max.$$



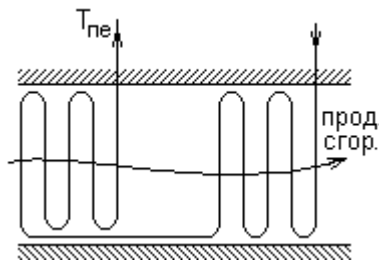
Противоточная схема:

$$\Delta t_{\text{прот}} = \max \Rightarrow N_{\text{прот}} = \min.$$

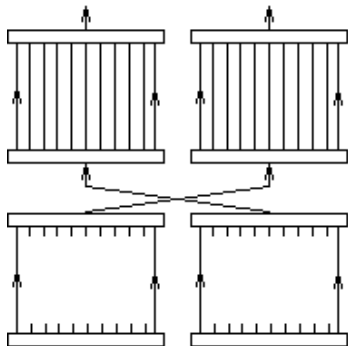
Недостаток: пережог выходных петель ( $t_{\text{ст}} = t_{\text{п}} + \frac{q}{\alpha_2} \Rightarrow$  1-ые

петли получают  $t_{\text{ст}} \uparrow \uparrow = t_{\text{п}} \uparrow + \frac{q}{\alpha_2} \uparrow \rightarrow$  разрыв).

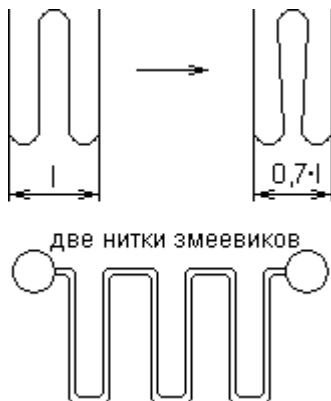
Недостатки предыдущих схем устраняет смешанная схема движения:



Для снижения тепловой разверки пароперегреватель делят на секции и осуществляют переброс пара:



Для повышения компактности змеевики уплотняют и сдваивают:



Для защиты от пережога необходима высокая скорость пара:  $\uparrow W_{\text{п}} \approx 25 \text{ м/с}$  т.к.  $\alpha_2 \uparrow (\downarrow t_{\text{ст}}^{\text{не}}) \sim W_{\text{п}}^{0,6}$ .

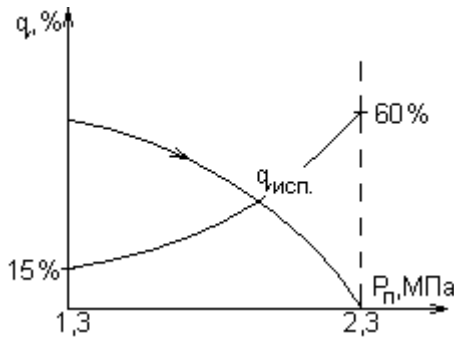
Если  $t_{\text{не}} < 400^\circ\text{C}$  используют Ст20.

При  $t_{\text{не}} = 410?510^\circ\text{C} \rightarrow 12\text{X1MФ}$ .

Недостатки конвективного пароперегревателя:

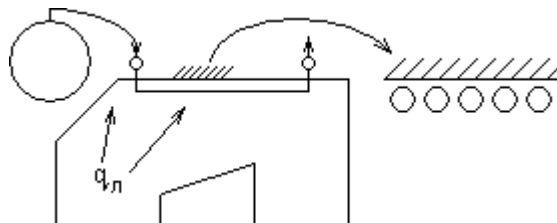
- $\uparrow \Delta P_{\text{п}} \approx 10\% P_{\text{б}}$ .
- Высокое сопротивление прохода по газам.

### Радиационный пароперегреватель.

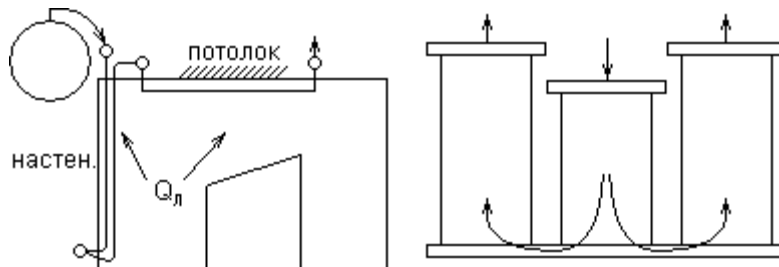


с  $\uparrow P_{\text{пара}} \rightarrow \uparrow q_{\text{исп}}$  и  $\downarrow q_{\text{пе}} \Rightarrow$  с ростом  $P$  роль пароперегревающих поверхностей в котле растёт и в топке вместо части экранов устанавливают радиационный перегреватель.

а)  $P_{\text{п}} < 10 \text{ МПа}$



б)  $P_{\text{п}} \geq 14 \text{ МПа}$



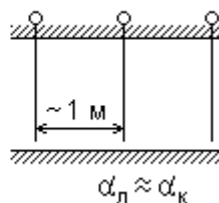
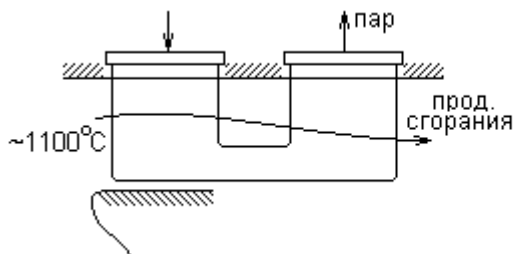
Для снижения  $t_{\text{ст}}$ :

- Радиационный перегреватель расхлаживают холодным насыщенным паром.
- Скорость пара  $\sim 35 \text{ м/с}$ .

Достоинства:

- $\Delta P_{\text{п}} < 0,3 \text{ МПа}$ .
- $\Delta P_{\text{г}} = 0$

### Ширмовый перегреватель.



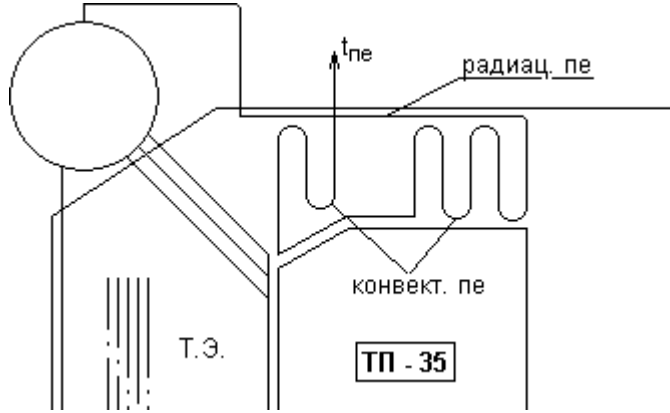
Достоинства:

- Высокое тепловосприятие  $\uparrow q \approx 60\% q_{\text{пе}}^{\text{общ}}$ .
- Снижается шлаковка перегревателя.

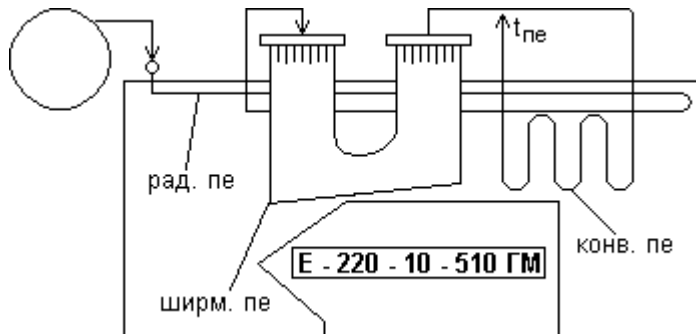
### Общая компоновка перегревателя.

Зависит от выходного давления пара.

а)  $P = 4 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{пе}} = 440^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{пе}} \approx 20\%$



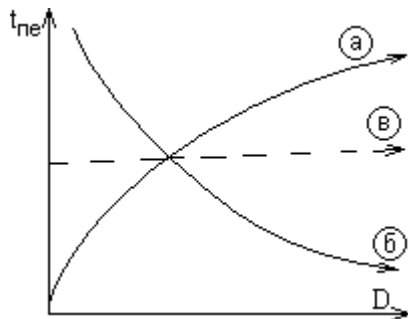
б)  $P = 10 \text{ МПа}$ ,  $t_{\text{пе}} = 510^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{пе}} \approx 30\%$



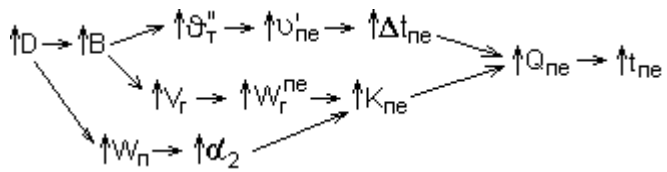
### Факторы, влияющие на $t_{\text{пе}}$

$t_{\text{пе}}$  зависит:

1) от  $D$ :



а) конвективный:



б) радиационный:  $\uparrow D \rightarrow \uparrow V \rightarrow \text{но } T_{\phi}^{\text{max}} \approx \text{const } (T_{\phi} = f(Q_{\text{н}}^{\text{р}})) \rightarrow$

$$Q_{\text{л}} \sim T_{\phi}^4 \approx \text{const} \rightarrow \downarrow \frac{Q_{\text{л}}}{D} \rightarrow \downarrow t_{\text{пе}}$$

в) комбинированный.

