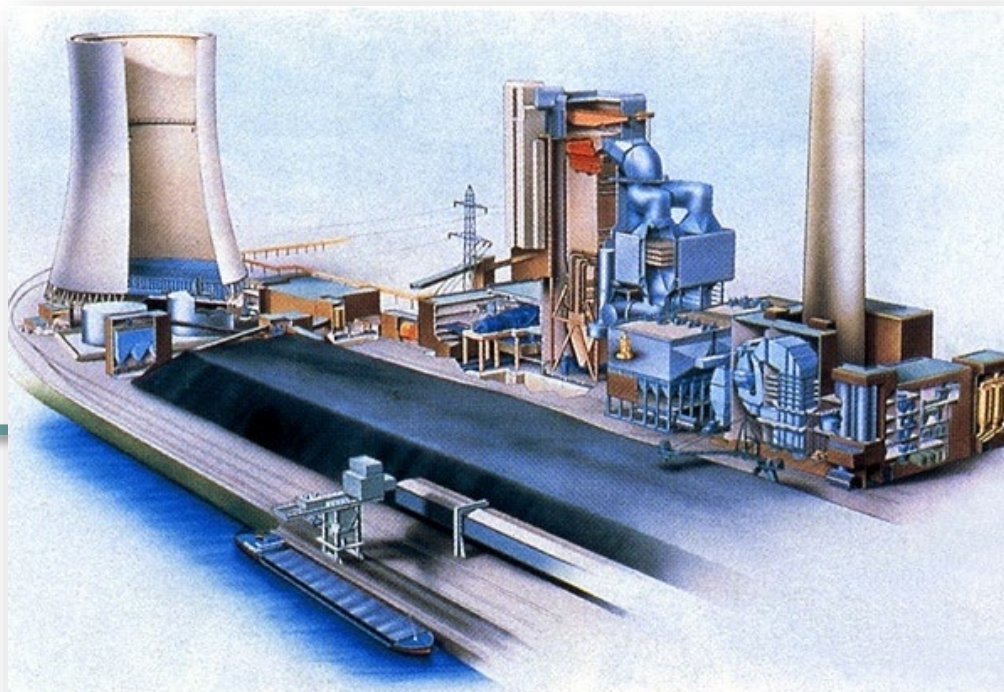
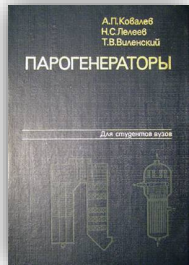


«Междисциплинарный проект» (Проектирование энергетических котлов)



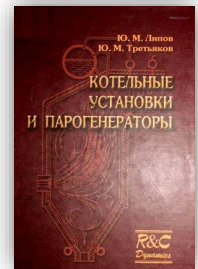
Рекомендуемая литература



Ковалев А.П., Лелеев Н.С., Виленский Т.В.

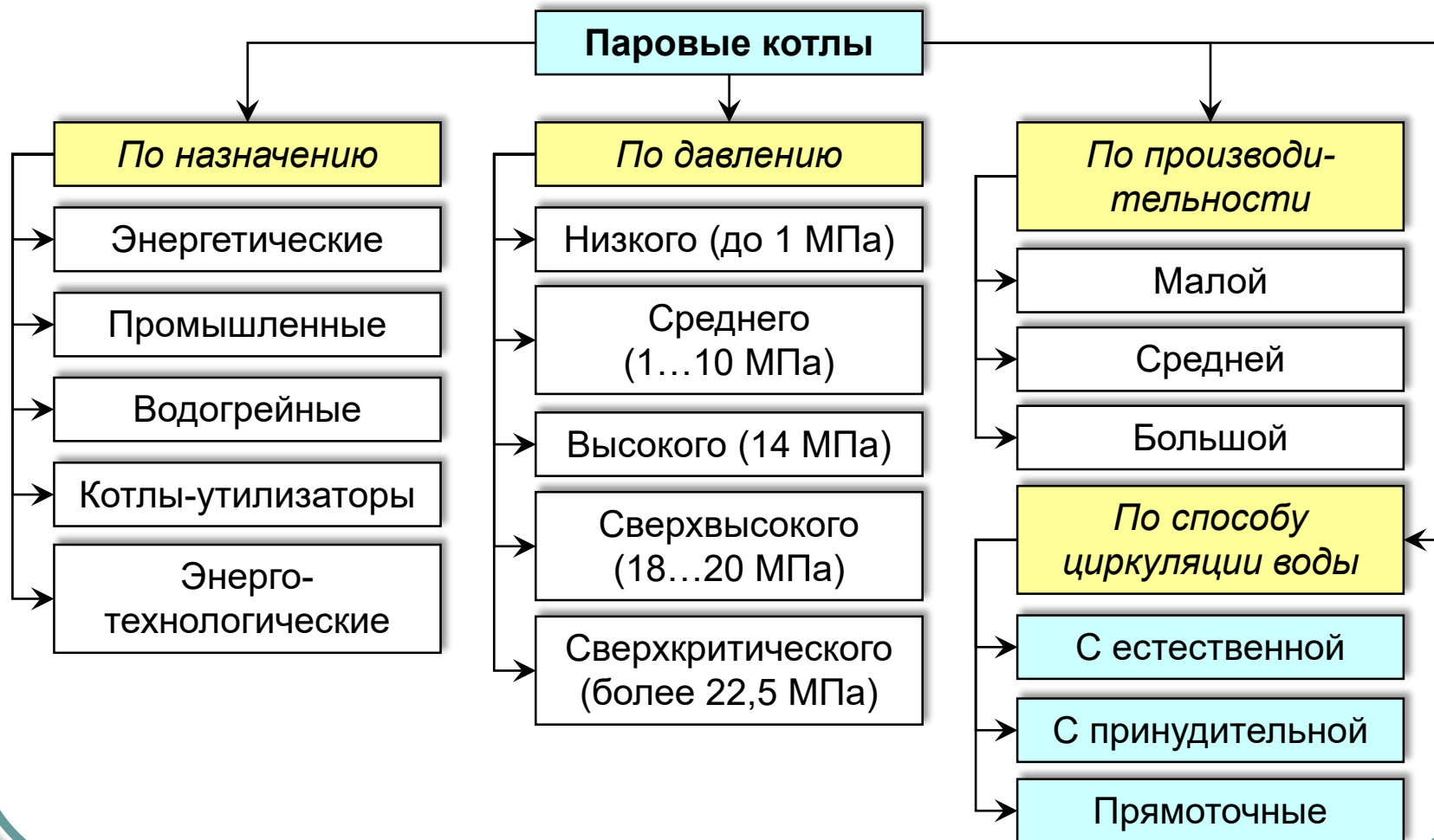
Парогенераторы: Учебник для вузов / Под общ. ред. А.П. Ковалева. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 376 с.

Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. **Котельные установки и парогенераторы.** – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592 с.

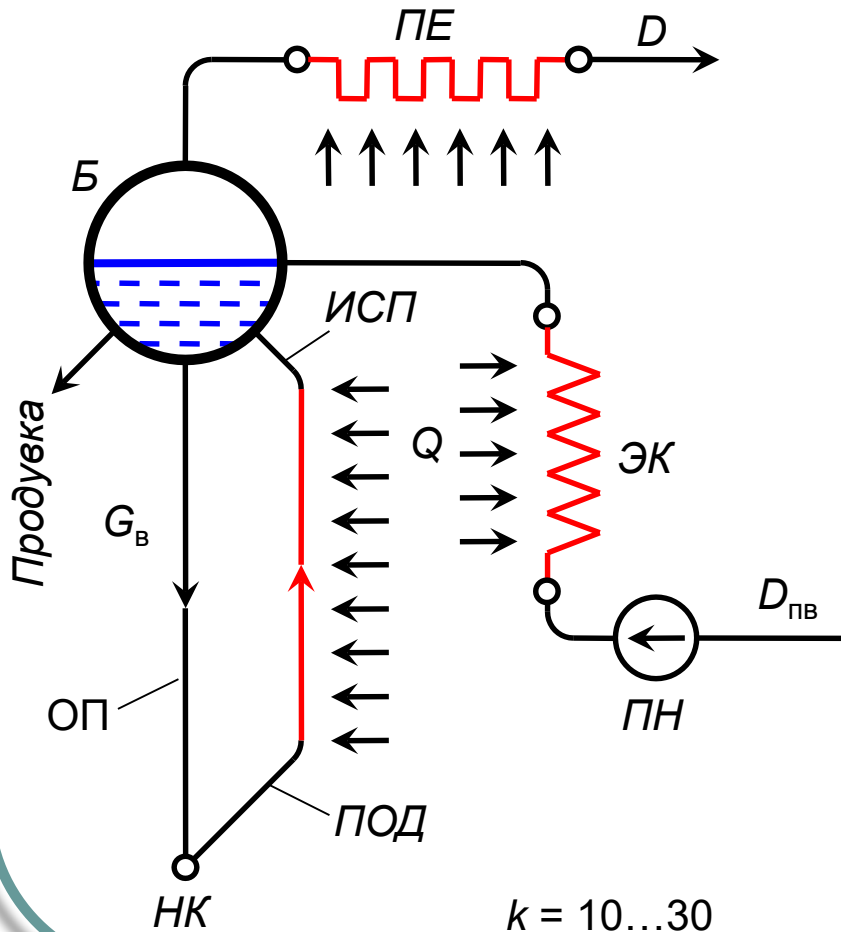


Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

Классификация паровых котлов



Парогенератор с естественной циркуляцией



- Б – барабан,
- ИСП – испарительные поверхности,
- ПЕ – пароперегреватель,
- ЭК – водяной экономайзер,
- ПН – питательный насос,
- НК – нижний коллектор,
- ОП – опускные трубы,
- ПОД – подъемные трубы.

