



Кафедра ЮНЕСКО “Энергосбережение и возобновляемые источники энергии”

Топливо и его использование

*Лекция 2. Состав и характеристики
топлива*

Состав твердого топлива

Рабочая масса топлива – это его состав при подаче в топочное устройство для сжигания.

Технический состав рабочей массы топлива – информация о содержании влаги W^p , зольности (минеральной части) A^p , а также летучих веществ V^p , и связанного (твёрдого) углерода $C_{св}^p$, на которые распадается горючая часть топлива при нагревании

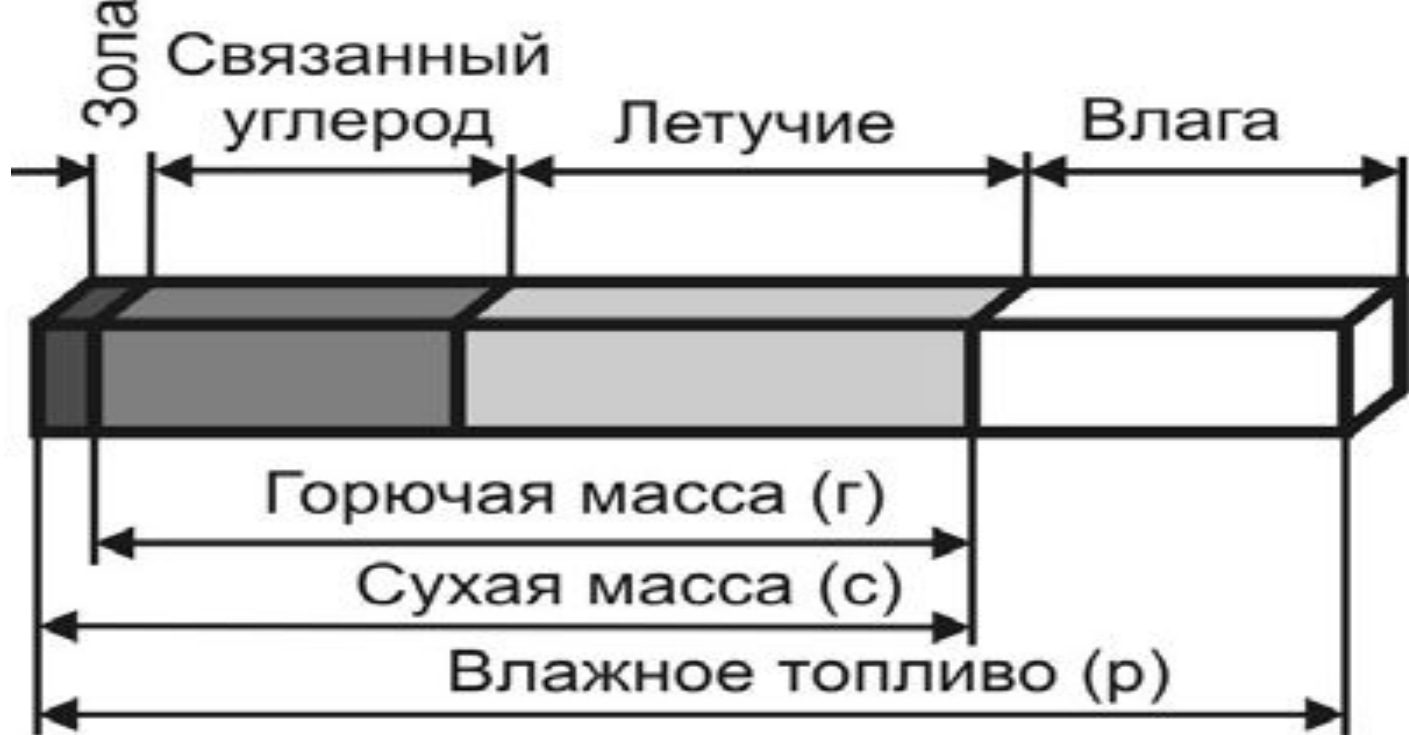
$$W^p + A^p + V^p + C_{св}^p = 100 \text{ масс. \%}$$

Элементарный состав рабочей массы топлива

$$W^p + A^p + C^p + H^p + O^p + S^p + N^p = 100 \text{ масс. \%};$$

Состав соединений, входящих в **минеральную часть** (**зольность**) топлива, который определяет ее плавкость и влияет на надежность работы топочного устройства, изменяется в процессе сжигания и превращается в **золу**

Технический состав топлива



Рабочая масса состоит из горючей массы и балласта.

Горючая масса включает

- горючие элементы (углерод C , водород H и летучую серу $S_{л} = S_{ор+к}$, часть $S_{ор}$ которой входит в состав органических веществ, а часть $S_{к}$ – минеральных)
- негорючие (органический балласт – кислород O и азот N).

Балласт – Влага W^p и зольность A^p

Топливо

Горючая часть

Органическая
часть
 C, H, O, N, S_{op}

S_k в
составе
пирита
 FeS_2

Балласт

Влага
 H_2O

Минераль-
ная
часть
(зола):
 SiO_2
 Al_2O_3
 $CaCO_3 \dots$

Органическая и горючая части топлива

- Основу **органической части (массы)** топлива составляют углерод **C**, водород **H** и кислород **O**
- Кроме того, органическая масса топлива в небольших количествах содержит **органическую серу $S_{ор}$** и азот **N**
- В минеральную часть топлива входит **колчеданная сера S_k** (в составе железного колчедана или пирита FeS_2), которая также принимает участие в процессе горения.
- Вещества **C, H, O, $S_{ор+k}$, N** составляют **горючую массу** топлива. Различие между органической и горючей частями большинства топлив обычно мало (**S_k**).
- Суммарное количество органической и колчеданной серы иногда называется **летучей серой**: **$S_l = S_{ор+k}$** .

Горючая масса \approx Органическая масса

| | |
|--|--|
| Горючая масса | |
| $C^{\Gamma} + H^{\Gamma} + O^{\Gamma} + N^{\Gamma} + S_{\text{ор+к}}^{\Gamma} = 100\%$ | |
| Органическая масса | |
| $C^{\circ} + H^{\circ} + O^{\circ} + N^{\circ} + S_{\text{ор}}^{\circ} = 100\%$ | |

Горючая масса содержит часть минеральной массы – **колчеданную серу**, входящую в неорганическое соединение **железный колчедан (пирит) FeS_2**

- Основным элементом горючей части всех топлив является **углерод C**, горение которого обуславливает выделение основного количества тепла (в древесине $C^r \approx 50$ масс.%).
- Однако чем больше углерода в топливе, тем труднее оно воспламеняется (ниже реакционная способность); **антрацит** – самый **калорийный**, но и самый **низкорреакционный** уголь.
- Содержание **водорода H** в горючей массе твердых и жидких топлив колеблется от 2 до 10 % масс. Больше – в **мазуте** и **горючих сланцах**, особенно много в **природном газе**, меньше всего в **антраците**. При сгорании водород выделяет на единицу веса примерно в 4,4 раза больше тепла, чем углерод.