2) от  $t_{\text{п.в.}}$ : при  $\downarrow t_{\text{п.в.}}$  необходимо увеличивать  $V$  (для догрева воды до  $t_{\text{нас}}$ )  $\rightarrow V^{\Gamma} \rightarrow \uparrow W_r^{\text{пе}} \rightarrow \uparrow k_{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

3) от  $\alpha_{\text{т}}$  (коэффициент избытка воздуха):  $\uparrow \alpha_{\text{т}} \rightarrow \uparrow V^{\Gamma} \rightarrow \uparrow W_r^{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

4) от  $W^{\text{р}}$ :  $\uparrow W^{\text{р}} \rightarrow \uparrow V_{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow \uparrow V^{\Gamma} \rightarrow \uparrow W^{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

5) от  $\psi_{\text{экр}}$  (загрязнения):  $\downarrow \psi_{\text{экр}} \rightarrow \downarrow Q_{\text{л}} \rightarrow \uparrow g''_{\text{т}} \rightarrow \uparrow g'_{\text{пе}} \rightarrow \uparrow \Delta t_{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

6) от загрязнения перегревателя:  $\downarrow \psi_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow Q_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow t_{\text{пе}}$ .

По правилам технической эксплуатации  $t_{\text{пе}} = t_{\text{пе}}^{\text{НОМ}} \pm 5^\circ\text{C}$ .

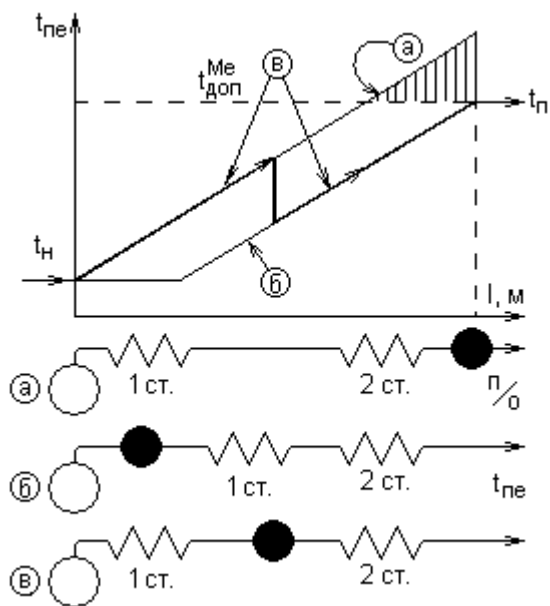
### Паровое регулирование $t_{\text{пе}}$ (пароохладителями).

пароохладители устанавливают:

а) за перегревателем (пережог выходных петель).

б) до перегревателя (высокая инерционность).

в) в рассечку (устраняет недостатки предыдущих схем включения).



**Поверхностный пароохладитель.**

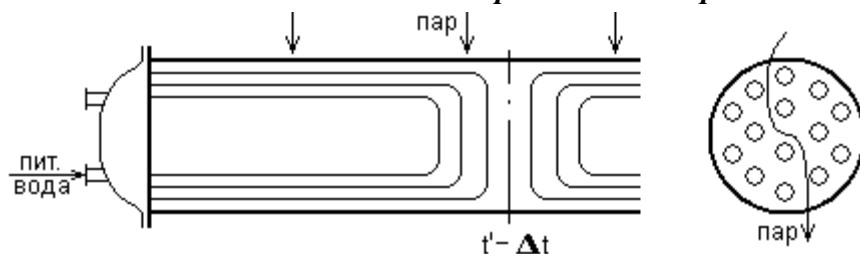
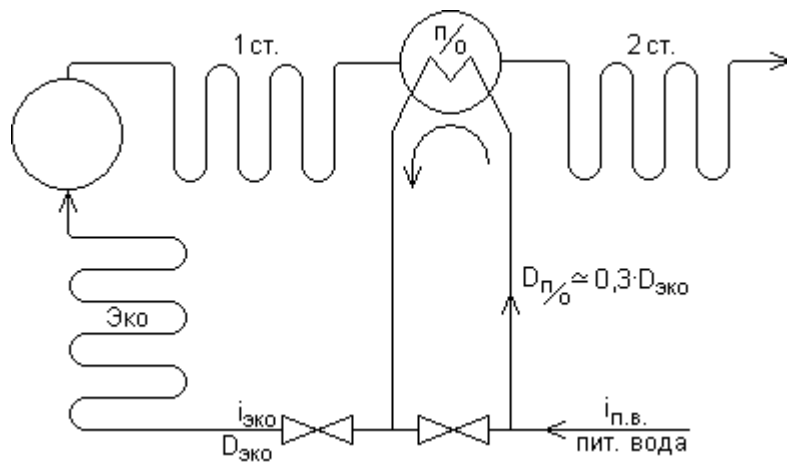


Схема включения в перегреватель:



$$i'_{эк} = i_{п.в.} + \Delta i_{п/о},$$

$$\Delta i_{п/о} = 10?20 \text{ ккал/кг.}$$

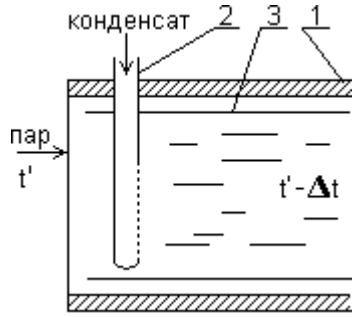
Их выполняют сдвоенными и за пределами газохода.

Недостаток: высокая инерционность.

Применяют в котлах малой и средней мощности.

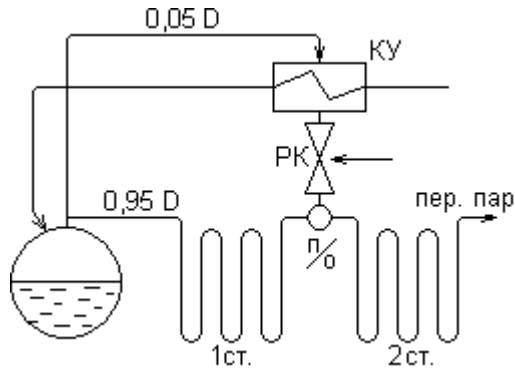
## Лекция №20

### Впрыскивающий пароохладитель.



- 1 – коллектор.  
 2 – распылитель.  
 3 – «рубашка» (тонкостенный цилиндр для защиты коллектора от образования трещин).  
 $d_k \approx 0,3 \text{ м}, l_k = 6?8 \text{ м}.$

Засчёт расхода части теплоты на нагрев и испарение капель, температура пара снижается.



КУ – конденсационная установка.

РК – регулировочный клапан.

Достоинство: малая инерционность.

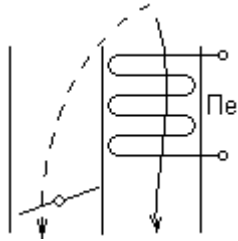
Применяют в котлах малой мощности.

### Газовое регулирование $t_{пе}$ .

Осуществляется засчёт изменения степени расхолаживания газов.

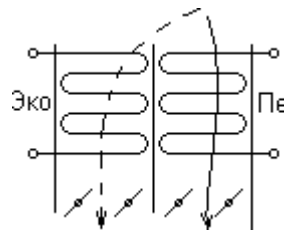
#### 1) Бойпасирование газов.

а) через холостой газоход.



$$\text{при } \downarrow V^r \rightarrow \downarrow W_r^{пе} \rightarrow \downarrow k_{пе} \rightarrow \downarrow Q_{пе} \rightarrow \downarrow t_{пе}.$$

б) через газоход с поверхностями.