D – расход пара,

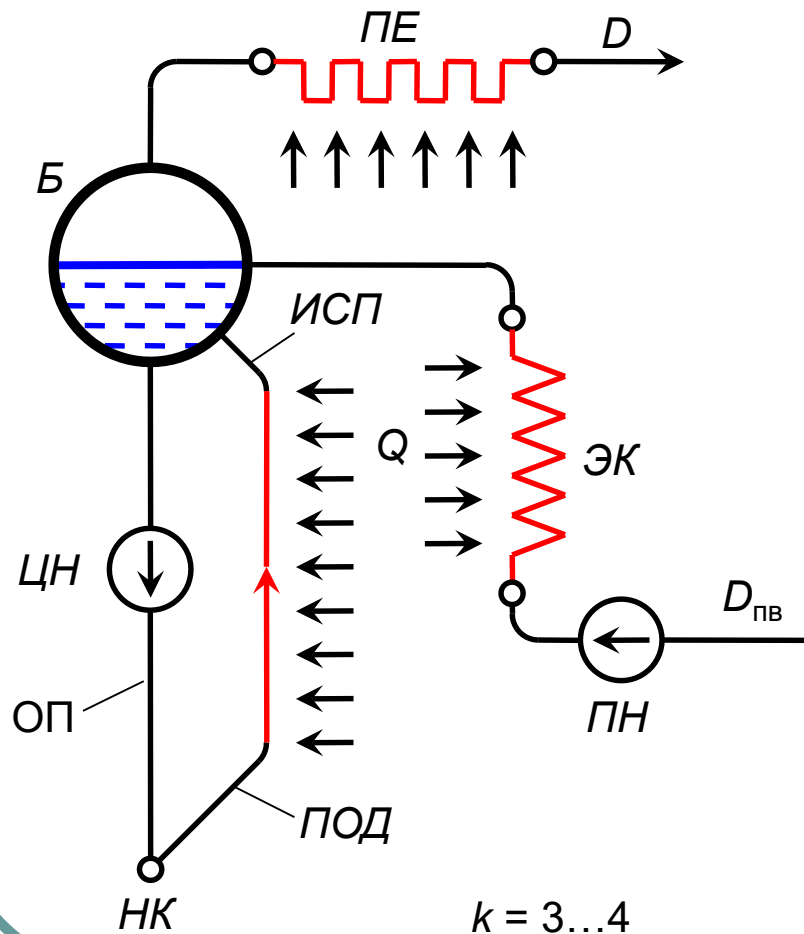
$D_{\text{ПВ}}$ – расход питательной воды,

Q – подвод тепла

Движущий напор: $S = hg(\rho_B - \bar{\rho}_{CM})$

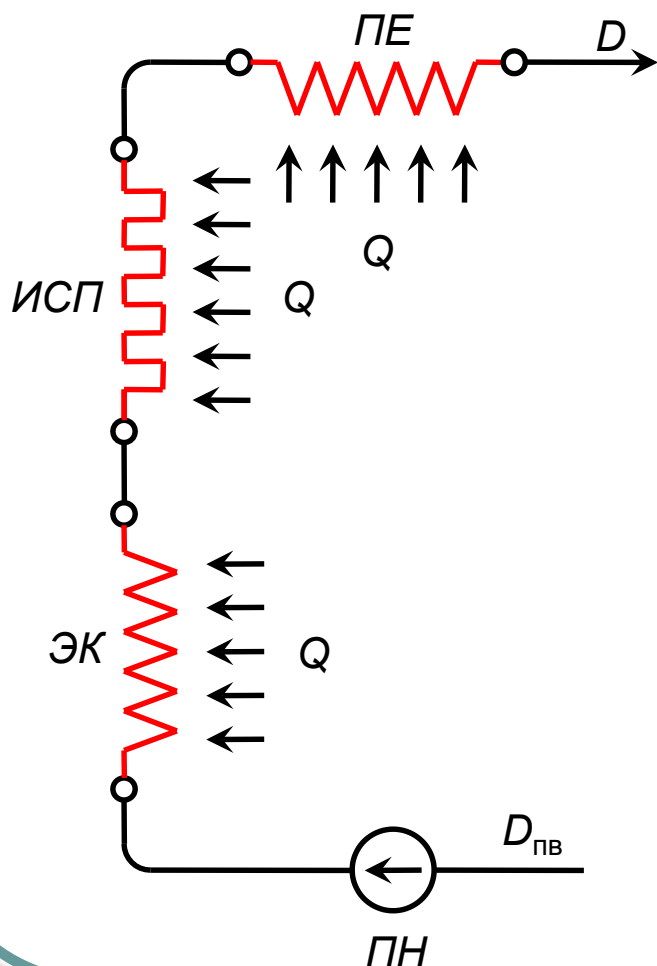
Кратность циркуляции: $k = G_B / D$

Парогенератор с многократной принудительной циркуляцией



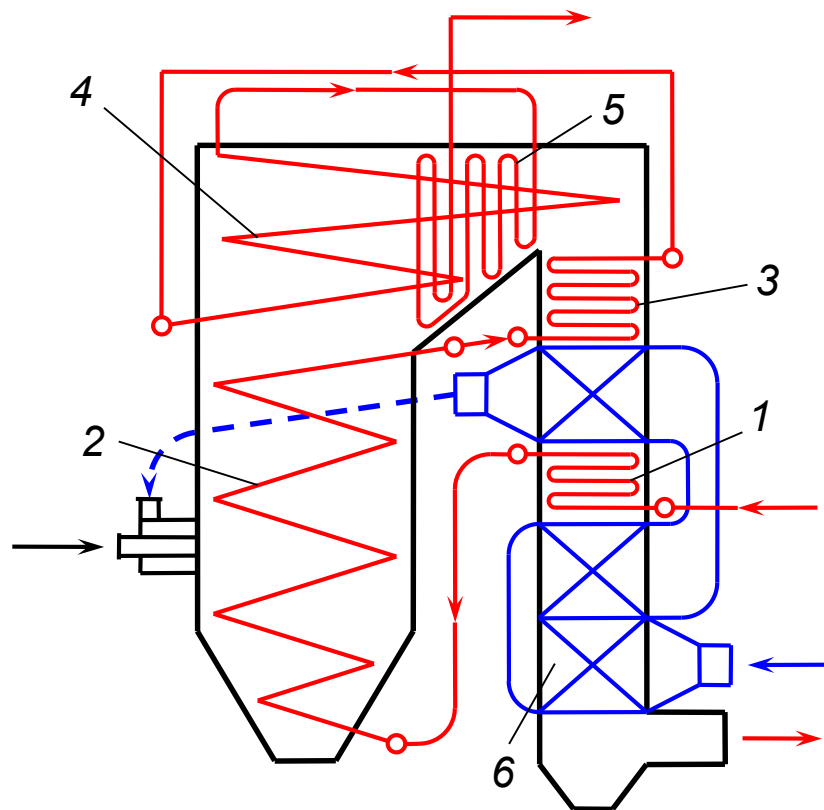
Отличается наличием в контуре специальных *циркуляционных насосов* (ЦН)