Рабочая, сухая и горючая массы топлива

- Рабочая масса (*as fired, as delivered*)

- $C^p + H^p + O^p + N^p + S_{\text{ор+к}}^p + A^p + W^p = 100\%$

- Сухая масса (*dry basis, d.b.*)

- $C^c + H^c + O^c + N^c + S_{\text{ор+к}}^c + A^c = 100\%$

- Горючая масса (*dry ash-free basis, d.a.f.*)

- $C^g + H^g + O^g + N^g + S_{\text{ор+к}}^g = 100\%$

- Органическая масса (\approx горючей массе)

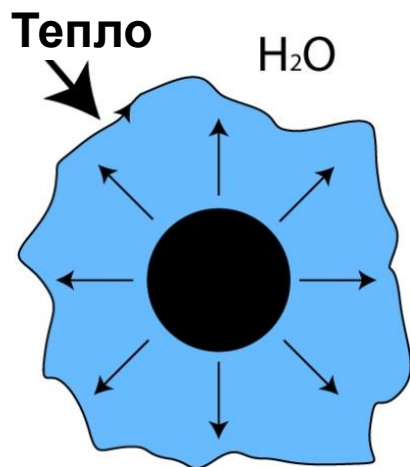
- $C^o + H^o + O^o + N^o + S_{\text{ор}}^o = 100\%$

Летучие вещества и связанный углерод (коксовый остаток)

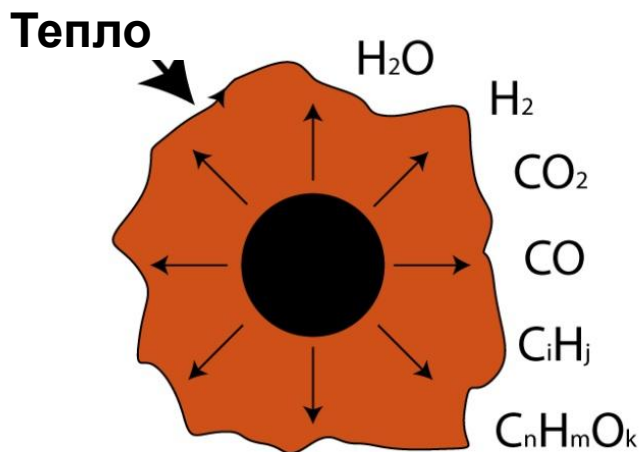
- Одной из основных особенностей поведения *твердых топлив* при нагревании является *термическое разложение* их органической массы на газообразные **летучие вещества** и **твердый коксовый остаток** (связанный углерод $C_{св}$, зола, следы O и H).
- Летучие продукты состоят из **неконденсирующихся газов** (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , включая пиролитическую влагу H_2O) и **конденсирующихся** высокомолекулярных **смол** ($C_xH_yO_z$)
- Чем меньше степень углефикации топлива, тем больше оно содержит термически неустойчивых соединений и тем больше выделяет летучих:
биомасса > гор.сланцы > торф > б.угли > к.угли > антрацит
- Выше выход летучих – выше реакционная способность, ниже теплотворная способность.

Стадии термохимической конверсии частицы твердого топлива

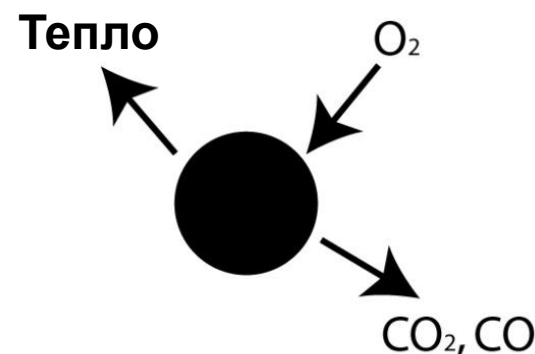
Нагревание и сушка



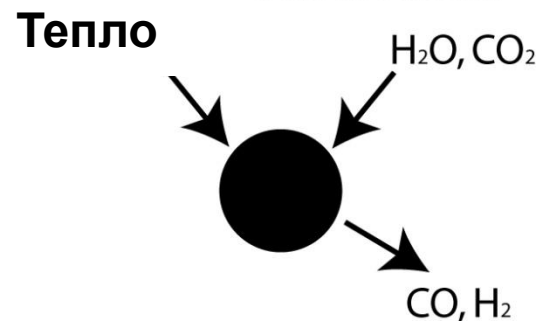
Выход летучих
(пиролиз)