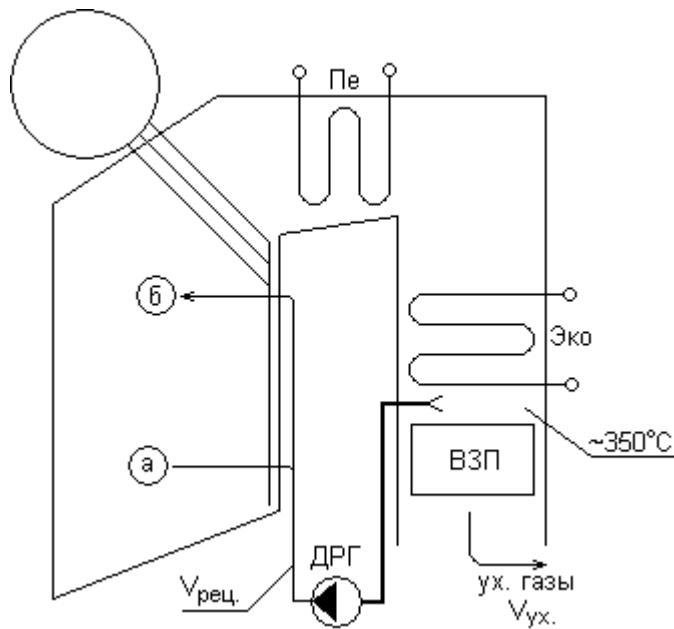


#### 2) Рециркуляция продуктов сгорания.

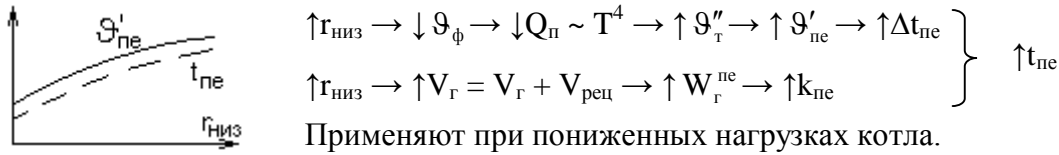
ДРГ – дымосос рециркуляции газов.

В точке ввода газов:  $\vartheta_r^{рец} = \frac{\vartheta_r^{без\ рец}}{1+r}$ , где

$$r = \frac{V_{рец}}{V_{ух}} = 5?25\% \text{ – доля рециркуляционных газов.}$$



а) рециркуляция в низ топки.

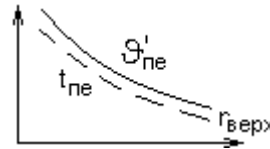


б) рециркуляция в верх топки.

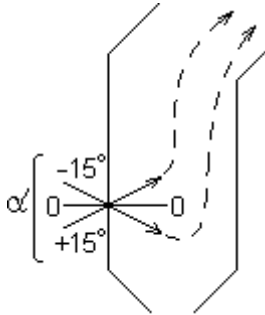
$\uparrow r_{\text{верх}} \rightarrow \downarrow q''_{\text{т}} \rightarrow \downarrow q''_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow \Delta t_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow Q_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow t_{\text{пе}}$

Применяют:

- при повышенной нагрузке котла  $(0,9?1)D_{\text{ном}}$ .
- для снижения шлакования поверхностей на выходе из топки.



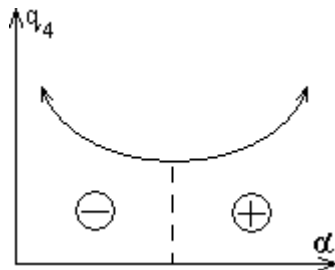
3) Поворотными горелками.



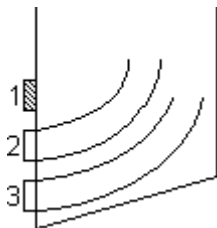
$+15^\circ \rightarrow \downarrow \tau_{\text{пребывания газов}} \rightarrow \downarrow Q_{\text{л}} \rightarrow \uparrow q''_{\text{т}} \rightarrow \uparrow q''_{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

$-15^\circ \rightarrow \uparrow \tau_{\text{пребывания газов}} \rightarrow \uparrow Q_{\text{л}} \rightarrow \downarrow q''_{\text{т}} \rightarrow \downarrow q''_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow t_{\text{пе}}$ .

Недостаток: изменение  $q_4$ .



4) Переключение ярусов горелок.



$\downarrow q''_{\text{т}} \rightarrow \downarrow q''_{\text{пе}} \rightarrow \downarrow t_{\text{пе}}$ .

$\uparrow q''_{\text{т}} \rightarrow \uparrow q''_{\text{пе}} \rightarrow \uparrow t_{\text{пе}}$ .

Недостаток: повышение числа горелок.

**Пуск барабанного котла в работу.**

При пуске в результате неравномерного прогрева металла в поверхностях дополнительно возникают термические напряжения:  $\sigma_t = \varepsilon_t \cdot E_t \cdot \Delta t$

$\varepsilon_t$  – коэффициент линейного расширения.

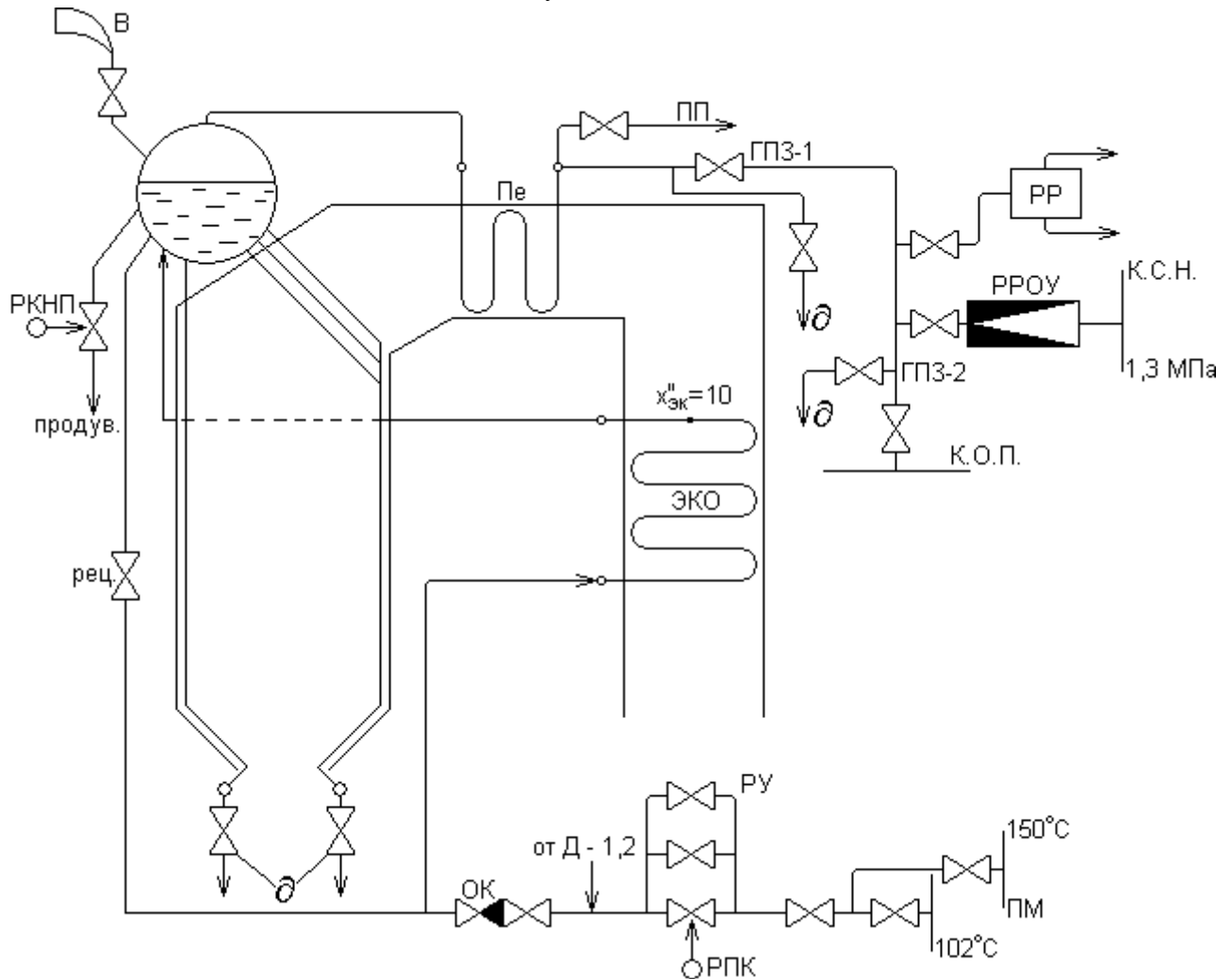
$E_t$  – модуль упругости стали.

$$\Delta t = C \cdot \frac{\delta_{\text{ст}}^2}{2a} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \tau}$$

$\sigma_t$  растёт с ростом  $\delta_{\text{ст}}^2$  и  $\Delta t$ . Поэтому растопку ведут медленно и осторожно, чтобы скорость и

термическое напряжение не превышало допустимых.  $\vartheta_t < \left( \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_{\text{доп}}$ ,  $\sigma_t < \sigma_t^{\text{доп}}$ .

### Пусковая схема.



РКНП – регулировочный клапан непрерывной продувки.

В – воздушник.

рец. – линия рециркуляции.

∂ – дренажи.

ПП – продувка пароперегревателя.

ГПЗ – главная паровая задвижка.

СП – соединительный паропровод.

РР – растопочный расширитель.

РРОУ – растопочная редукционно-охлаждающая установка.

К.С.Н. – коллектор собственных нужд.

К.О.П. – коллектор острого пара.