Прямоточные парогенераторы



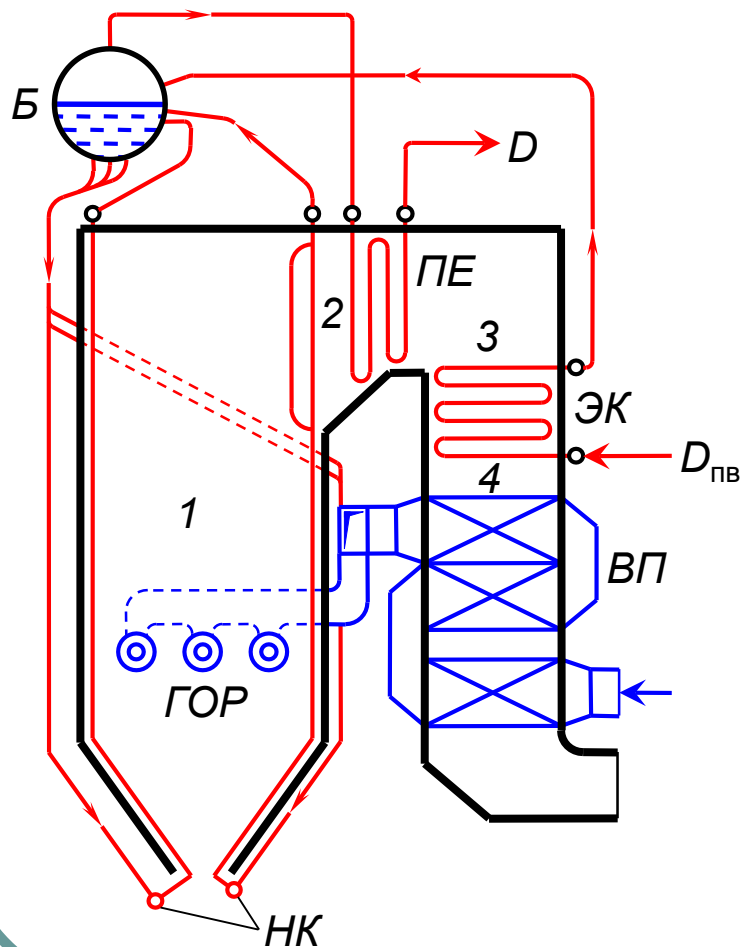
Принципиально отличаются тем, что поступающая в испарительный тракт вода на выходе из него полностью превращается в пар, т.е. в этом случае кратность циркуляции $k = 1$.

Принципиальная схема прямооточного парогенератора

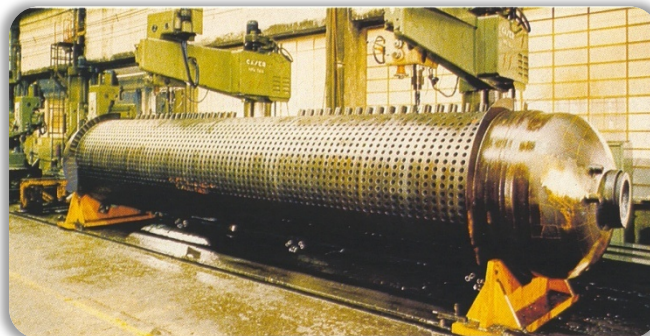


1. Водяной экономайзер
2. Нижняя радиационная часть
3. Переходная зона
4. Верхняя радиационная часть
5. Конвективный перегреватель
6. Воздухоподогреватель

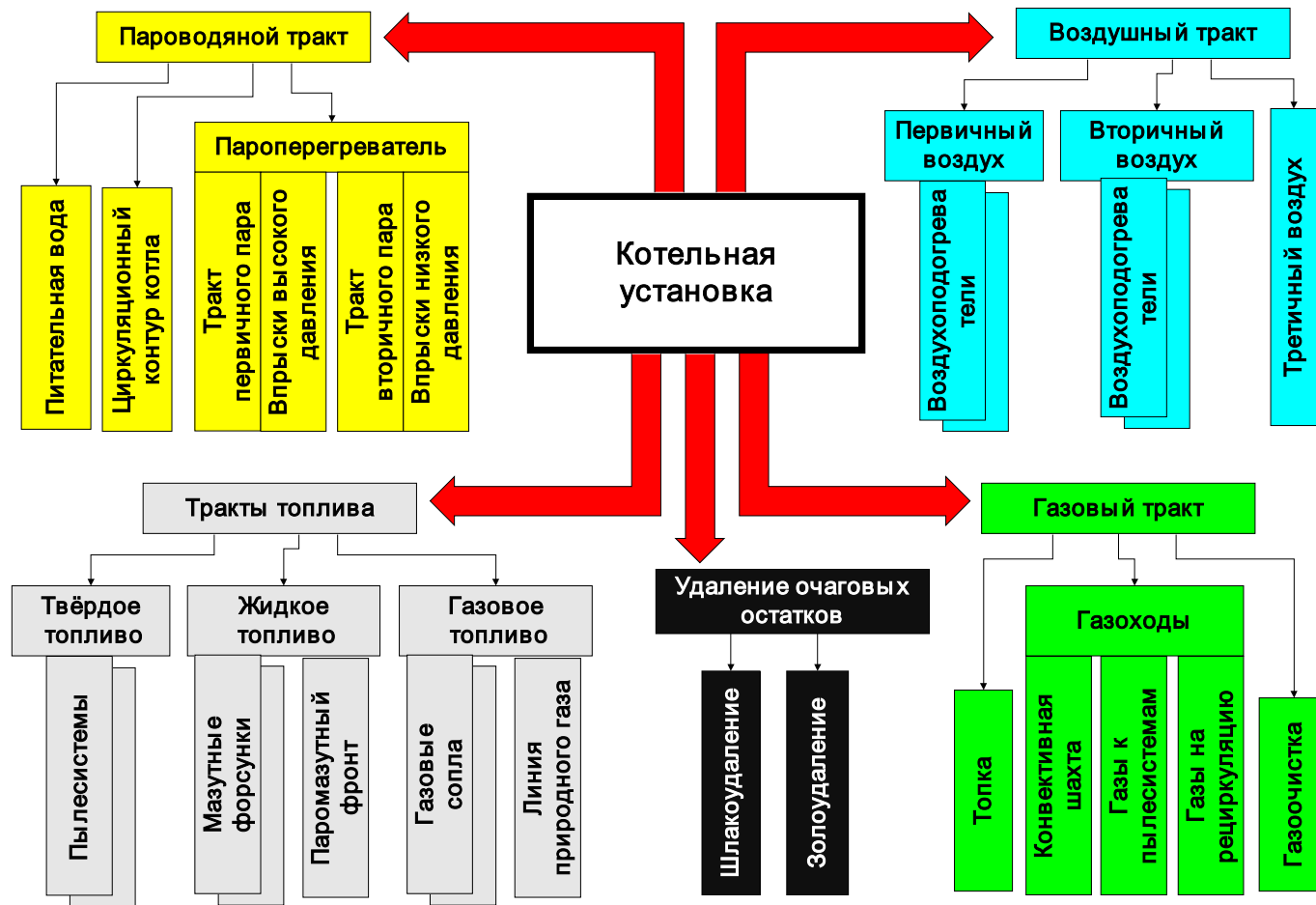
Принципиальная схема барабанного парогенератора