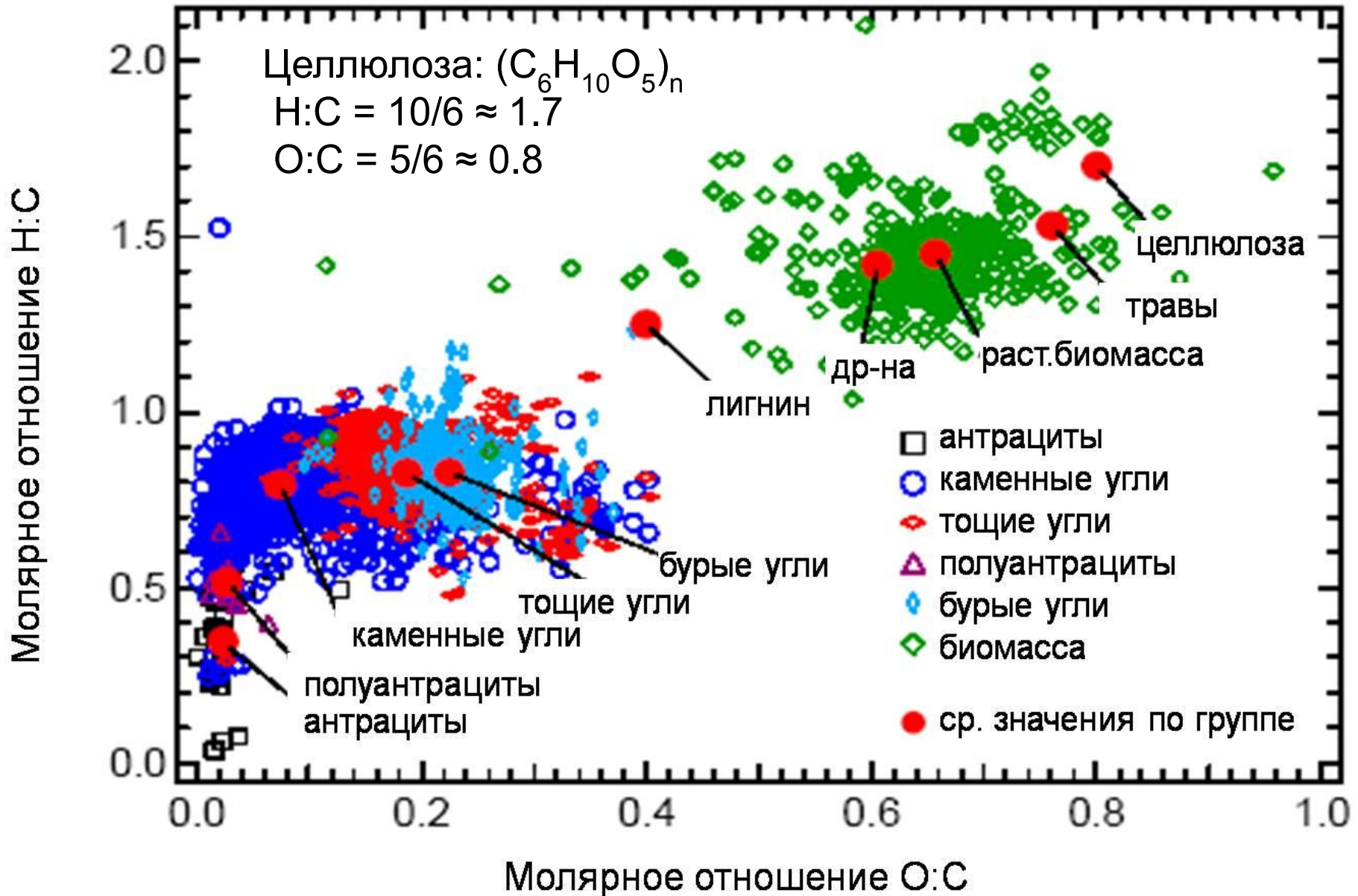
Горение кокса



Газификация кокса



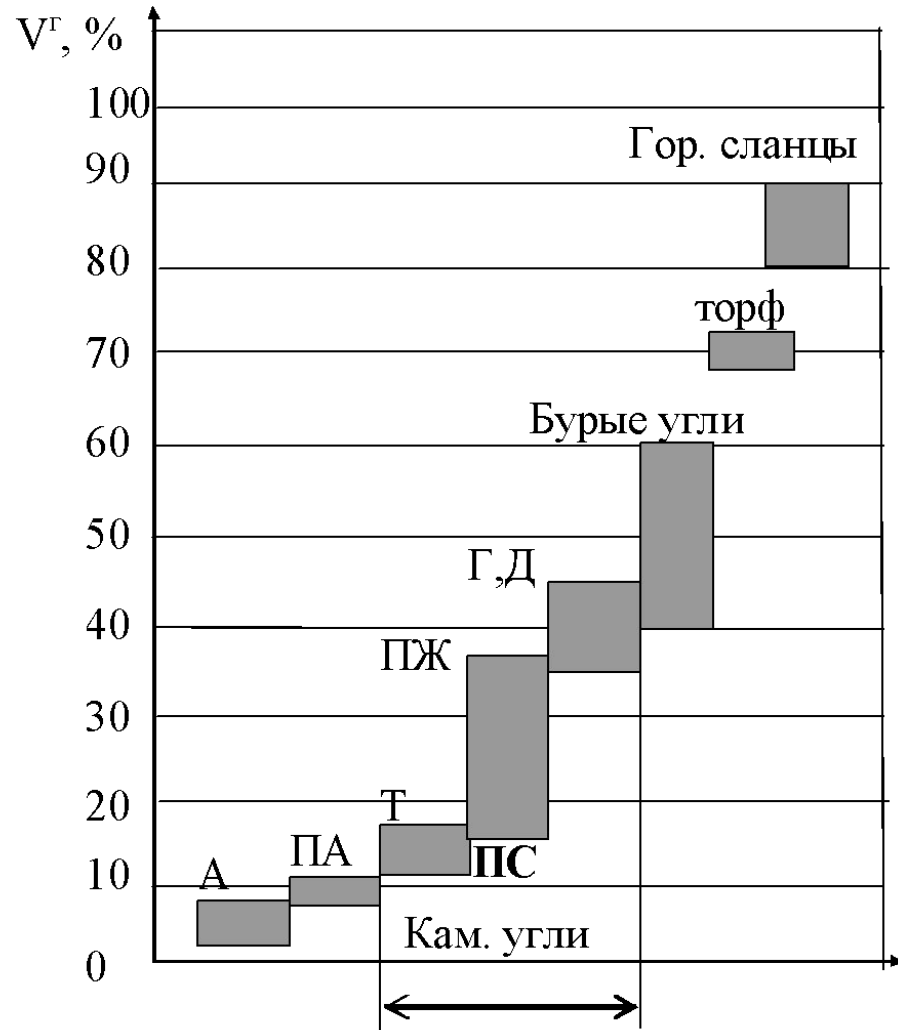
Состав горючей массы твердых топлив – диаграмма ван Кревелена



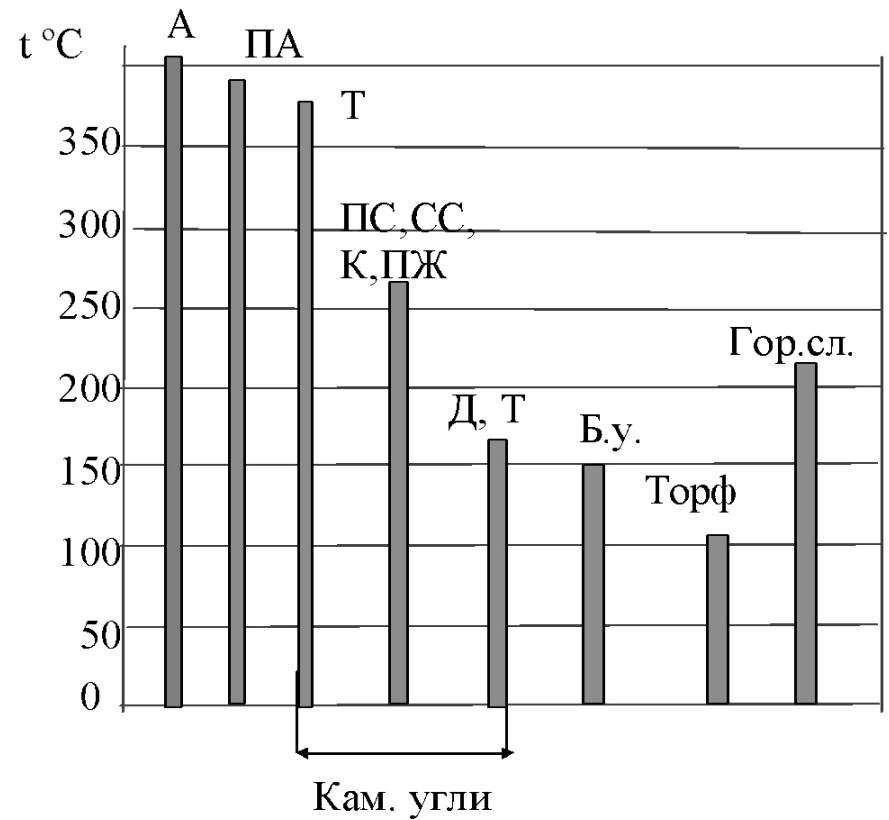
Состав и продукты термического разложения топлива

| | | | |
|---|-------------------|-------|----|
| Рабочая масса топлива ^(p) | | | |
| Сухая масса ^(c) | | ВЛАГА | |
| Органическая масса ^(o) | Зола | | |
| Горючая масса ^(г) | | | Ск |
| Летучие | Связанный углерод | | |
| Газы (CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , пиролитическая H ₂ O) + смолы (C _x P _y O _z) | Коксовый остаток | | |

Выход летучих веществ



Температура начала выхода летучих



Органический балласт топлива

- Кислород **O** и азот **N** в топливе являются **органическим балластом**: наличие их в топливе уменьшает содержание горючих элементов - углерода и водорода.
- Особенно велико содержание **кислорода** в древесине ($O^r = 42\%$) и торфе.
- **Топливный азот N** является основным источником токсичных оксидов **NO_x** при сжигании биомассы и низкотемпературном сжигании ископаемого топлива, т.е. он может частично или полностью окисляться и в принципе должен относиться **горючим элементом**.
- При оценке экологических аспектов процесса горения образование **NO_x** является одной из основных задач.
- Однако при расчетах теплового и материального балансов котла горением азота пренебрегают в связи с его малым содержанием, а также малыми объемами **NO_x**.

Сера

- В *твердых топливах* обычно немного, но в некоторых бурых и каменных углях доходит до 7-8% на горючую массу топлива.
- В *нефти* входит в состав органических соединений; при переработке большая часть переходит в мазут (0,3-3,5%).
- В *природных газах* практически отсутствует, в *попутных газах* некоторых нефтяных месторождений содержится немного серы в виде сероводорода H_2S и сернистого газа SO_2 .
- При горении серы тепла выделяется примерно в 3.5 раза меньше, чем при горении углерода.
- Коррозия низкотемпературных поверхностей нагрева из-за серного ангидрида SO_3 , который сильно повышает температуру конденсации водяных паров (точку росы) в продуктах сгорания топлива.
- Присутствие сернистого газа SO_2 в продуктах сгорания топлива, выбрасываемых в атмосферу через дымовую трубу, приводит к загрязнению окружающего воздуха (яд; кислотные дожди).