РПК – регулировочный питательный клапан.

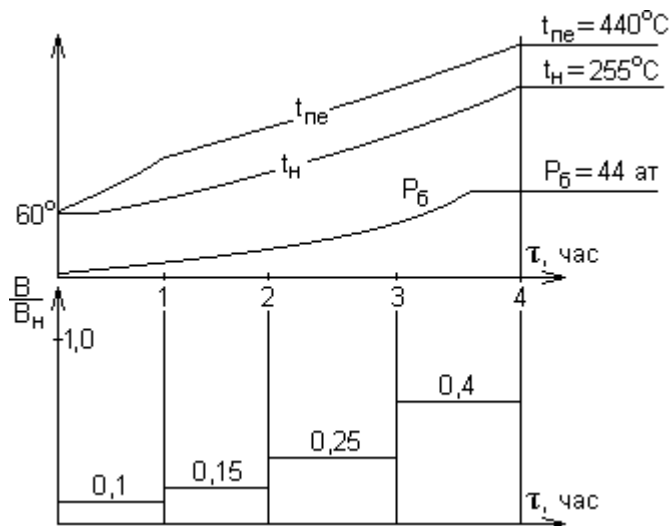
РУ – растопочный узел.

ПМ – питательная магистраль.

### Последовательность пуска.

1. Внешний осмотр (поверхности нагрева, обмуровка, горелки, предохранительные клапаны, водоуказательные устройства, регулирующие органы, вентилятор и дымосос).
2. Закрывают дренажи. Открывают воздушник и продувку пароперегревателя.
3. Через нижние точки котел заполняют деаэрированной водой с температурой, соответствующей условию:  $t_{в} - t_{ст}^{бар} < 40^{\circ}\text{C}$  ( $\downarrow\sigma_{т}$ ).

4. Время заполнения 1–1,5 ч. Заполнение заканчивается, когда вода закрывает опускные трубы. При заполнении следят, чтобы  $\Delta t = t_{ст}^{верх} - t_{ст}^{ниж} < 40^{\circ}\text{C}$ .
5. Включают дымосос и вентилятор и вентилируют топку и газоходы 10-15 мин.
6. Устанавливают разрежение на выходе из топки  $S_t'' = 1 \text{ кг/м}^2$ , устанавливают расход  $V_{раст} = 0,1 \cdot V_{ном}$ .



7. Выделившаяся при сжигании топлива теплота расходуется на нагрев поверхностей нагрева, обмуровки, воды, на парообразование. С увеличением продолжительности растопки  $\uparrow Q_{паробр.}$  и  $\downarrow Q_{нагр.}$
8. При появлении пара из воздушников, их закрывают. Расхолаживание пароперегревателя производят растопочным паром, выпуская его через ПП. Сопротивление продувочной линии  $\sim D_n^2 \rightarrow \uparrow P_b$ .
9. При  $P = 0,3 \text{ МПа}$  продувают нижние точки экранов и воздухоуказательные. При  $P = 0,5 \text{ МПа}$ , закрывают ПП, открывают ГПЗ-1 и прогревают СП, выпуская пар через растопочный расширитель.
10. Периодически подпитывают барабан водой и контролируют уровень воды.
11. Увеличивают расход топлива.  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 1 \div 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C/мин}$ .
12. При  $P = 1,1 \text{ МПа}$  включают непрерывную продувку и используют линию рециркуляции (для защиты ЭКО от пережога).
13. При  $P = 1,4 \text{ МПа}$  закрывают растопочный расширитель и открывают растопочные редуционно-охладительные установки. Увеличивают расход топлива.
14. При  $P = P_{ном} - 0,1 \text{ МПа}$  и  $t_{п} = t_{ном} - 5^{\circ}\text{C}$  проверяют качество пара, увеличивают нагрузку до 40%, открывают ГПЗ-2 и включают котел в коллектор острого пара.
15. Включают подачу основного топлива и увеличивают нагрузку до номинальной.
16. Переходят на питание котла через регулирующий питательный клапан и полностью загружают пароохладитель.
17. Включают автоматику.

#### **Плановый останов котла.**

1. Плавно снижают нагрузку до 40%, о чём заблаговременно предупреждают потребителя.
2. Котёл подпитывают водой до предельного её уровня в барабане.
3. Прекращают подачу топлива.
4. Вентилируют топку и газоходы 15 мин.
5. Закрывают ГПЗ-2 и открывают РРОУ.
6. Производят продувку котла через дренажи.

7. Через 8–15 часов продувку повторяют.

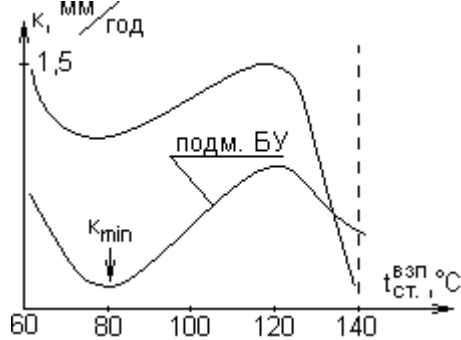
8. Периодически подпитывают котёл водой при скорости расхолаживания  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин.}$

9. При  $t = 50^\circ\text{C}$  и  $P \approx 1 \text{ ат.}$  котёл опорожняют через дренажи.

**Компоновка низкотемпературных поверхностей нагрева (ЭКО и ВЗП).**

Задачи компоновки:

- 1) Нагрев среды до требуемых  $t''_{\text{эк}}$  и  $t_{\text{гв}}$
- 2) Эффективность теплообмена  $k = \text{max.}$
- 3) Надёжность металла.

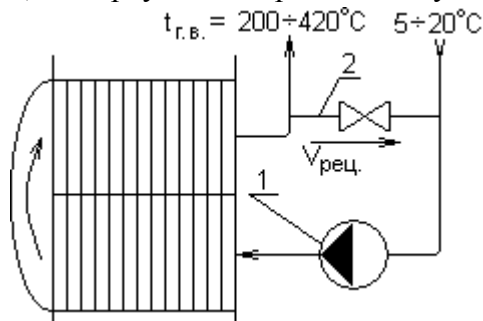


$k$  – коэффициент коррозии.

Так как  $t_{\text{ст.}}^{\text{взп}} = t'_{\text{вп}} + \frac{q}{\alpha_2}$ , то  $t'_{\text{вп}}$  нужно принять такой, чтобы  $k$  была минимальна.

Меры борьбы с коррозией:

1) Рециркуляция горячего воздуха:



- 1 – вентилятор.
- 2 – линия рециркуляции.

Доля рециркуляции  $\beta_{\text{рец}} = \frac{V_{\text{рец}}}{V_{\text{в}}} \approx \frac{t'_{\text{вп}} - t_{\text{хв}}}{t_{\text{г.в.}} - t'_{\text{вп}}} = 0,05 \div 0,2.$

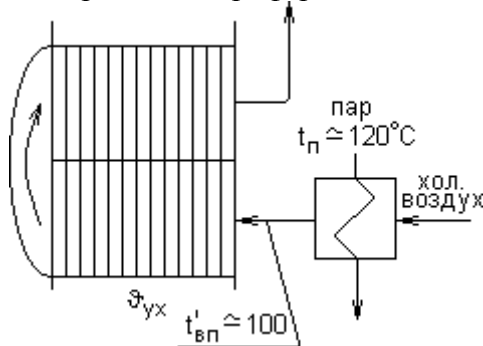
$t'_{\text{вп}}$ составляет	30	45	60	$^\circ\text{C},$
$W^{\text{II}}$ составляет	2	4	6	%.

При сжигании мазута  $t'_{\text{вп}}$  составляет 30 60 100  $^\circ\text{C},$   
 $S^{\text{P}}$  составляет 0,5 1 3 %.

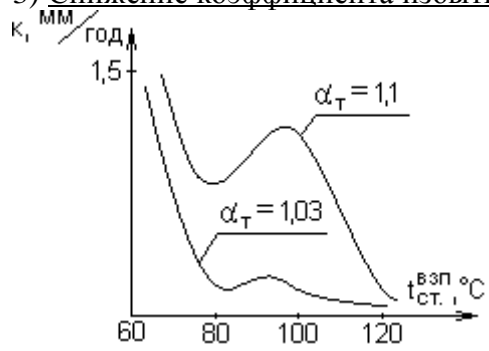
Недостатки рециркуляции:

- при  $\uparrow t'_{\text{вп}} \rightarrow \uparrow \vartheta_{\text{yx}} \rightarrow \downarrow q_2.$
- энергозатраты на вентилятор.