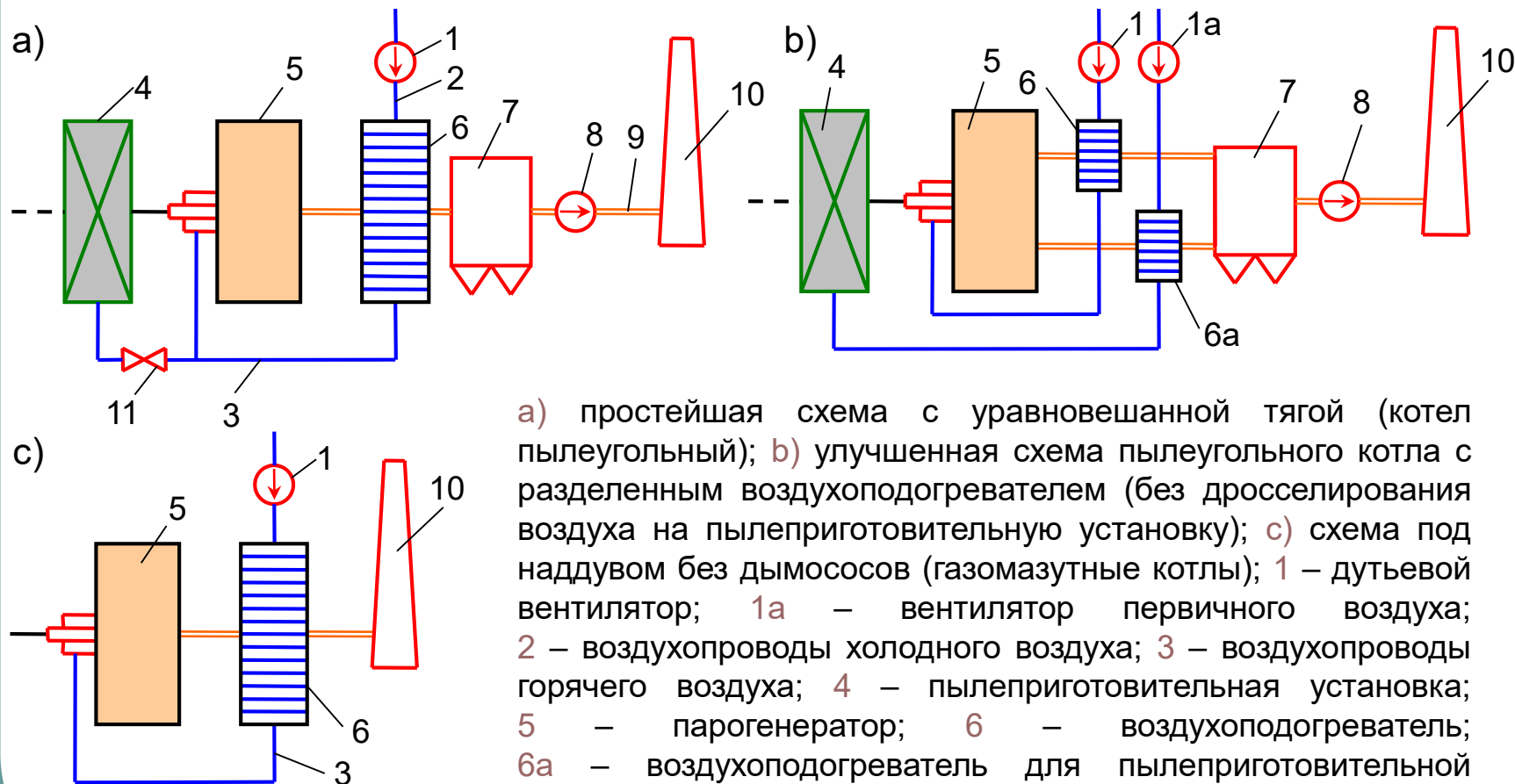
1. Топочная камера
 2. Горизонтальный газоход
 3. Поворотная камера
 4. Конвективная шахта
- ЭК – экономайзер
 - Б – барабан
 - НК – нижние коллектора
 - ПЕ – пароперегреватель
 - ВП – воздухоподогреватель
 - ГОР – горелки



Функциональные узлы котельных установок



Принципиальные схемы газовоздушных трактов



а) простейшая схема с уравновешанной тягой (котел пылеугольный); б) улучшенная схема пылеугольного котла с разделенным воздухоподогревателем (без дросселирования воздуха на пылеприготовительную установку); в) схема под наддувом без дымососов (газотопные котлы); 1 – дутьевой вентилятор; 1а – вентилятор первичного воздуха; 2 – воздухопроводы холодного воздуха; 3 – воздухопроводы горячего воздуха; 4 – пылеприготовительная установка; 5 – парогенератор; 6 – воздухоподогреватель; 6а – воздухоподогреватель для пылеприготовительной установки; 7 – золоуловитель; 8 – дымосос; 9 – внешние газоходы; 10 – дымовая труба; 11 – дроссельный шибер

Маркировка паровых котлов

Е – 420 – 140 ГМ

Паропроизводительность, т/ч

- П** – прямоточный
- Е** – с естественной циркуляцией
- Пр** – с принудительной циркуляцией
- Пп** – прямоточный
с промежуточным перегревом
- Еп** – с естественной циркуляцией и
с промежуточным перегревом

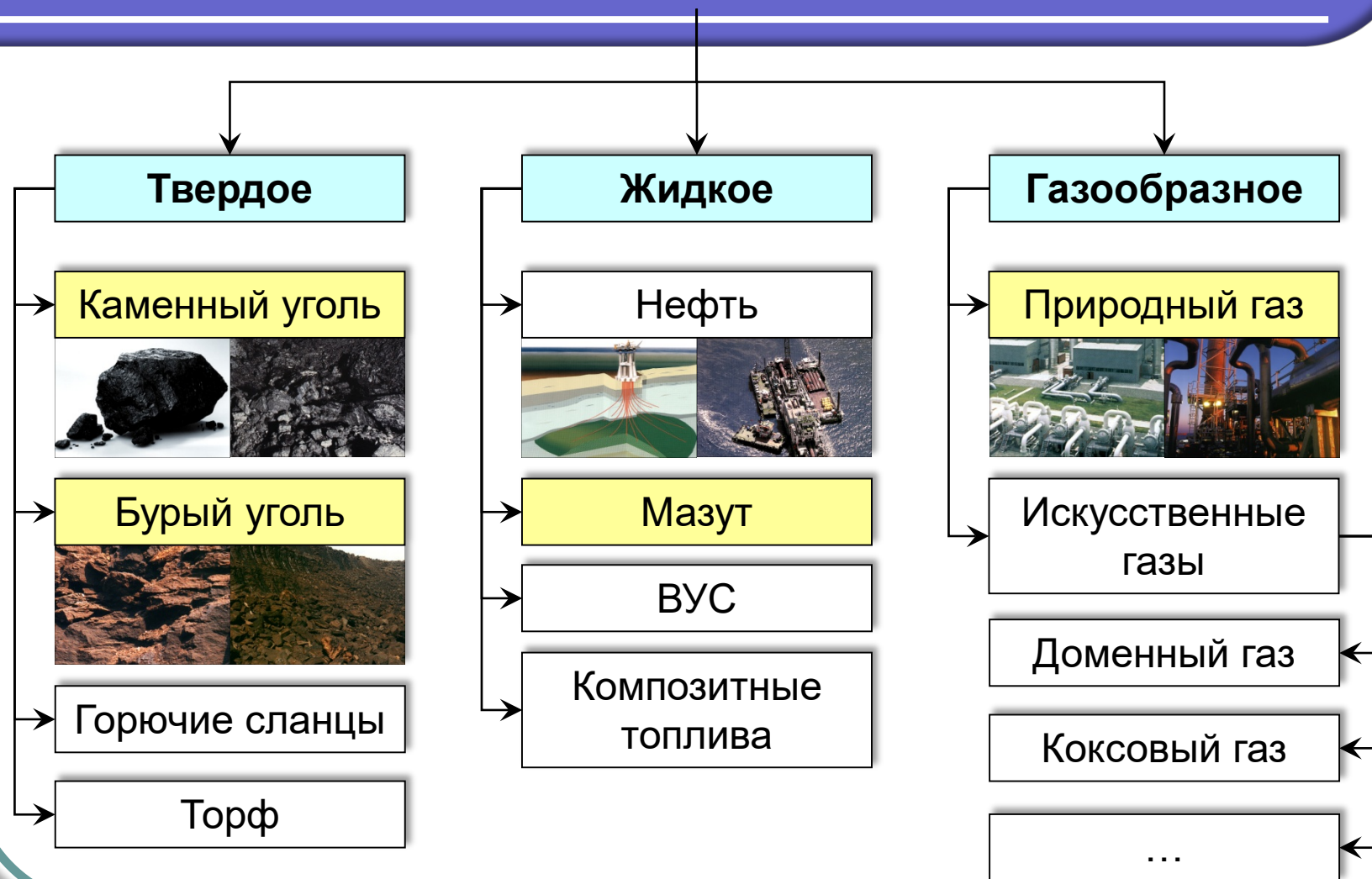
- ГМ** – газомазутный
- Г** – газ
- М** – мазут
- Ж** – с жидким
шлакоудалением
- В** – вихревая топка
- Ц** – циклонная топка
- Р** – решетка
- Н** – наддув
- ...