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

- $C + O_2 = CO_2$ полное сгорание углерода
- $2C + O_2 = 2CO$ неполное сгорание углерода
- $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ горение водорода
- $S + O_2 = SO_2$ горение *органической* серы
- $2FeS_2 + 5.5 O_2 = Fe_2O_3 + 4 SO_2$ горение *колчеданной* серы

Элементарный состав горючей массы гумолитов по стадиям углефикации

| Топливо | Состав горючей массы, % | | | |
|----------------|-------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| | C ^г | H ^г | O ^г | N ^г +S ^г |
| Торф | 60-65 | 5-6 | 33-38 | 0.5-1.5 |
| Бурый уголь | 64-78 | 5-6 | 15-25 | 0.5-1.5 |
| Каменный уголь | 75-90 | 5-6 | 4-15 | 0.5-1.5 |
| Антрацит | 94-97 | 1-2 | 2-4 | 0.5-1.5 |

Элементарный состав некоторых углей

| Уголь | Марка | Класс | W ^p % | A ^p % | S ^p % | C ^p % | H ^p % | N ^p % | O ^p % | Q _H ^p МДж |
|-----------|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| Донецкий | Д | Р | 13,0 | 24,4 | 3,1 | 47,0 | 3,4 | 1,0 | 8,1 | 18,5 |
| " | Г | Р | 8,0 | 23,0 | 3,2 | 55,2 | 3,8 | 1,0 | 5,8 | 20,5 |
| " | Т | Р | 5,0 | 23,8 | 2,8 | 62,7 | 3,1 | 0,9 | 1,7 | 23,4 |
| Кузнецкий | Д | Р, СШ | 12,0 | 13,2 | 0,3 | 58,7 | 4,2 | 1,9 | 9,7 | 22,9 |

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|----------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Подмос- ковный бурый | Б | Р, О,М, С,Ш | 32,0 | 28,6 | 2,7 | 26,0 | 2,1 | 0,4 | 8,2 | 9,3 |
|----------------------------|---|----------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|

Маркировка каменных углей

| Марка угля | Обозначение | Выход летучих веществ на горючую массу, V^r , % | Марка угля | Обозначение | Выход летучих веществ на горючую массу, V^r , % |
|-----------------|-------------|---|-----------------------|-------------|---|
| Длиннопламенный | Д | >35 | Коксовый второй | К2 | 17—25 |
| Газовый | Г | >35 | Слабоспекающийся | СС | 25—37 |
| Газовый жирный | ГЖ | 27—37 | Отощенный спекающийся | ОС | 14—22 |
| Жирный | Ж | 27—37 | Тощий | Т | 8—17 |
| Коксовый жирный | КЖ | 25—31 | | | |
| Коксовый | К | 18—27 | | | |

Таблица 1.2. Классификация углей по размеру кусков (ГОСТ 19242-73)

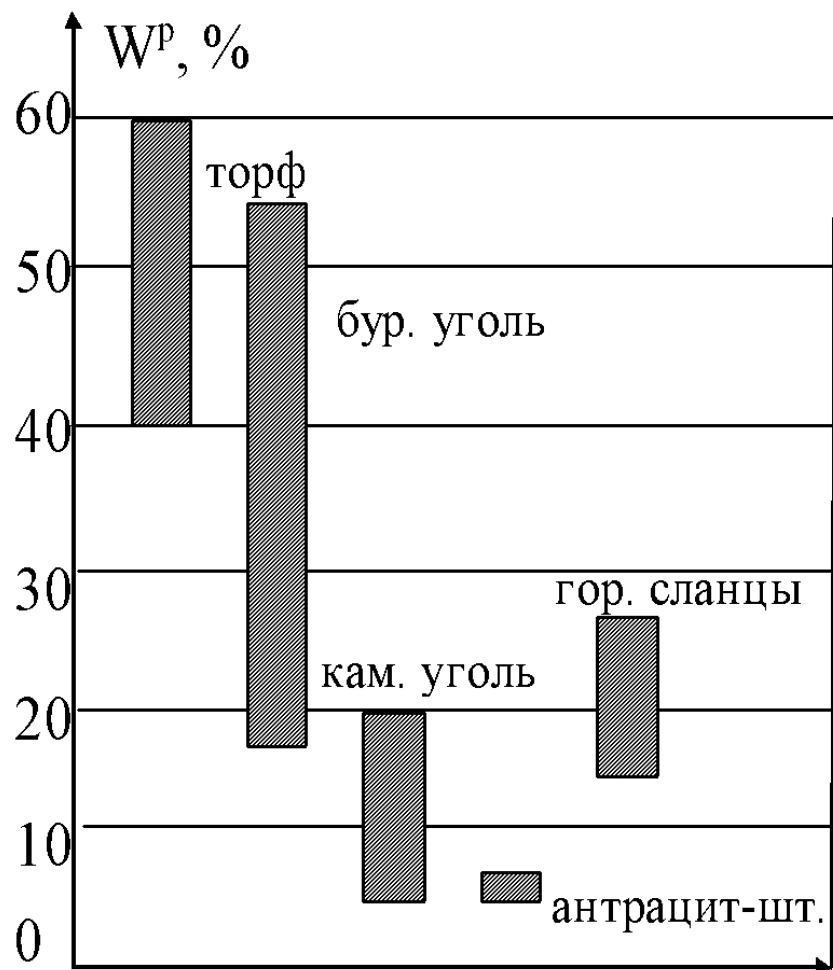
| Класс | Условное обозначение | Размер кусков, мм |
|---------|----------------------|-------------------|
| Плитный | П | Более 100 |
| Крупный | К | 50—100 |
| Орех | О | 25—50 |
| Мелкий | М | 13—25 |
| Семечко | С | 6—13 |
| Штыб | Ш | Менее 6 |
| Рядовой | Р | 0—200 |

Состав альтернативных местных топлив

| | Древ. гранулы | Гранулы ТБО | Древесина | | Гидрол. лигнин | Торф | Горючие сланцы |
|------------------------|------------------|----------------|-----------|--------|-------------------|-------|-------------------|
| | | | сосна | береза | | | |
| W^p , | 8,0 | 4,1 | 40 | 40 | 60 | 40 | 8,9 |
| V^c , % | 78,4 | 72,5 | 87,6 | 90,4 | 68,9 | 62,3 | 24,7 |
| C_{fix}^c , % | 20,8 | 13,2 | 12,3 | 9,4 | 27,8 | 26,7 | 5,3 |
| A^c , % | 0,8 | 14,3 | 0,1 | 0,2 | 3,3 | 11 | 70 |
| C^r , % | 51,7 | 56,0 | 46,9 | 47,1 | 62,7 | 57,9 | 48,0 |
| H^r , % | 6,3 | 8,1 | 6,3 | 6,2 | 5,7 | 6,0 | 6,0 |
| N^r , % | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 1,9 | 2,5 | 0,3 |
| S^r , % | <0,01 | | 0,03 | 0,01 | 0,8 | 0,3 | 8,0 |
| O^r , % | 41,9 | 35,7 | 46,7 | 46,6 | 28,9 | 33,4 | 37,7 |
| Q_n^c , МДж/кг | 19,00 | 17,44 | 19,0 | 19,1 | 23,40 | 19,70 | 5,70 |

Влажность твердых топлив

Влажность W^p – масса влаги, отнесенная к рабочей (влажной) массе топлива:



$$W = \frac{m_{H_2O}}{m_{раб}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{сух} + m_{H_2O}}$$

Влагосодержание M – масса влаги, отнесенная к сухой массе топлива:

$$M = \frac{m_{H_2O}}{m_{сух}} = \frac{W}{1 - W}$$

$$W = \frac{M}{1 + M}$$

Внешняя (поверхностная и капиллярная) влага удаляется путем сушки топлива при комнатной температуре.