2) Паровой калорифер:



3) Снижение коэффициента избытка воздуха до минимума:

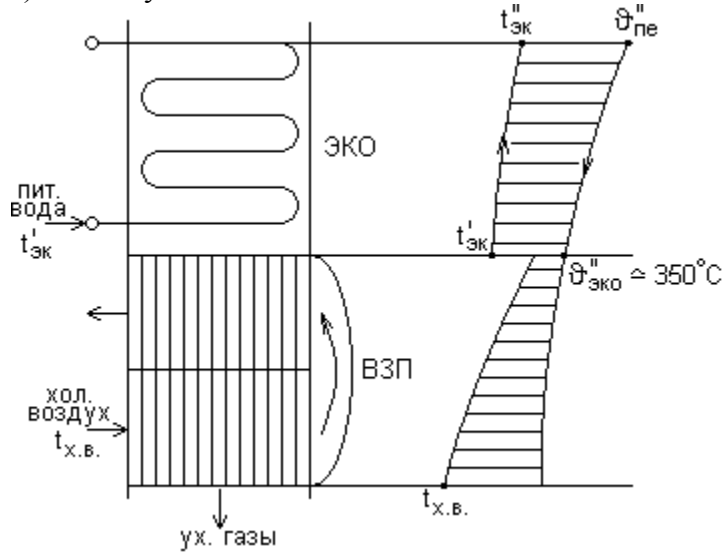


4) Применение стеклянных труб и эмалированных покрытий.

## Лекция №21

### Экономайзер.

а) Одноступенчатая компоновка:



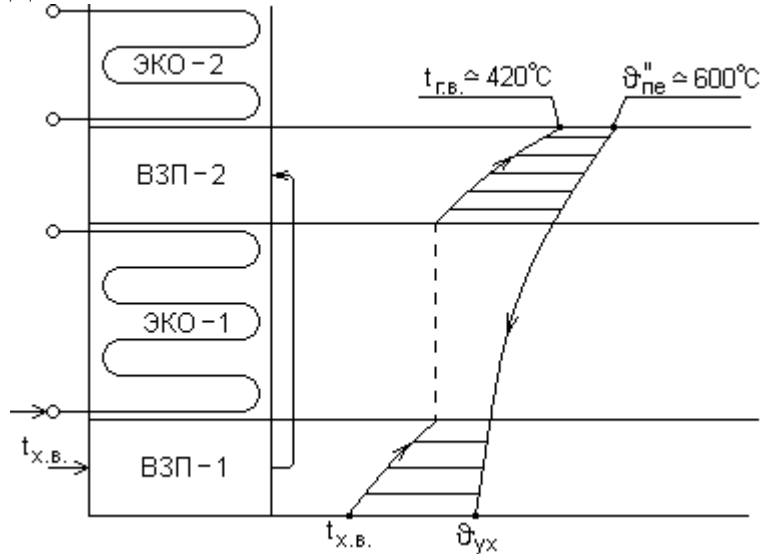
$C_{\text{воды}} \gg C_{\text{пр.сгорания}}$   
 $Q = C \cdot V(t'' - t') \Rightarrow$  вода нагревается в меньшей мере, чем охлаждаются газы и  $\Delta t_{\text{ВЗП}}$  по ходу воздуха ↓.

Так как  $\Delta t_{\text{ВЫХ}}^{\text{min}} \approx 50^\circ\text{C}$ , то  $\Delta t_{\text{ГВ}}^{\text{max}} \approx 350 - 50 = 300^\circ\text{C}$ .

Применяют при сжигании газа, мазута, сухих высокорекреационных ( $V^r > 25\%$ ) углей.

б) Двухступенчатая компоновка:

Для повышения



$$t_{\text{ст}}^{\text{ВЗП-2}} \approx \frac{420 + 600}{2} = 510^\circ\text{C} > t_{\text{ме}}^{\text{доп}} (\text{СмЗ})$$

Для защиты ВЗП-2 от пережога устанавливают ЭКО-2.

Применяют при сжигании высоковлажных топлив (БУ, торф) и низкорекреационных углей АШ и Т ( $V^r < 15\%$ ).

### Водяные экономайзеры.

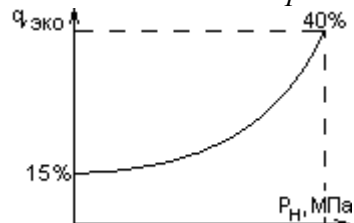
Служат для:

1) Нагрева воды до температуры  $= t'_{\text{эк}} \approx t_{\text{нас}}$ .

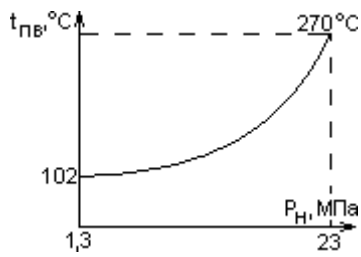
2) Для снижения  $q_2$ .

Тепловосприятие  $Q_{\text{эко}} = (10 \div 20)\% Q_p^p$ .

Удельное тепловосприятие:



с ростом  $P_n \rightarrow \uparrow t_{\text{п.воды}}$ .

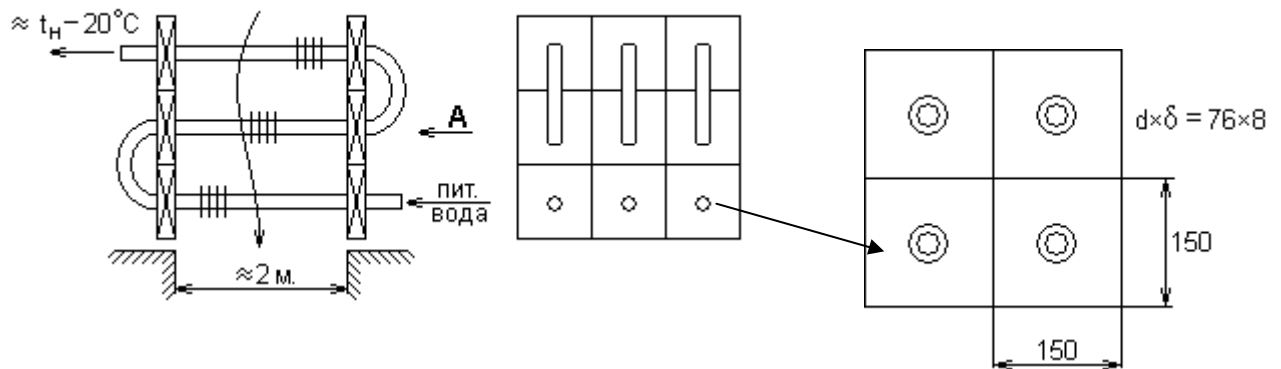


Экономайзеры:

- 1) некипящий  $t''_{\text{эк}} < t_n$ ,  $x'' = 0$
- 2) кипящий  $t''_{\text{эк}} = t_n$ ,  $x'' < 20\%$ .

### Чугунный ребристый экономайзер.

Вид А



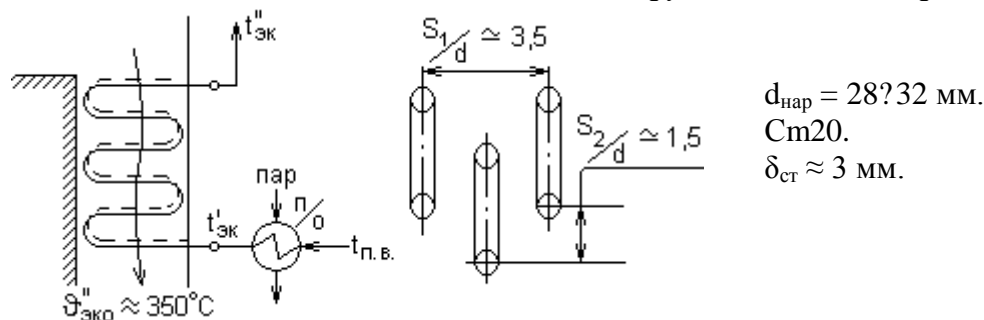
Достоинство: стойкость к кислородной и газовой коррозии.

Недостатки:

- Громоздкость ( $\downarrow k_{\text{эко}} < 15$ ).
- Забивание эко частицами золы.

Применяют в котлах малой мощности.

### Стальные гладко трубные экономайзеры.



$d_{\text{нар}} = 28?32 \text{ мм.}$

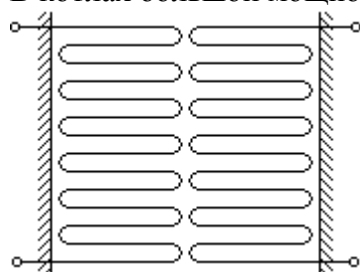
Ст20.

$\delta_{\text{ст}} \approx 3 \text{ мм.}$

Тепловосприятие экономайзера:  $Q_{\text{эк}} = \frac{D_{\text{эк}}}{B} (i''_{\text{эк}} - i'_{\text{эк}}).$

Шахматная компоновка экономайзера обусловлена увеличением коэффициента теплопередачи по сравнению с коридорной.