Давление пара, кгс/см²

Энергетическое топливо



Энергетическое топливо



Классификация углей

Бурый уголь
 $Q_B < 24$ МДж/кг

Каменный уголь
 $Q_B > 24$ МДж/кг

Антрацит
 $Q_B > 24$ МДж/кг
 $V^r < 9\%$

Марка	Обоз-е
$W^P > 40\%$	Б1
$W^P = 30...40\%$	Б2
$W^P < 30\%$	Б3
Длиннопламенный	Д
Газовый	Г
Газовый жирный	ГЖ
Жирный	Ж
Коксовый жирный	КЖ
Коксовый	К
Отощенный спекающийся	ОС
Тощий	Т
Слабоспекающийся	СС
Антрацит	А

Класс	Обоз-е	Размер, мм
Плита	П	> 100
Крупный	К	50...100
Орех	О	25...50
Мелкий	М	13...25
Семечко	С	6...13
Штыб	Ш	< 6
Рядовой	Р	до 200 (шахтн.) до 300 (откр.)
Мелкий и семечко со штыбом	МСШ	< 25
Семечко со штыбом	СШ	< 13

МАРКА + КЛАСС = АШ, ОСП

Химический состав топлива

Горючая часть

- Углерод (C)
- Водород (H)

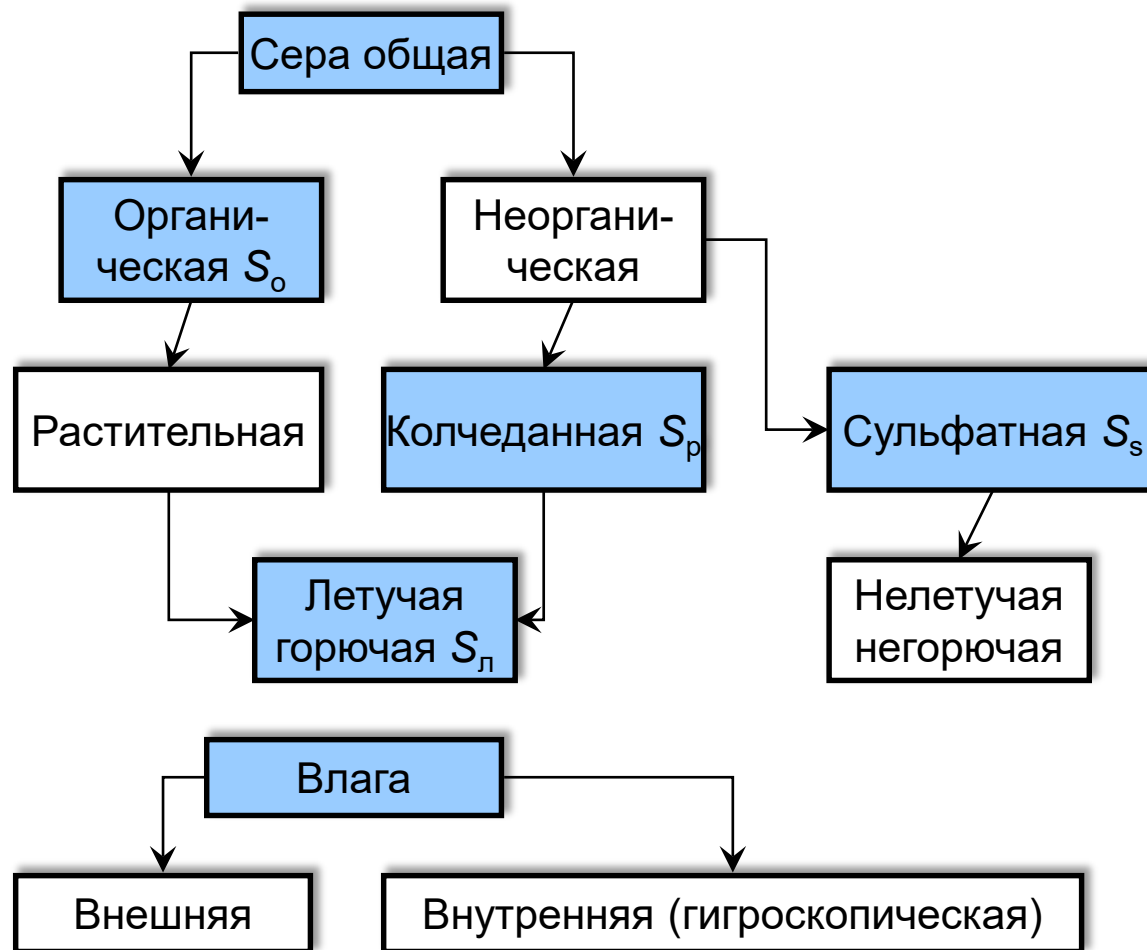
Балластная часть

Внутренний балласт

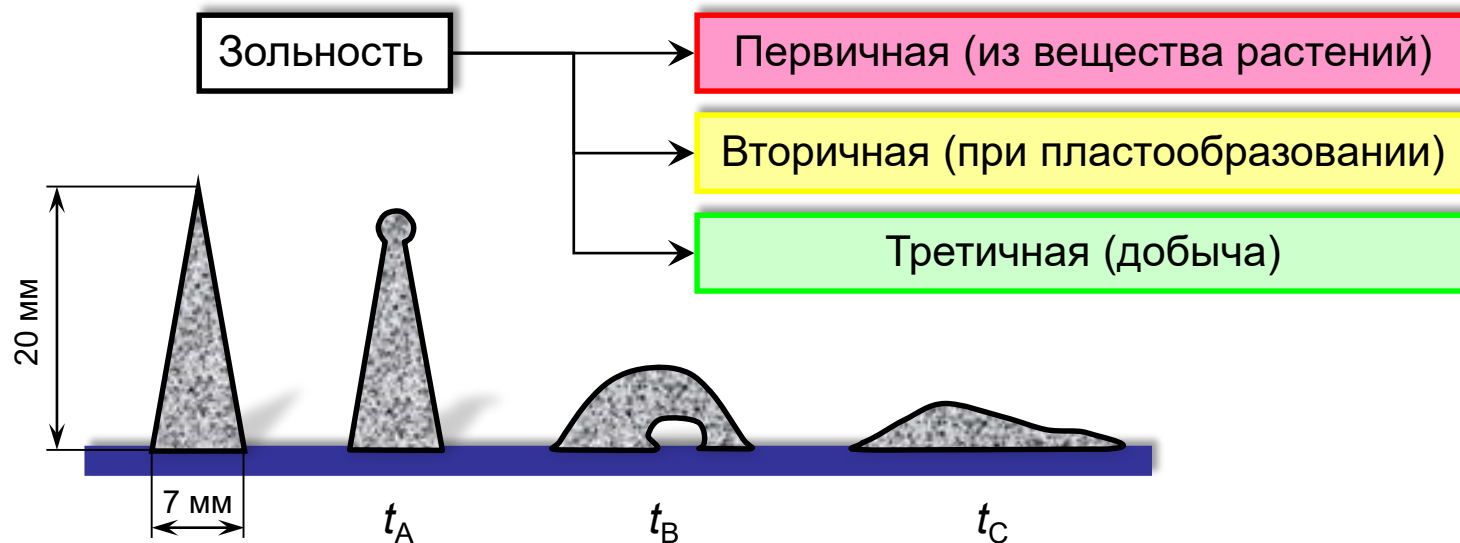
- Кислород (O)
- Азот (N)
- Сера (S)

Внешний балласт

- Зола (A)
- Влага (W)