Внутренняя (гигроскопическая или коллоидная и гидратная) влага удаляется сушкой при 102-105 °С.

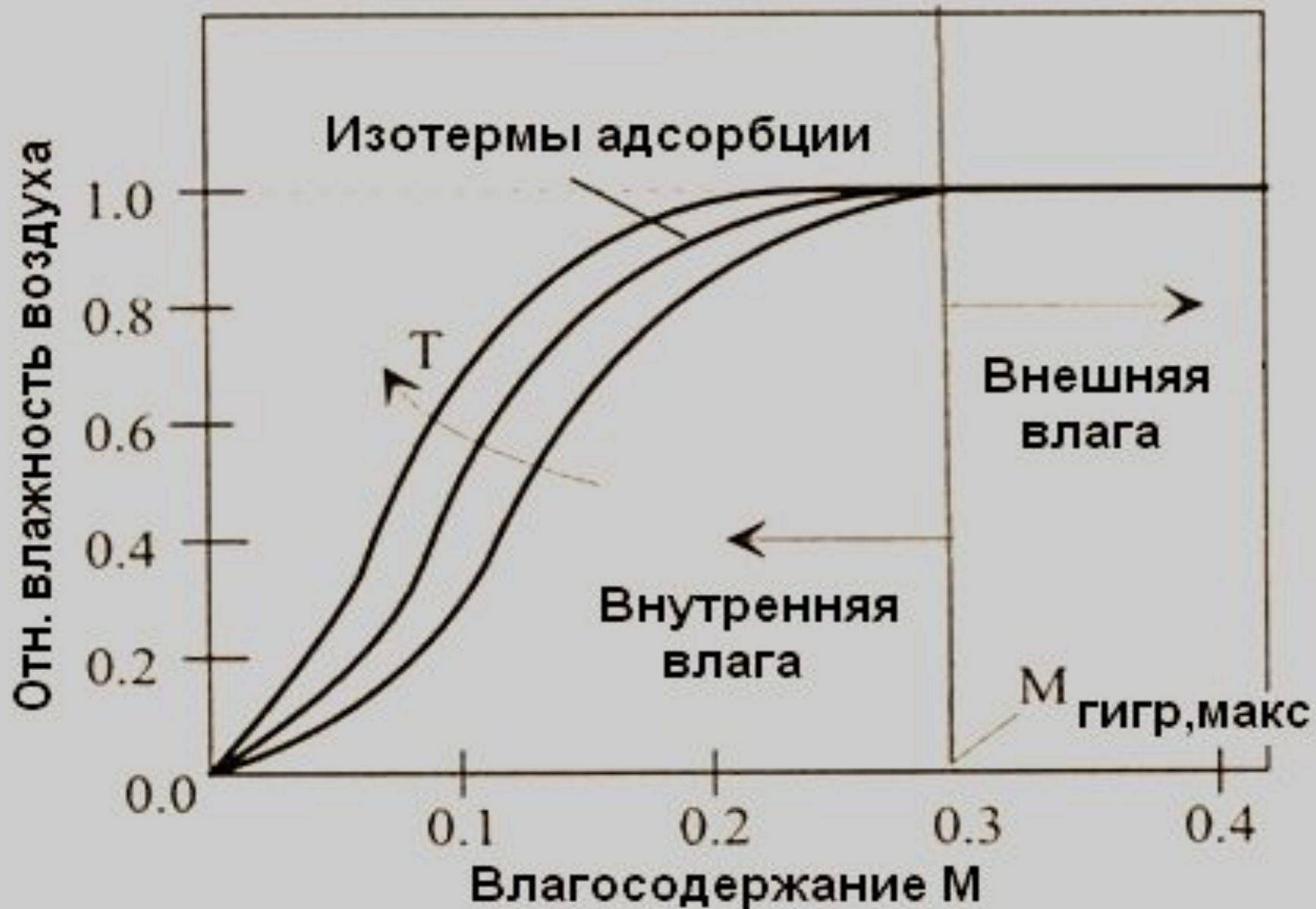
Рабочая масса

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{ор+к}^p + A^p + W_{вне+вну}^p = 100\%$$

**Аналитическая масса—
без внешней, но с внутренней влагой**

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S_{ор+к}^a + A^a + W_{вну}^a = 100\%$$

ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ВЛАГА



Пересчет состава топлива на другую массу

При проектировании и эксплуатации котельных установок часто приходится производить пересчеты состава топлива.

Причина: влажность W^p и зольность A^p могут колебаться в широких пределах, в то время как состав горючей (\approx органической) массы гораздо более стабилен.

Это позволяет легко пересчитывать рабочий состав топлива *на другие влажность и (или) зольность*, не производя полного элементарного анализа топлива.

Рабочая масса

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{\text{ор+к}}^p + A^p + W^p = 100\%$$

Сухая масса

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S_{\text{ор+к}}^c + A^c = 100\%$$

Горючая масса

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_{\text{ор+к}}^r = 100\%$$

Рабочая = 100%

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C^p | H^p | O^p | N^p | S^p | A^p | W^p |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C^p | H^p | O^p | N^p | S^p | A^p |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Сухая = 100%

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C^c | H^c | O^c | N^c | S^c | A^c |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

$$C^c = \frac{C^p}{\left(1 - \frac{W^p}{100}\right)} = \frac{C^p}{(1 - w^p)}$$

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| C^p | H^p | O^p | N^p | S^p |
|-------|-------|-------|-------|-------|

Горючая = 100%

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| C^r | H^r | O^r | N^r | S^r |
|-------|-------|-------|-------|-------|

$$C^r = \frac{C^p}{\left(1 - \frac{W^p}{100} - \frac{A^p}{100}\right)} = \frac{C^p}{(1 - w^p - a^p)}$$

Примеры пересчета

$$H^p = H \cdot \frac{100}{100 - W^p} = \frac{H^p}{\frac{100 - W^p}{100}} = \frac{H^p}{1 - \frac{W^p}{100}} = \frac{H^p}{1 - w^p}$$

$$H^\Gamma = H^p \cdot \frac{100}{100 - (A^p + W^p)} = \frac{H^p}{\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}} = \frac{H^p}{1 - \frac{A^p}{100} - \frac{W^p}{100}} = \frac{H^p}{1 - a^p - w^p}$$

Коэффициенты пересчета

($a^p = A^p/100$, $w^p = W^p/100$ – в массовых долях!!!)

| Заданная масса топлива | Коэффициенты пересчета на массу | | |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| | р абочую | г орючую | с ухую |
| р абочая | 1 | $\frac{1}{1 - (a^p + w^p)}$ | $\frac{1}{1 - w^p}$ |
| г орючая (орг.) | $1 - (a^p + w^p)$ | 1 | $1 - a^c$ |
| с ухая | $1 - w^p$ | $\frac{1}{1 - a^c}$ | 1 |

Горючие сланцы: особенности пересчёта

$$C^{\Gamma} = C^P \frac{100}{100 - A_u^P - W^P - (CO_2)_K^P}$$

$$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - A_u^P - W^P - (CO_2)_K^P}{100}$$

$(CO_2)_K^P$ — известное содержание углекислоты карбонатов, %, которые разлагаются при $t = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Истинная зольность рабочей массы:

$$A_{\text{поб}}^P = A_{\text{сульф}}^{pc} \left[2,5 \left(S - \frac{c}{k} S \right) + 0,375 S \right] \frac{100 - W^P}{100}$$

$$\approx \text{Аstownские ленинградские} \frac{100 - W^P}{100},$$

$$\approx \text{Аstownские} \frac{100 - W^P}{100} -$$

Зольность твердых топлив

Золой топлива называется остаток при прокаливании топлива при 800 °С. Вес остатка принимается за **содержание золы (зольность)** в пробе исследуемого топлива.