В котлах большой мощности экономайзер выполняют двухпоточным:



$0,5 D_{\text{п.в.}} \rightarrow \downarrow \Delta P_{\text{эк}} \text{ в } 4 \text{ раза} \sim W_{\text{в}}^2$

Скорость воды:

а) кипящий.  $W_{\text{в}} > 1 \text{ м/с}$  (для предотвращения расслоения пароводяной смеси, что ведёт к пережогу труб).

б) некипящий.

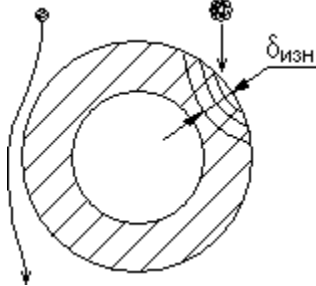
$\frac{W_{\text{в}}}{\text{поток}} \rightarrow W_{\text{в}} > 0,5 \text{ м/с}$  (для смыва пузырьков газа потоком).

Скорость газов:

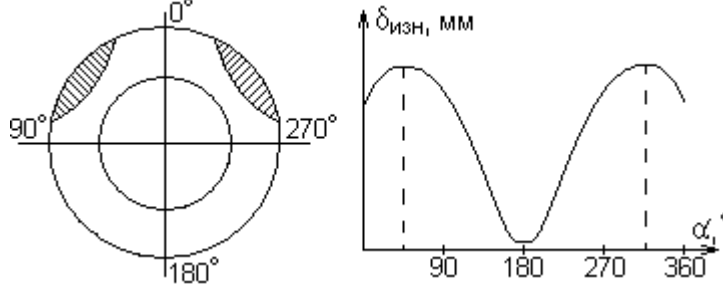
$W_p$  желательнo повышать по следующим причинам:

- $\uparrow W_p \rightarrow \downarrow \varepsilon \rightarrow \uparrow k_{\text{ЭКО}} \rightarrow \uparrow Q_{\text{ЭКО}} \rightarrow \downarrow H_{\text{ЭКО}}$ .
- $\uparrow W_p \rightarrow \uparrow \alpha_k \rightarrow \uparrow W_p^{0,6} \rightarrow \uparrow k_{\text{ЭКО}} \rightarrow \uparrow Q_{\text{ЭКО}} \rightarrow \downarrow H_{\text{ЭКО}}$ .

Однако с повышением скорости газов растёт  $\Delta P_p \sim W_p^2$  и возникает абразивный износ труб золовыми частицами.



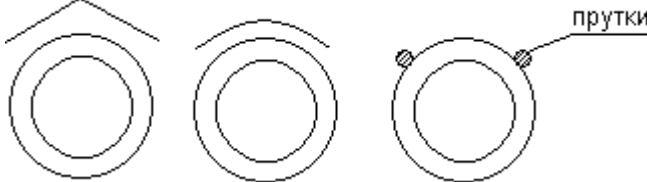
Износ по периметру трубы неравномерен и подчиняется примерно следующей зависимости:



$$\delta_{\text{max}} = f(A_p^p, a_{\text{ун}}, a_{\text{зол}}, W_p^3).$$

$W_p^{\text{доп.}} = 9$  —  $14$  м/с  
 многозольные — малозольные.

Для защиты труб от износа их покрывают накладками:



После экономайзера вода направляется в барабан котла.  
 Применяют в котлах средней и большой мощности.

### Воздухоподогреватель.

Служат для:

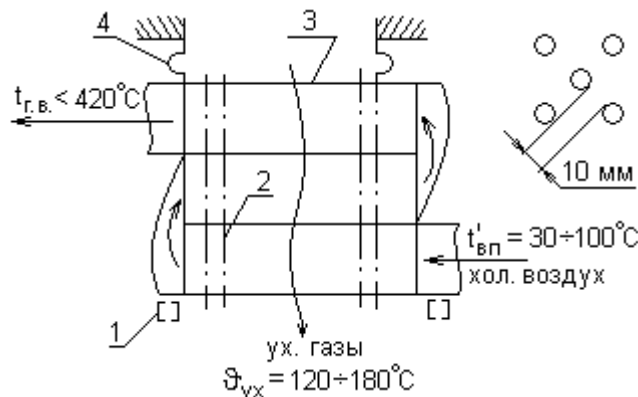
- 1) нагрева воздуха до  $t_{г.в.} = 180 \div 420^\circ\text{C}$ .
- 2) снижения  $q_2$ .

Тепловосприятие:  $Q_{\text{взп}} = (7 \div 15)\% Q_p^p$ .

Воздух подогревают для:

- 1) сушки топлива при размоле.
- 2) ускорения воспламенения и повышения полноты сгорания топлива.

### Трубчатый ВЗП.

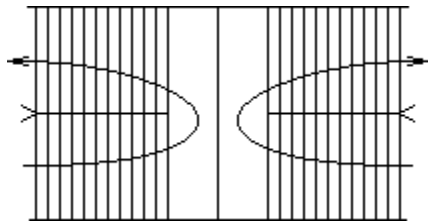


$d \div \delta = 40 \div 1,5$  мм См3.

Позиции:

- 1 – опорная рама.
- 2 – трубы.
- 3 – трубные доски.
- 4 – линзовое уплотнение (для исключения присосов и компенсации линейных удлинений при нестационарных режимах работы).

В котлах большой мощности ВЗП выполняют двухпоточным:



Скорость газов:  $W_{г} = 8 \div 12$  м/с.

Если  $W_{г}$  выше, то  $\Delta P_{г} \uparrow$  и ускоряется износ труб.

Если  $W_{г}$  ниже, то растёт загрязнение и уменьшается  $k_{взп}$ .

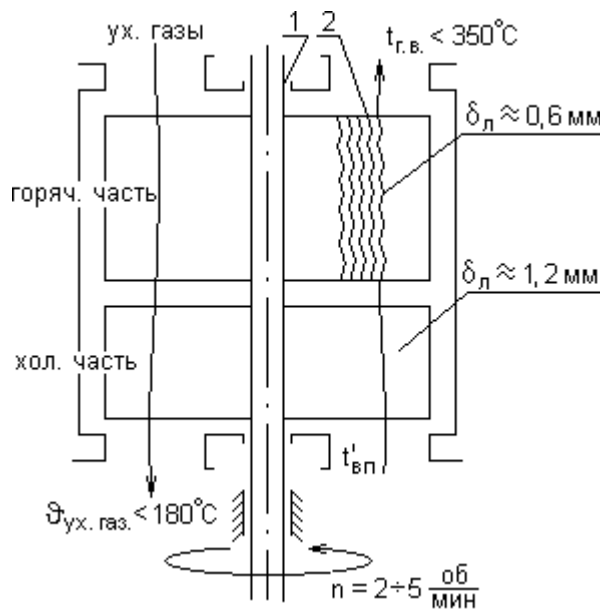
Скорость воздуха:  $W_{в} = 0,5 \cdot W_{г}$  в этом случае  $k_{взп}$  максимален.

Достоинства:

- возможность нагрева до  $t_{г.в.} = 420^{\circ}\text{C}$ .
- низкие значения присосов  $\Delta\alpha_{взп} < 0,06$ .

Недостаток: громоздкий (засчёт низкого  $k < 20$

растёт  $\frac{Q_{взп}}{V_{взп}}$ ).

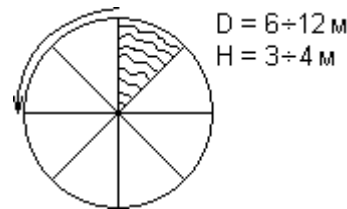


**Регенерационный вращающийся ВЗП.**

Позиции:

1 – вал ротора.

2 – набивка ротора (стальные листы).



При вращении ротора в его левой части аккумулируется теплота, которая в правой части передаётся нагреваемому воздуху.

Достоинства:

- компактность  $250 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$ .
- возможность размещения за пределами котла.

Недостатки:

- низкая температура горячего воздуха  $t_{г.в.} < 350^{\circ}\text{C}$ .
- высокие присосы  $\Delta\alpha_{взп} \approx 0,2$ .

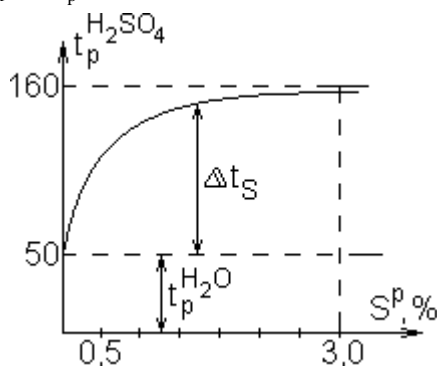
Применяют на газомазутных ТЭС.