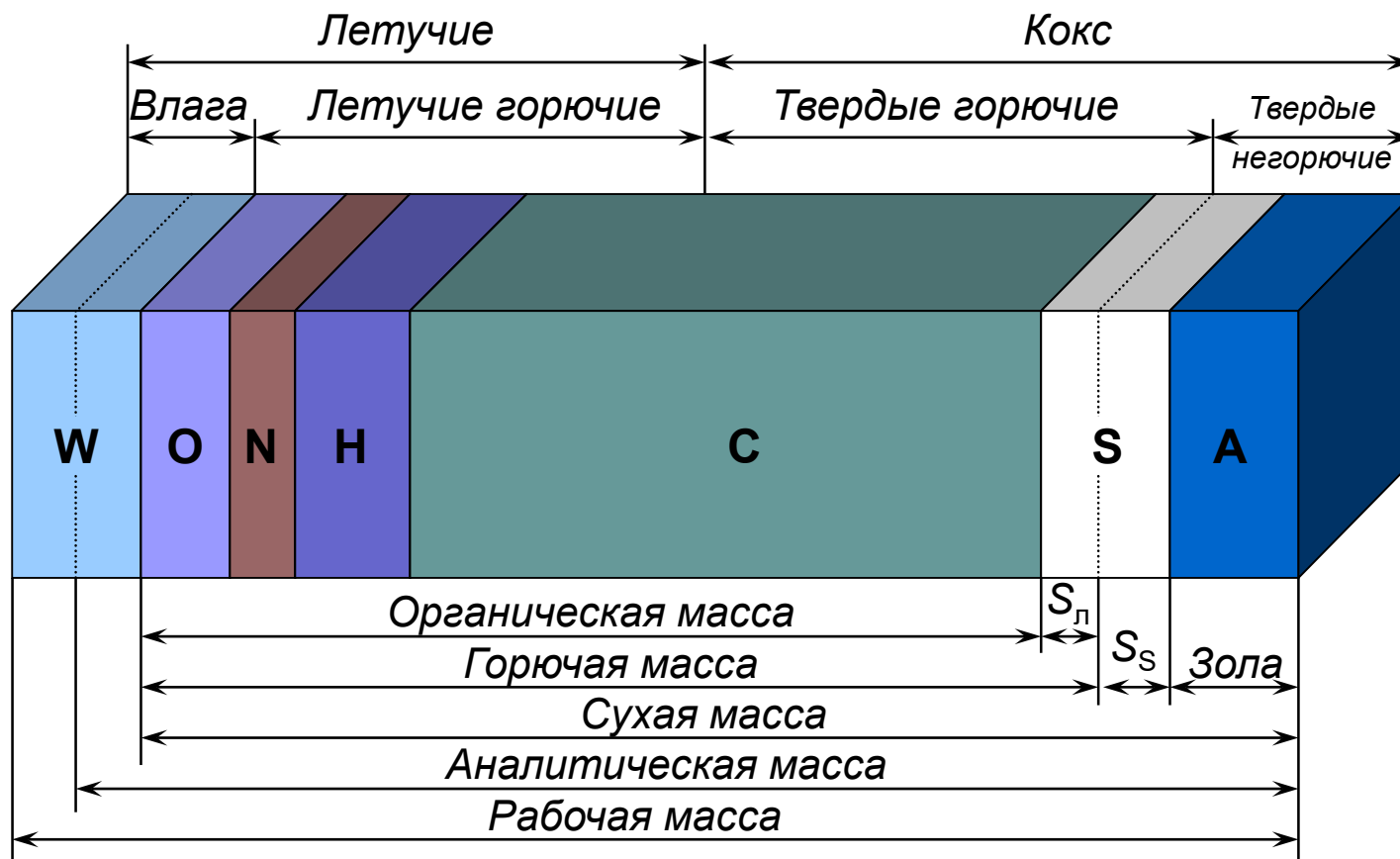


Минеральная часть топлива



- Температура начала деформации, при которой появляется первое изменение формы пирамидки – $t_A = 1000 \dots 1200^\circ\text{C}$
- Температура начала размягчения, при которой вершина пирамидки касается основания – $t_B = 1100 \dots 1400^\circ\text{C}$
- Температура начала жидкоплавкого состояния, соответствующая началу растекания по плоскости – $t_C = 1200 \dots 1500^\circ\text{C}$

Химический состав топлива



Теплота сгорания топлива

- Теплотой сгорания называют теплоту, которая выделяется при сжигании одной единицы массы топлива. Различают **высшую** и **низшую** теплоту сгорания. Высшая отличается добавочной теплотой, выделяющейся при конденсации влаги, содержащейся в дымовых газах:

$$Q_{H_2O} = 2500 \left(9H^r / 100 + W^r / 100 \right) = 225H^r + 25W^r$$

$$Q_i^r = Q_s^r - Q_{H_2O} = Q_B^r - 225H^r - 25W^r$$

Д.И. Менделеев получил полуэмпирическую формулу для расчета Q_i^r

$$Q_i^r = 339C^r + 1030H^r - 109(O^r - S_{II}^r) - 25W^r$$

Для газообразных топлив теплоту сгорания находят по процентному содержанию горючих компонентов и теплоте их сгорания

$$Q_i^d = 0,01 \left(Q_{CO} CO + Q_{H_2} H_2 + Q_{H_2S} H_2S + \right. \\ \left. + Q_{CH_4} CH_4 + Q_{C_2H_2} C_2H_2 + \dots + Q_{C_nH_m} C_nH_m \right)$$

Условное топливо.

Приведенные характеристики топлива

- При сравнении работающих установок по экономичности и другим показателям удобно пользоваться относительными характеристиками топлива, такими, например, как **условное топливо** и **приведенные влажность и зольность**.

Условное топливо – топливо с низшей теплотой сгорания 29,33 МДж/кг (7000 ккал/кг), что соответствует теплотворной способности хорошего каменного угля.

Для сравнения содержания балласта в различных топливах пользуются приведенными характеристиками:

$$W_{\text{пр}} = 4,19 \frac{W_r}{Q_i^r};$$
$$A_{\text{пр}} = 4,19 \frac{A_r}{Q_i^r};$$
$$S_{\text{пр}} = 4,19 \frac{S_r}{Q_i^r};$$

Твердость топлива и коэффициент размолоспособности

- Твердость и сопротивляемость измельчению твердого топлива характеризуется коэффициентом размолоспособности – отношение удельного расхода электроэнергии на помол эталонного топлива (антрацита), принимаемого за единицу, к удельному расходу электроэнергии на помол испытуемого топлива до того же размера, что и эталонное.
- Определение коэффициента размолоспособности производят размолом пробы топлива в лабораторной мельнице и получаемый при этом коэффициент размолоспособности называют **лабораторным относительным коэффициентом размолоспособности**

$$k_{\text{ло}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{этал}}}{\mathcal{E}_{\text{исп}}}$$

- Коэффициент размолоспособности показывает, во сколько раз производительность мельницы при прочих равных условиях на конкретном топливе больше, чем на эталонном

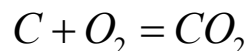
Продукты сгорания топлива



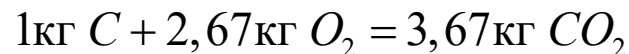
Продукты сгорания топлива

Теоретический расход воздуха на горение

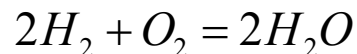
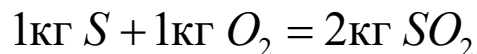
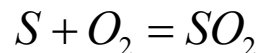
- Если при полном сгорании топлива прореагирует весь поданный кислород, то имеющееся при этом соотношение кислорода и топлива называется *стехиометрическим*, а количество поданного воздуха – теоретически необходимым



Для 1 кг углерода получим



Для серы и водорода



Суммарная потребность в кислороде (с учетом содержащегося в топливе), кг/кг

$$L_{O_2}^0 = 2,67 \frac{C^r}{100} + 8 \frac{H^r}{100} + \frac{S_{\text{л}}^r}{100} - \frac{O^r}{100}$$

Теоретический расход воздуха на горение

Теоретические объемы продуктов сгорания

- С учетом того, что в воздухе содержится 21% кислорода по объему, и удельная масса кислорода $\rho_{O_2} = 1,429 \text{ кг/м}^3$ получаем теоретически необходимое количество воздуха, м³/кг

$$V^0 = 0,0889(C^r + 0,375S_{\text{л}}^r) + 0,265H^r - 0,0333O^r$$

В массовом выражении, кг/кг

$$L^0 = 0,115(C^r + 0,375S_{\text{л}}^r) + 0,342H^r - 0,0431O^r$$

- Теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг

$$V_{\text{г}}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0$$

Теоретический объем трехатомных газов, м³/кг

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{1,866}{100}(C^r + 0,375S_{\text{л}}^r)$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 11

№ п/п	Базисные материалы	Марка	Класс или продукт обогащения	Температура плавления, °С			Исходное состояние		Начало кристаллизации, °С	Элементный состав золь по безуглеродную массу, %										Температура плавления, °С	Склонность к образованию окислов
				$t_{\text{пл}}$	$t_{\text{пл}}$	$t_{\text{пл}}$	$t_{\text{пл}}$	$t_{\text{пл}}$		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Сумма				
Россия																					
28	Кузнечий базальт	Д	Р. СШ	1160	1310	1440	1400	100	1600	20	60,0	20,6	0,9	6,8	4,0	2,7	3,0	2,0	1000	нет	
29	Кузнечий базальт	Г	Р. МСШ, СШ	1170	1300	1390	1400	25	1500	20	55,9	21,8	0,9	7,9	6,1	2,9	2,4	2,1	990	нет	
30	Кузнечий базальт	Г	промподукт	1170	1270	1340	—	—	1520	20	58,7	20,2	0,9	6,3	5,8	2,7	3,8	1,6	1000	нет	
31	Кузнечий базальт	Г	промподукт	1180	1180	1220	1430	9	1450	9	41,6	18,9	1,2	13,9	15,3	5,7	2,2	1,2	960	есть	
32	Кузнечий базальт	ИСС	Р. СШ	1190	1370	1460	—	—	1590	0	56,1	23,7	1,1	10,2	4,1	1,9	2,1	0,8	1030	нет	
33	Кузнечий базальт	Т	Р. СШ	1190	1370	1460	—	—	1790	20	59,8	22,5	0,9	8,6	2,8	1,7	2,7	1,0	1020	нет	
34	Кузнечий базальт	Т	промподукт	1220	1330	1410	—	—	—	—	56,0	25,7	1,1	7,4	4,2	2,1	2,1	0,8	1020	нет	
35	Кузнечий базальт	Ж	Р. СШ	1150	1300	1380	—	—	—	—	63,8	19,3	1,0	5,0	3,9	2,0	3,2	1,8	1020	нет	
36	Кузнечий базальт	К	промподукт	1170	1340	1420	—	—	1580	20	58,4	24,5	0,8	7,4	3,6	2,1	2,0	1,2	1020	нет	
37	Кузнечий базальт	Р	промподукт	1160	1370	1460	—	—	—	—	63,1	20,7	0,9	6,1	4,3	1,3	2,1	1,5	1020	нет	
38	Углероды Кузнечского б-на	Д	РОК I	1140	1290	1380	—	—	1610	20	58,7	20,3	0,9	6,9	7,8	2,2	1,7	1,5	990	нет	
39	Углероды Кузнечского б-на	Г	РОК I	1180	1370	1460	150	40	1600	20	58,9	22,2	1,0	7,5	5,1	2,3	2,1	0,0	1000	нет	
40	Углероды Кузнечского б-на	Г	РОК II	1150	1270	1330	1400	6	1400	6	54,0	21,8	0,9	6,7	11,9	2,4	1,5	0,8	980	есть	
41	Углероды Кузнечского б-на	ИСС	РОК I	1190	1340	1410	—	—	1570	20	49,7	24,4	1,0	16,1	5,2	1,4	1,8	0,4	1000	нет	
42	Углероды Кузнечского б-на	ИСС	РОК II	1230	1330	1400	—	—	—	—	44,1	21,7	0,9	7,2	20,3	3,7	1,2	0,9	960	есть	
43	Углероды Кузнечского б-на	ИСС	РОК I	1220	1410	1460	—	—	—	—	56,0	26,6	1,1	7,2	4,9	1,3	1,8	1,1	1010	нет	
44	Углероды Кузнечского б-на	ИСС	РОК II	1230	1300	1370	—	—	—	—	48,8	25,1	1,2	5,7	14,4	2,0	1,6	1,0	970	есть	
45	Углероды Кузнечского б-на	Т	РОК I	1230	1410	>1500	—	—	1600	20	57,2	27,3	1,0	5,9	4,8	1,7	1,8	0,4	1020	нет	
46	Углероды Кузнечского б-на	Т	РОК II	1170	1310	1370	—	—	—	—	55,2	23,5	0,8	4,6	12,0	1,4	1,9	0,4	990	есть	
47	Тальский базальт	Г	РОК II	1160	1350	1410	—	—	—	—	56,7	22,9	1,2	5,2	9,7	2,2	1,7	0,4	990	нет	