Зольность топлива следует отличать от его **минеральной части**, которая превращается в золу при прокаливании.

- Часть исходных минеральных примесей при прокаливании остаётся неизменной;
- Другая часть распадается и улетучивается;
- Третья – "набирает вес" за счёт окисления.

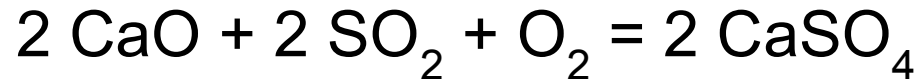
Трансформации минеральной части

- Потери кристаллизационной влаги гипсом ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), силикатами ($\text{MeSiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$);
- Разложение карбонатов с выделением углекислоты



(содержание карбонатной CO_2 в гор.сланцах – до 20 %);

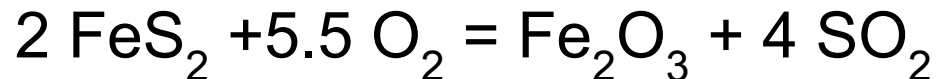
- Реакции связывания серы



$$2(40+16) + 2(32+2 \cdot 16) + 2 \cdot 16 = 2(40+32+4 \cdot 16)$$

$$112 \text{ кг} \quad \rightarrow \quad 272 \text{ кг}$$

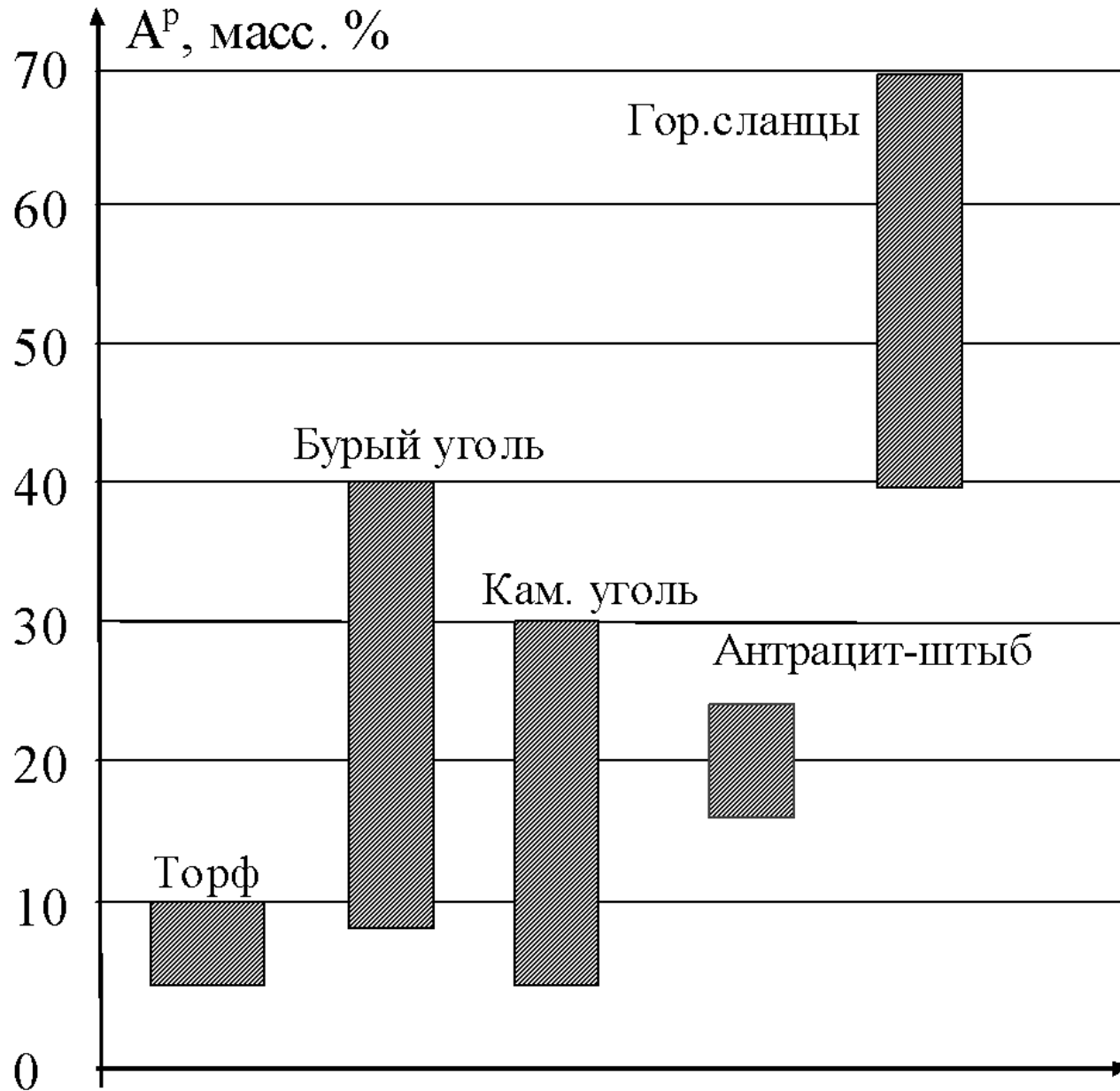
- Горение железного колчедана (пирита)



$$2(56+2 \cdot 32) + 5.5 \cdot 2 \cdot 16 = (2 \cdot 56+3 \cdot 16) + 4 \cdot (32+2 \cdot 16)$$

$$112 \text{ кг железа} \quad \rightarrow \quad 160 \text{ кг}$$

Зольность твердых топлив



Компоненты золы

Тугоплавкие (1600 – 2800 °С)

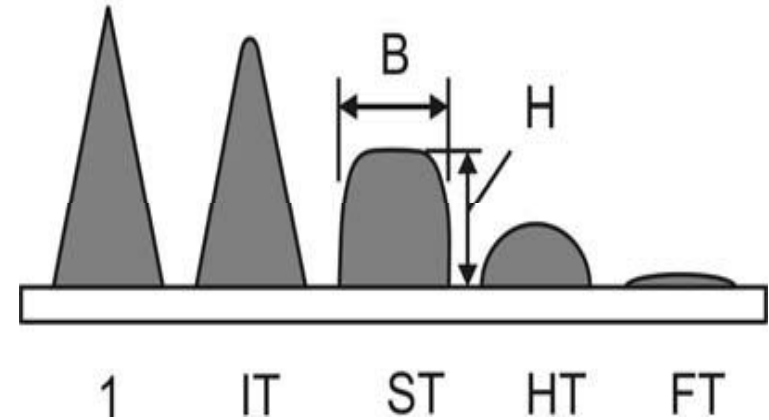
- Диоксид кремния (кремнекислота) SiO_2
- Глинозём Al_2O_3
- Оксиды кальция CaO (известь) и магния MgO (магнезия)

Легкоплавкие (800 – 1000 °С)

- Оксиды железа FeO и Fe_2O_3
- Оксиды щелочных металлов Na_2O , R_2O

При определённых соотношениях некоторые компоненты могут образовывать **легкоплавкие эвтектики** – соединения, температура плавления которых ниже, чем входящих в них компонентов.