**Низкотемпературная коррозия ВЗП.**

В продуктах сгорания содержатся водяные пары температура точки росы которых зависит от их

парциального давления:  $t_p^{H_2O} = f\left(\frac{V_{H_2O}}{V_{сух.т.} + V_{H_2O}}\right) = f(W^p, \alpha_{yx}) = 40 \div 65^{\circ}\text{C}$ . Если  $t_{ст}^{взп} < t_p^{H_2O}$ , то  $H_2O$

конденсируется, при этом плёнка воды способствует доставке кислорода ( $Fe + O_2 \rightarrow Fe_2O_3$ ). Присутствие серы в топливе повышает температуру точки росы ( $S + O_2 \rightarrow SO_2$  и  $\sim 5\% SO_2$  взаимодействует с кислородом  $SO_2 + O \rightarrow SO_3$  (при  $t > 1300^{\circ}\text{C}$ )  $\rightarrow SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \uparrow$ , но если  $t_{ст}^{взп} < t_p^{H_2SO_4} = 120 \div 160^{\circ}\text{C}$ , то будет сернокислотная коррозия  $Fe + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4) + \uparrow H_2$ ).

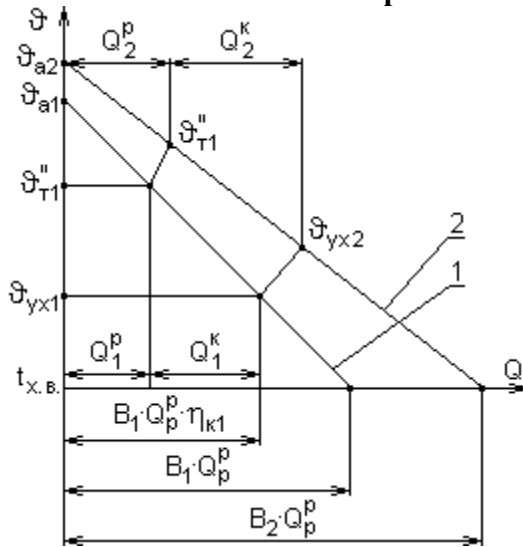


$$t_p^{H_2SO_4} = f(S^p) \equiv f(SO_3)$$

$$t_p^{H_2SO_4} = t_p^{H_2SO_4} + \Delta t_s$$

## Лекция №22

### Переменный режим работы парового котла.



При  $D_1 = D_{\text{ном}}$  и  $V_1$  тепловосприятие котла  $D_1(i_{\text{пе}} - i_{\text{п.в.}}) = V_1 \cdot Q_p^p \cdot \eta_k = Q_1^{\text{рад}} + Q_1^{\text{конв}}$ .

$Q_1^{\text{рад}}$  и  $Q_1^{\text{конв}}$  – радиационное и конвективное тепловосприятия.

При росте  $D_2$  до  $D_{\text{ном}} \rightarrow V_2 > V_1$  и возрастает тепловыделение.

Особенности:

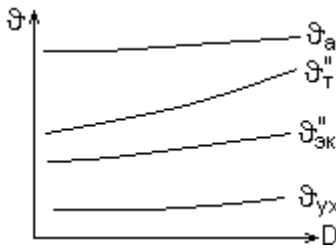
1) с увеличением  $D \rightarrow \uparrow \theta_a \approx \frac{Q_n^p + Q_b}{C_r \cdot V_r} = \frac{Q_n^p}{C_r \cdot V_r} + t_b$

(с  $\uparrow D \rightarrow \uparrow V \rightarrow \uparrow V_r \rightarrow \uparrow W_r^{\text{взп}} \rightarrow \uparrow k_{\text{взп}} \rightarrow \uparrow Q_{\text{взп}}$ ).

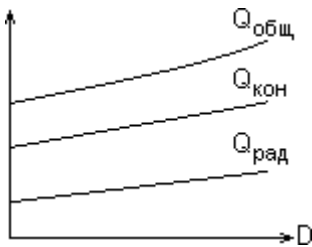
2) возрастает температура газов за топкой: так как  $Q_{\text{л}} \approx \varphi \cdot (J_o - J''_T) = \text{const}$ , то с  $\uparrow J_a \rightarrow \uparrow J''_T \rightarrow \uparrow \theta''_T$ .

3) так как с  $\uparrow D \rightarrow \uparrow V \rightarrow \{Q_{\text{тепл}} \sim V \cdot V_r \text{ и } Q_{\text{отд}} \sim (V \cdot V_r)^{0,6}$

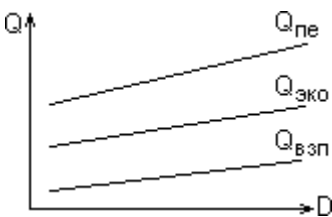
}  $\rightarrow$  возрастают все температуры по ходу газов.



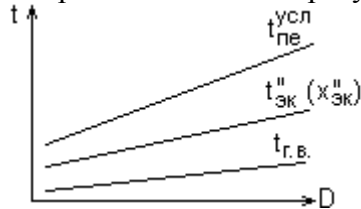
Возрастает  $Q_k$  за счёт  $Q_{\text{конв}}$ :



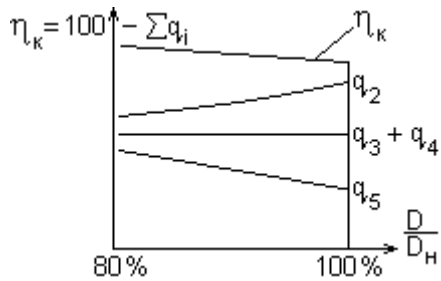
Тепловосприятие всех поверхностей возрастает, так как возрастают  $k$  и  $\Delta t$ :



Возрастают все температуры рабочей среды:



Изменение топочных потерь и КПД:



**Рабочий диапазон нагрузок котла.**

$D_{min} \text{?} D_{max}$ .

$D_{min}$  ограничивается:

- 1) устойчивостью топочного процесса (без пульсации факела).
- 2) надёжностью гидродинамического режима.
- 3) надёжностью шлакоудаления.

$D_{min} = 0,4 \cdot D_n$  – природный газ, мазут, твёрдое топливо (топки с твёрдым шлакоудалением).

$D_{min} = 0,7 \cdot D_n$  – твёрдое топливо (топки с жидким шлакоудалением).

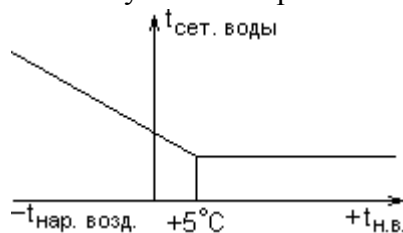
$D_{max}$  ограничивается:

- 1) шлакованием поверхностей на выходе из топки.
- 2) тепловой нагрузкой топочных экранов.
- 3) температурным режимом работы труб пароперегревателя.
- 4) влажностью пара поступающего из барабана в перегреватель.

На практике  $D_{max} = D_{ном}$ .

### **Водогрейные котлы.**

Они отпускают потребителю горячую сетевую воду для отопления и горячего водоснабжения.

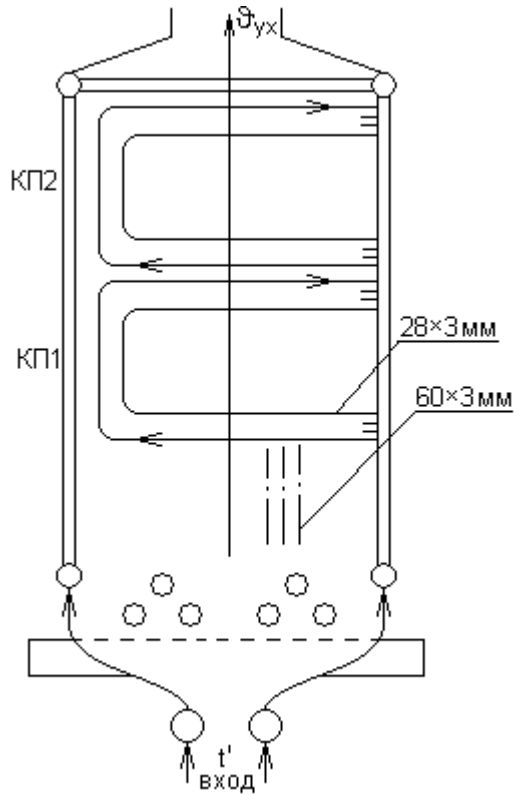


Температура сетевой воды зависит от температуры наружного воздуха.  $t_{с.в.} = f(t_{нар.в.})$

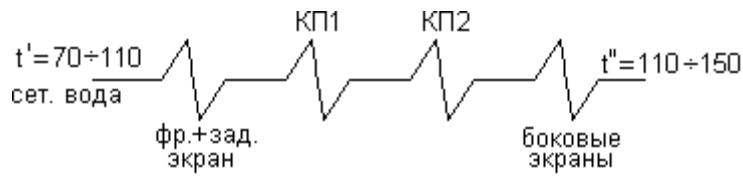
**Нагрузка водогрейных котлов.**

$Q_{в.к.} = 4 \cdot 180$  Гкал/ч. Они работают по прямоточному принципу, кратность циркуляции равна 1.