Теоретический объем азота

Теоретический объем водяных паров

- Теоретический объем азота обусловлен азотом, входящим в топливо и азотом воздуха, м³/кг

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^r}{100}$$

где $0,8 = 1/\rho_{N_2}$

- Теоретический объем водяных паров, м³/кг

$$V_{H_2O}^0 = V_{H_2O}^H + V_{H_2O}^W + V_{H_2O}^B$$

где объем водяных паров при сжигании водорода, м³/кг

$$V_{H_2O}^H = 9H^r / 100\rho_{H_2O}^0 = 0,111H^r$$

объем водяных паров за счет испарения рабочей влаги, м³/кг

$$V_{H_2O}^W = W^r / 100\rho_{H_2O}^0 = 0,0124W^r$$

объем водяных паров с атмосферной влагой в теоретическом объеме, м³/кг

$$V_{H_2O}^B = V^0 \rho_B d / \rho_{H_2O}^0 = 0,0161V^0$$

где содержание влаги в воздухе $d = 0,01$ кг/кг

Действительные объемы продуктов сгорания

- Для осуществления полного сгорания в действительности в топку подают количество воздуха, большее теоретически необходимого. Коэффициент избытка воздуха в топке

$$\alpha_t = V_d / V^0$$

Эта величина обычно равна для твердых топлив – 1,2; для жидких и газообразных – 1,01...1,1

- Увеличение объема водяных паров, м³/кг

$$\Delta V_{H_2O} = 0,0161(\alpha - 1)V^0$$

и количество избыточного воздуха, м³/кг

$$\Delta V_v = (\alpha - 1)V^0$$

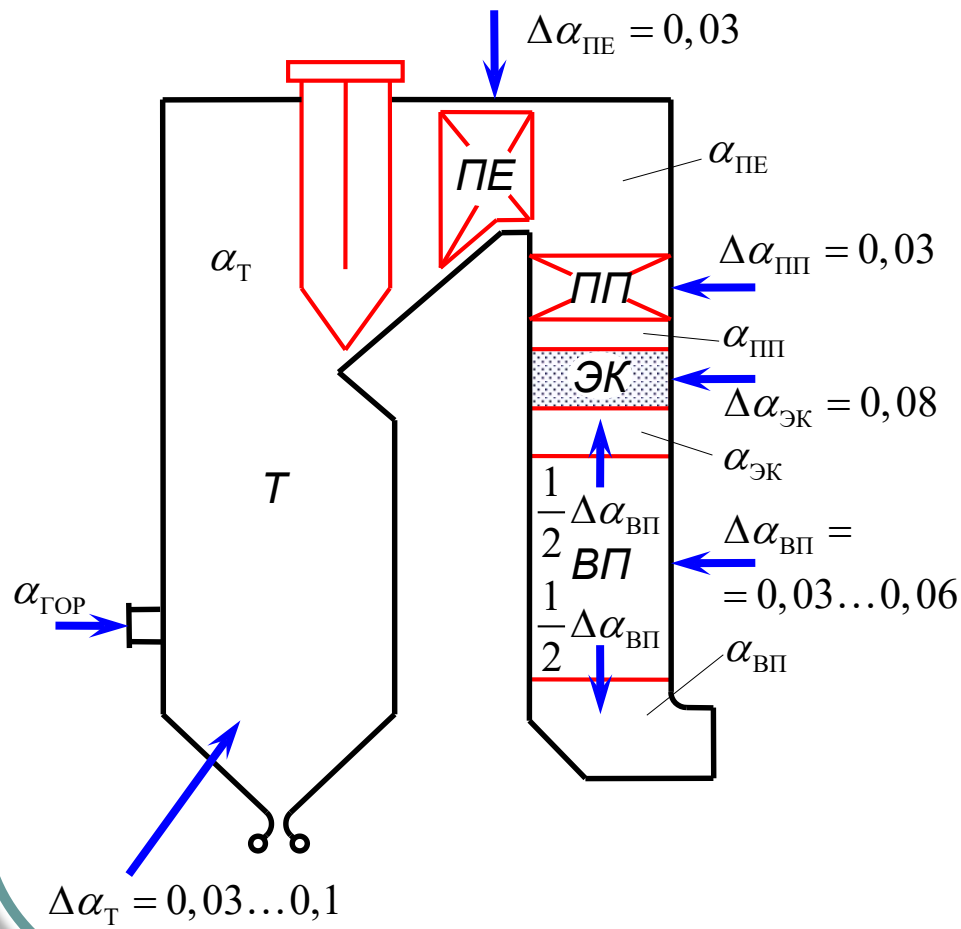
- Действительный объем продуктов сгорания, м³/кг

$$V_r = V_r^0 + 1,0161(\alpha - 1)V^0$$

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha - 1)V^0$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0$$

Присосы холодного воздуха в парогенераторах



- Коэффициент избытка воздуха за i -й по порядку поверхностью после топки

$$\alpha_i = \alpha_T + \sum_1^i \Delta\alpha_i$$

- При подаче воздуха через горелки учитывается присос в нижней части топки

$$\alpha_{ГОР} = \alpha_T - \Delta\alpha_T$$

Энтальпия продуктов сгорания и воздуха

- Теплота продуктов сгорания I , кДж/кг или кДж/м³, является суммой теплоты трехатомных газов, двухатомных и водяных паров. Для теоретического избытка воздуха и температуры это

$$I_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2} (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O} (c\vartheta)_{H_2O}$$

Теплоемкости принимаются по табличным данным в зависимости от температуры; с ростом температуры теплоемкость растет

- Энтальпия дымовых газов для действительных объемов воздуха равна

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) I_{\text{в}}^0$$

где энтальпия теоретического объема воздуха равна

$$I_{\text{в}}^0 = V^0 (c\vartheta)_{\text{в}}$$

- К энтальпии дымовых газов добавляется энтальпия золы

$$I_{\text{зл}}^0 = (c\vartheta)_{\text{зл}} \frac{A^{\text{p}}}{100} \alpha_{\text{ун}}$$

Тепловой баланс и КПД парового котла



Тепловой баланс и КПД парового котла

- Тепловой баланс парового котла заключается в установлении равенства между поступающим в котлоагрегат при сжигании топлива количеством теплоты, называемом располагаемой теплотой и суммой использованной теплоты и тепловых потерь. На основе теплового баланса находят КПД и расход топлива.

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

- Q_p^p – располагаемая теплота, кДж/кг;
- Q_1 – использованная теплота, кДж/кг;
- Q_2 – потери теплоты с уходящими газами, кДж/кг;
- Q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, кДж/кг;
- Q_4 – потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива, кДж/кг;
- Q_5 – потери теплоты в окружающую среду, кДж/кг;
- Q_6 – потери с физическим теплом шлака, кДж/кг.