Плавокость золы древесного топлива



1. Исходный образец (конус)
2. Начало деформации
3. Температура размягчения
4. Точка начала плавления
5. Точка растекания

$$T_1 (\text{IT}) = 1150 - 1490^\circ\text{C};$$

$$T_2 (\text{ST}) = 1180 - 1525^\circ\text{C};$$

$$T_3 (\text{HT}) = 1230 - 1650^\circ\text{C};$$

$$T_4 (\text{FT}) = 1250 - 1650^\circ\text{C}.$$

IT – Initial deformation **T**emperature;

ST – Softening **T**emperature;

HT – Hemisphere **T**emperature;

FT – Fluid **T**emperature.

Плавкостные характеристики древесной золы

| Топливо | Плавкостные характеристики, °С | | | |
|---------------------|--------------------------------|------|------|------|
| | IT | ST | HT | FT |
| Щепа в целом, сосна | 1210 | 1225 | 1250 | 1275 |
| Щепа отходов рубки | 1175 | 1205 | 1230 | 1250 |
| Опилки, сосна | 1150 | 1180 | 1200 | 1225 |
| Кора, ель | 1405 | 1550 | 1650 | 1650 |
| Кора, сосна | 1340 | 1525 | 1650 | 1650 |

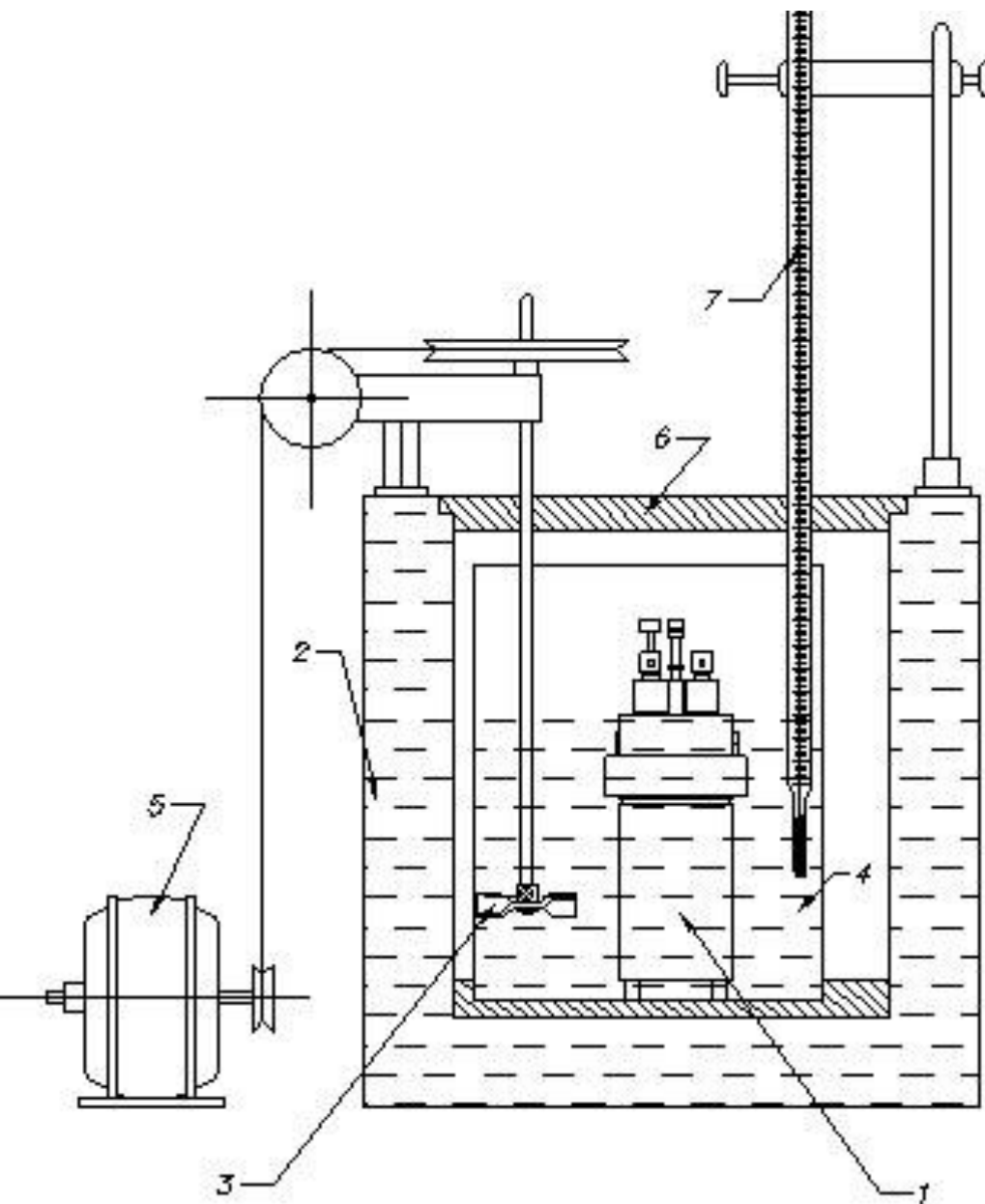
Теплота сгорания (теплотворная способность) топлива

Высшая теплота сгорания количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг **твердого и жидкого** топлива (кДж/кг) или 1 м³ **газообразного** топлива (кДж/м³) **и охлаждению** образовавшихся *продуктов сгорания* до **25°C**, т. е. **с конденсацией** содержащихся в них паров воды и выделением **скрытой теплоты конденсации**

$$r = 2,44 \text{ МДж/кг.}$$

Q_e^p определяется экспериментально в т.н. **калориметрической бомбе** с введением расчетных поправок на образование и растворение в воде серной и азотной кислот.

Измерение (высшей) теплоты сгорания топлива по бомбе



- 1 – калориметрическая бомба с навеской топлива, заполненная кислородом под давлением;
- 2 – сосуд цилиндрический, заполненный водой;
- 3 – мешалка;
- 4 – сосуд латунный с водой;
- 5 – электродвигатель;
- 6 – крышка;
- 7 – термометр ртутный.