**Котёл ПТВМ – 50 (100).**



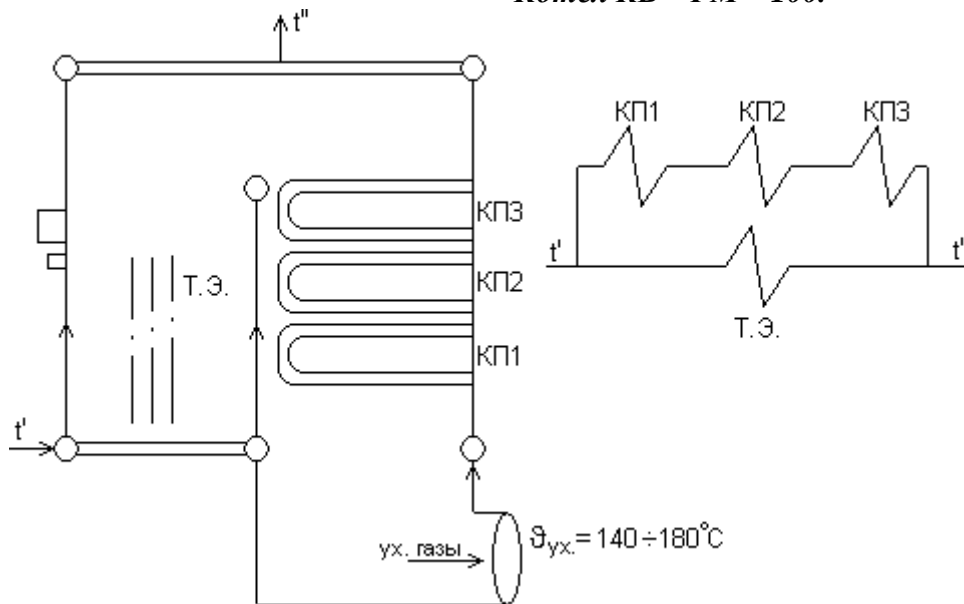
$Q_{в.к.} = 50 (100) \text{ Гкал/ч,}$   
 $\vartheta_{yx} = 200 \div 250^{\circ}\text{C.}$



$W_{в.} \approx 1,5 \text{ м/с, } \alpha''_t \approx 1,1, \eta_k = 82 - 85 \%$   
 мазут прир. газ

Теплопроизводительность регулируют изменением расхода топлива при постоянном  $G_{с.в.} = 1200 \div 2400 \text{ т/ч, } Q = 50 \div 100 \text{ Гкал/ч.}$

**Котёл КВ – ГМ – 100.**

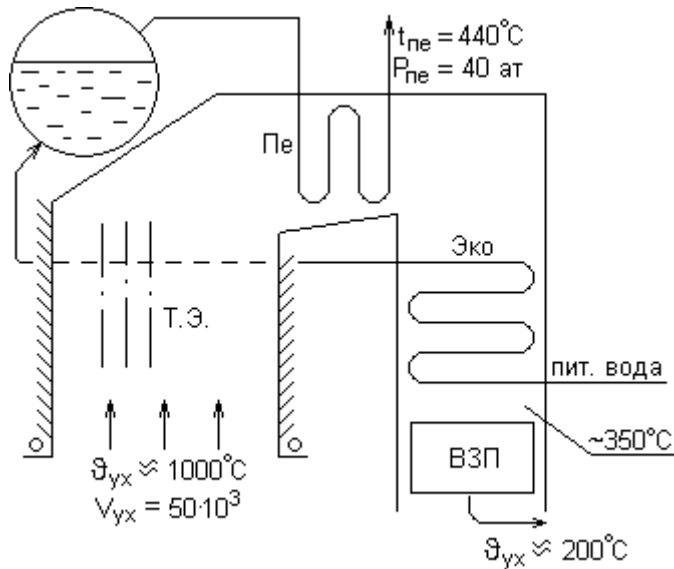


$\alpha''_t \approx 1,05, \eta_k = 92 \div 93\%.$

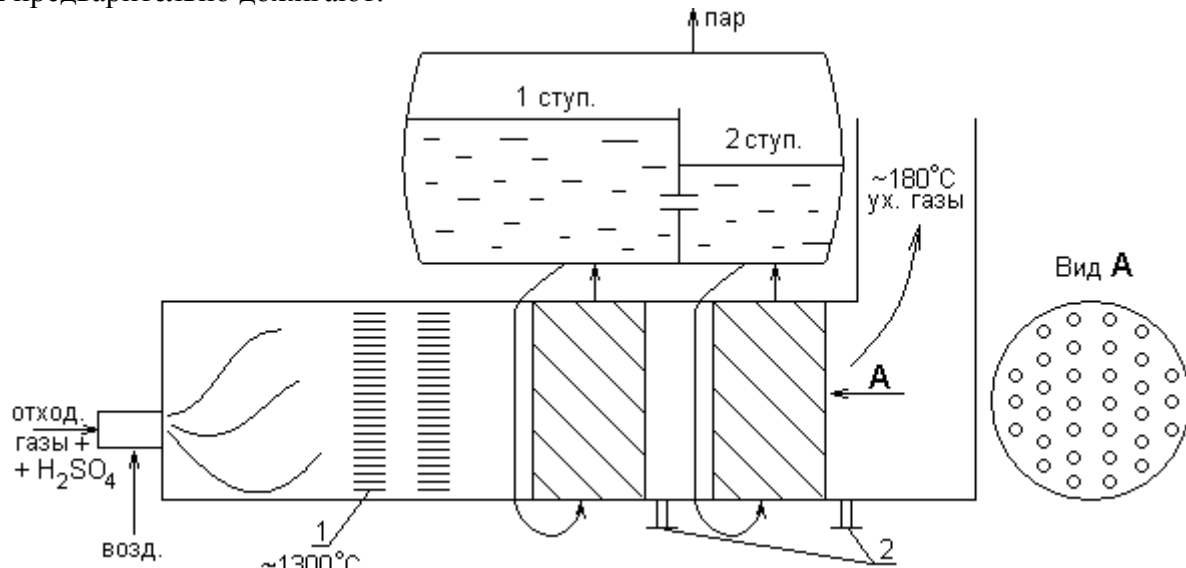
### Котлы производственно-технологических установок.

Работают за счёт теплоты уходящих продуктов сгорания.

Радиационно-конвективный котёл:

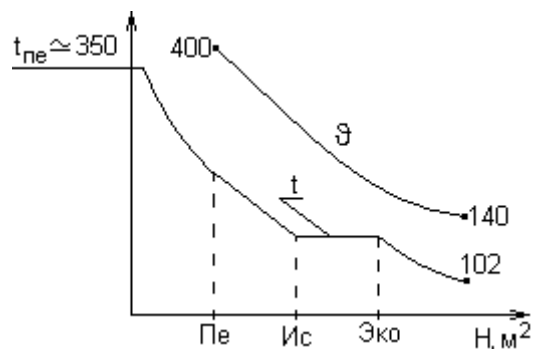
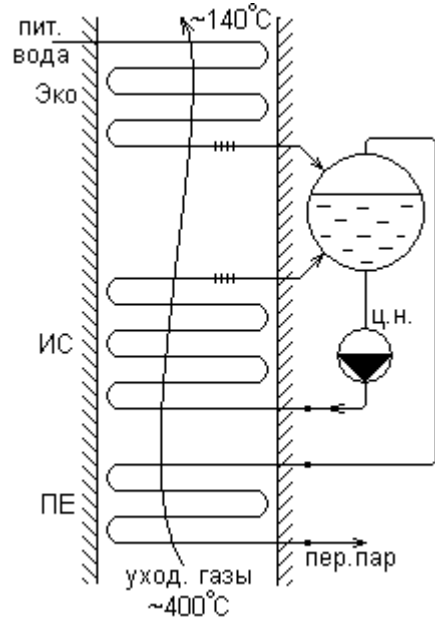


Используют теплоту газов медеплавильных печей. При наличии в газах горючих компонентов их предварительно дожигают:

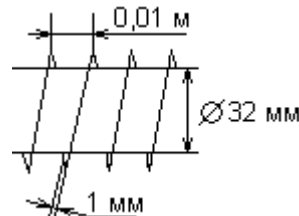


- 1 – стабилизатор горения.
- 2 – отвод конденсата  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

### Котлы утилизаторы.



Для повышения компактности применяют оребрённые трубы:



$$\alpha_k^{\text{орб}} \approx \alpha_k^{\text{глад}} \cdot 2$$

$$q_1 + q_2 + q_5 = 100\%$$

$$\text{КПД: } \eta_k = \frac{D \cdot (i_{пе} - i_{пв})}{B \cdot J'_r}$$

$$\text{Коэффициент утилизации теплоты: } \eta_{\text{утил}} = \frac{J'_r - J''_r}{Q_H^p} = 10 \div 40\%$$

$$\text{Коэффициент использования теплоты газов: } \psi = \frac{\vartheta'_r - \vartheta_{yx}}{\vartheta'_r - t_{x.b.}} = 0,4 \div 0,6$$