Тепловой баланс и КПД парового котла

- Обычно в расчетах используется уравнение теплового баланса, выраженное в процентах по отношению к располагаемой теплоте, принимаемой за 100%

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

где $q_i = Q_i \cdot 100 / Q_p^p$

- Располагаемое тепло топлива в большинстве случаев принимается равным теплоте его сгорания, кДж/кг

$$Q_p^p = Q_i^r$$

В ряде случаев дополнительно учитываются и другие источники тепла

$$Q_p^p = Q_i^r + Q_{ф.т.} + Q_{в.вн} + Q_{ф} - Q_{карб}$$

- $Q_{ф.т.}$ – физическая теплота топлива, кДж/кг;
 $Q_{в.вн}$ – тепло воздуха, при подогреве вне котла, кДж/кг;
 $Q_{ф}$ – теплота, вносимая при паровом распыле мазута, кДж/кг;
 $Q_{карб}$ – тепло, необходимое для разложения карбонатов, кДж/кг.

Тепловой баланс и КПД парового котла

- Полезно использованное в парогенераторе тепло, кДж/кг

$$Q_1 = \frac{D_0}{B}(h_{\text{п.п.}} - h_{\text{п.в.}}) + \frac{D_{\text{пром}}}{B}(h_{\text{пром}}^{\text{вых}} - h_{\text{пром}}^{\text{вх}}) + \frac{D_{\text{пр}}}{B}(h' - h_{\text{п.в.}})$$

$D_0, D_{\text{пром}}, D_{\text{пр}}, \text{ кг/с}$ – расход перегретого пара, расход пара промперегрева и расход котловой воды на продувку котла

$B, \text{ кг/с} \left(\text{м}^3/\text{с} \right)$ – расход топлива

$h_{\text{п.п.}}, h_{\text{п.в.}}, h_{\text{пром}}^{\text{вых}},$

$h_{\text{пром}}^{\text{вх}}, h', \text{ кДж/кг}$ – энтальпия перегретого пара, питательной воды, пара на выходе и на входе в промежуточный пароперегреватель, воды на линии насыщения

Тепловые потери парового котла

- Потеря тепла с уходящими газами

$$Q_2 = (I_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} I_{\text{х.в.}}^0) \frac{100 - q_4}{100}$$

I_{yx} – энтальпия уходящих газов при температуре уходящих газов и избытке воздуха в уходящих газах, кДж/кг;

$I_{\text{х.в.}}^0$ – энтальпия холодного воздуха, при температуре холодного воздуха и избытке воздуха в уходящих газах, кДж/кг;

$(100 - q_4)$ – доля сгоревшего топлива

- Химический недожог

$$Q_3 = (126,4CO + 108H_2 + 358,2CH_4) V_{\text{с.г.}} (100 - q_4)$$

CO, H_2, CH_4 – объемное содержание продуктов неполного сгорания по отношению к сухим газам, %

Тепловые потери парового котла

- Механический недожог

$$Q_4 = \left(\alpha_{\text{шл+пр}} \frac{\Gamma_{\text{шл+пр}}}{100 - \Gamma_{\text{шл+пр}}} + \alpha_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) 32,7 A^r$$

$\Gamma_{\text{шл+пр}}, \Gamma_{\text{ун}}$ – содержание горючих в шлаке, провале и уносе, %;

$\alpha_{\text{шл+пр}}, \alpha_{\text{ун}}$ – доля золы в шлаке, провале и уносе;

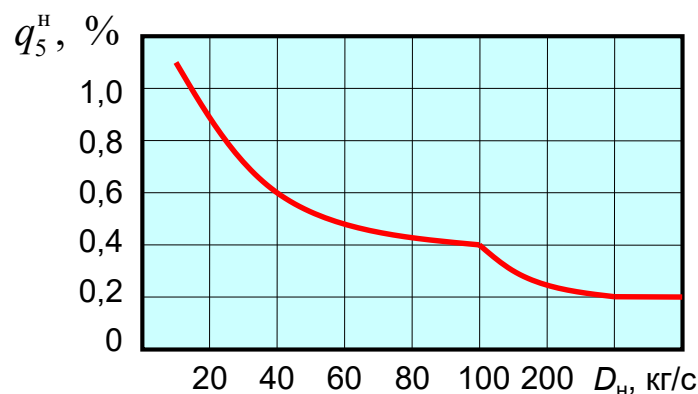
32,7 – теплота сгорания в шлаке, провале и уносе, МДж/кг.

- Потери теплоты в окружающую среду

Зависят от площади поверхности котла и разности температур

При производительности, отличной от номинальной

$$q_5 / q_5^H \approx D_H / D$$



Тепловые потери парового котла

- Потери с физическим теплом шлаков

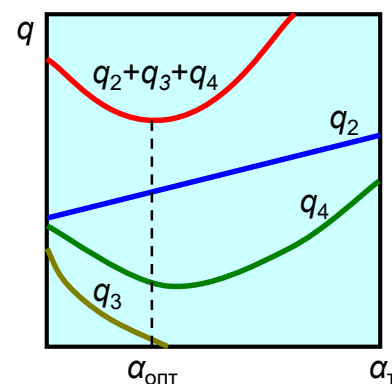
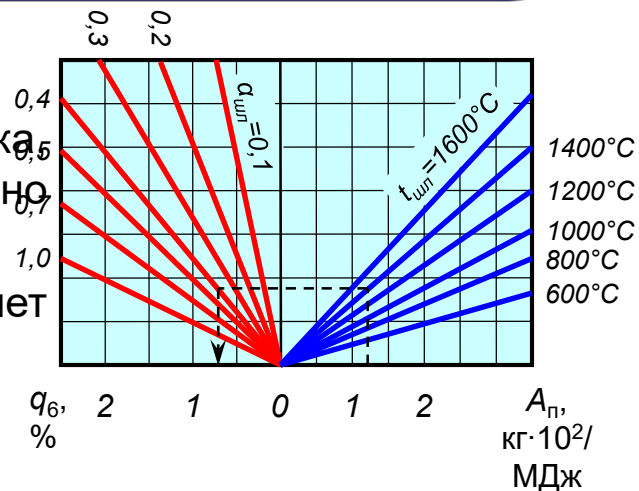
Происходят за счет удаления из топки шлака температура которого может быть достаточно высокой.

Для твердого шлакоудаления она составляет 600...700°C, а с жидким – $(t_c + 100)^\circ\text{C}$

$$Q_6 = 0,01\alpha_{\text{шл}} \frac{A^r}{100} (ct)_{\text{шл}}$$

$(ct)_{\text{шл}}$ – температура и теплоемкость шлака, кДж/кг

- Основными потерями являются q_2 , q_3 , q_4 . Суммирование этих потерь при различных значениях α_T позволяет найти оптимальное значение α_T



Потери тепла в парогенераторах

Наименование потери	Абсолютная потеря, кДж/кг	Относи- тельная потеря, %	Величина потери $q_i, \%$
С уходящими газами	Q_2	q_2	4...7
С химическим недожогом топлива	Q_3	q_3	0...1,5
С механическим недожогом топлива	Q_4	q_4	
От наружного охлаждения через обмуровку котлоагрегата	Q_5	q_5	0,5...5
С физическим теплом шлаков, удаляемых из топки <ul style="list-style-type: none"> • при твердом шлакоудалении • при жидком шлакоудалении 	Q_6	q_6	0,3...1 0...2
Сумма тепловых потерь	$\sum Q_i$	$\sum q_i$	6...12

Коэффициент полезного действия и расход топлива

- Совершенство тепловой работы парового котла оценивается коэффициентом полезного действия брутто. По прямому балансу

$$\eta_{\kappa}^{\text{бp}} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_p^p} 100\% = \frac{Q_{\kappa}}{Q_p^p B}$$

Q_{κ} – теплота, полезно отданная котлу, кДж/с

$$Q_{\kappa} = D_0 (h_{\text{п.п.}} - h_{\text{п.в.}}) + D_{\text{пром}} (h_{\text{пром}}^{\text{вых}} - h_{\text{пром}}^{\text{вх}}) + D_{\text{пр}} (h' - h_{\text{п.в.}})$$

- КПД котла можно рассчитать и по обратному балансу

$$\eta_{\kappa}^{\text{бp}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

- Расход топлива, подаваемого в топку котла, кг/с

$$B = \frac{Q_{\kappa} 100}{Q_p^p \eta_{\kappa}^{\text{бp}}}$$

- Расчетный расход топлива (с учетом механического недожога), кг/с

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