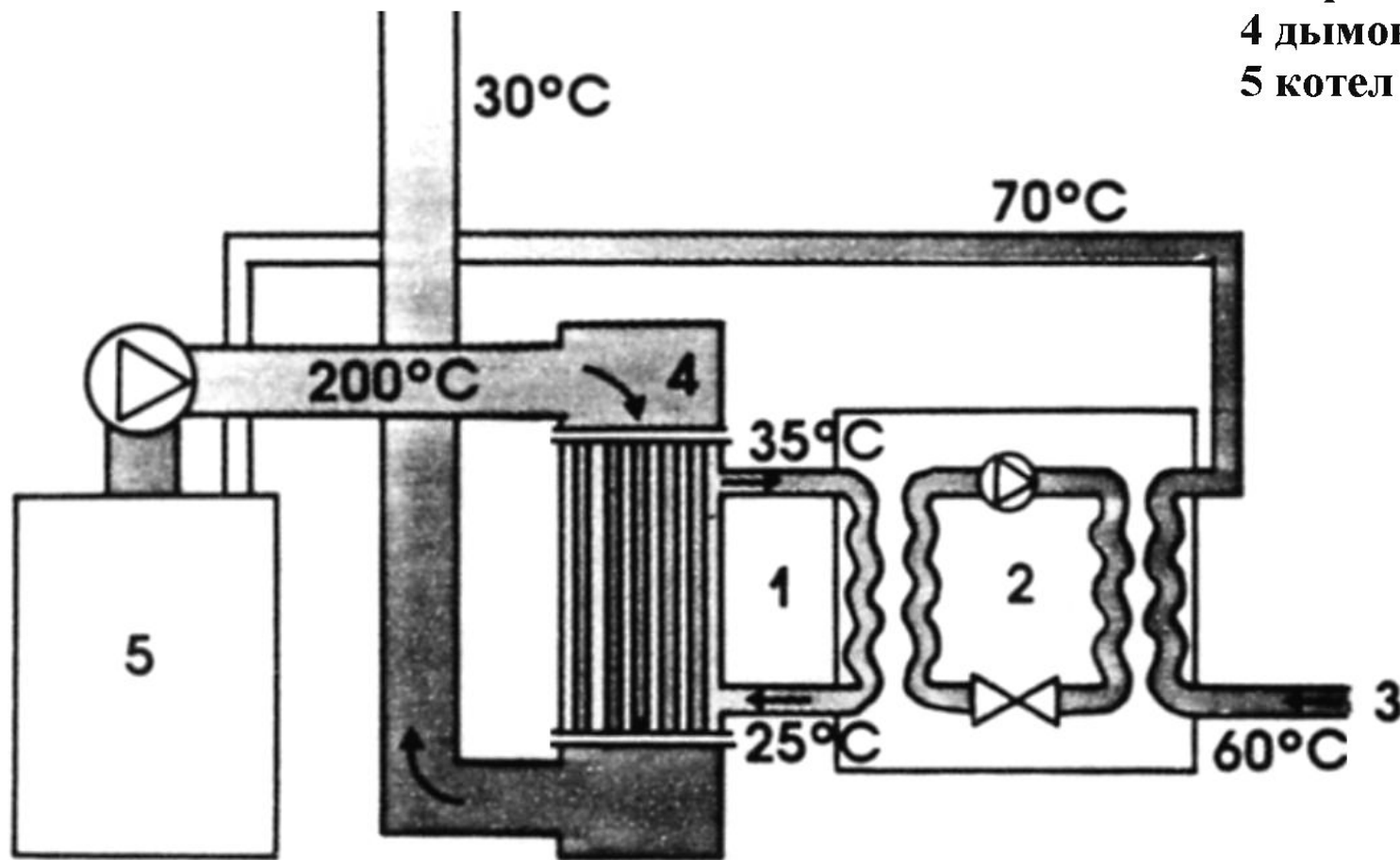
▣ **Низшая теплота сгорания Q_H^p** – количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого и жидкого (кДж/кг) топлива или 1 м³ газообразного топлива (кДж/м³) за вычетом **теплоты конденсации** паров воды, содержащихся в продуктах сгорания.

▣ Продукты сгорания (дымовые газы), как правило, выходят из котельных агрегатов при температуре, превышающей **температуру конденсации** паров воды (**точку росы**), поэтому в тепловых расчетах энергетических устройств используется Q_H^p .

▣ **скрытая теплота конденсации r** может частично утилизироваться путем конденсации водяных паров в специальных теплообменниках (проблемы – низкий тепловой потенциал, коррозия).

Утилизация скрытой теплоты конденсации водяного пара в составе дымовых газов

- 1 холодная вода
- 2 тепловой насос
- 3 обратная сетевая вода
- 4 дымовые газы
- 5 котел



Формула Менделеева для расчёта Q_H^p твёрдого и жидкого топлива

$$Q_H^p = 339 C^p + 1025 H^p - 108.5 (O^p - S_{\text{ор+к}}^p) - 25 W^p, \\ \text{кДж/кг}$$

$$Q_H^c = \frac{Q_H^p + 25W^p}{100 - W^p} 100 \quad \text{кДж/кг}$$

$$Q_H^\Gamma = \frac{Q_H^p + 25W^p}{100 - (A^p + W^p)} 100 \quad \text{кДж/кг}$$

Формулы пересчета теплоты сгорания

$$Q_{\text{в}}^p = Q_{\text{н}}^p + 225 H^p + 25 W^p$$

$$Q_{\text{в}}^z = Q_{\text{н}}^z + 225 H^z$$

$$Q_{\text{в}}^c = Q_{\text{н}}^c + 225 H^c$$

Горючие сланцы: учёт теплоты разложения карбонатов



$$Q_H^\Gamma = \frac{Q_H^P + 25W^P + 40(\text{CO}_2)_K^P}{100 - A_u^P - W^P - (\text{CO}_2)_K^P} 100$$

$$Q_H^P = Q_H^\Gamma \frac{100 - A_u^P - W^P - (\text{CO}_2)_K^P}{100} - 25W^P - 40(\text{CO}_2)_K^P$$

$(\text{CO}_2)_K^P$ – содержание углекислоты карбонатов в рабочей массе %, задаётся в составе топлива.

$A_u^P \approx A^P - (2...4) \frac{100 - W^P}{100}$ – истинная зольность рабочей массы.

Пересчет теплоты сгорания при изменении влажности топлива

$$Q_{H2}^p = (Q_{H1}^p + 25W_1^p) \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} - 25W_2^p$$

Определение теплотворной способности бинарной смеси топлив

$$Q_{H\text{ см}}^p = b_1 Q_{H1}^p + (1 - b_1) Q_{H2}^p,$$

b_1 – массовая доля одного из топлив в смеси.

Влияние влажности на низшую теплотворную способность древесины



$$Q_H^p = 339C^p + 1025H^p - 108.5(O^p - S_{op+k}^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг}$$

Низшая теплота сгорания основных видов органического топлива

- 6 200-7 500 кДж/кг (многозольные сланцы, высоковлажные биомасса, торф, бурый уголь)
- 20 000 кДж/кг (сухая биомасса)
- 25 000-29 000 кДж/кг (высококалорийный каменный уголь)
- 38 000-42 000 кДж/кг (нефтепродукты).

Городской мусор (ТБО)

- На 40-50% состоит из органических горючих материалов, на 20-40% - из металла, стекла, керамики

- Низшая теплотворная способность ТБО:
7-8 МДж/кг (выше горючих сланцев, но ниже бурых углей)

I газообразное топливо – состав задается в объёмных % (!!!)

| | | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ | N ₂ | CO ₂ | H ₂ |
|----|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | <i>Газопровод</i> | об. % | | | | | | | |
| 1 | Саратов-Москва | 84,5 | 3,8 | 1,9 | 0,9 | 0,3 | 7,8 | 0,8 | – |
| 2 | Первомайск-Сторожовка | 62,4 | 3,6 | 2,6 | 0,9 | 0,2 | 30,2 | 0,1 | – |
| 3 | Саратов-Горький | 91,9 | 2,1 | 1,3 | 0,4 | 0,1 | 3,0 | 1,2 | – |
| 4 | Ставрополь-Москва (1) | 93,8 | 2,0 | 0,8 | 0,3 | 0,1 | 2,6 | 0,4 | – |
| 31 | Игрим-Пунга-Серов-Нижний Тагил | 95,7 | 1,9 | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 1,3 | – | 0,2 |
| 32 | Оренбург-Совхозное | 91,4 | 4,1 | 1,9 | 0,6 | – | 0,2 | 0,7 | 1,1 |

Низшая теплота сгорания сухих горючих газов

$$Q_H^c = 108H_2 + 126CO + 239H_2S + 358CH_4 + 591C_2H_4 + 860C_3H_6 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 1403C_6H_6, \text{ кДж/м}^3$$

В среднем для природного газа $Q_H^c \approx 35,6 \text{ МДж/м}^3$.

Для **влажного газа**

$$Q_H^p = Q_H^c \frac{100 - W^p}{100}$$

Высшая теплота сгорания сухих горючих газов

$$Q_B^p = Q_H^p + r \left(m_{H_2O} / m_{\text{топл}} \right)$$

$$r = 2440 \text{ кДж/кг} \quad (25^\circ\text{C})$$

$$m_{H_2O} = 0.01 \left[H_2S + H_2 + \sum \left(\frac{n}{2} \right) C_m H_n \right] \rho_{H_2O}$$

$$m_{\text{топл}} = 0.01 \left[H_2S \rho_{H_2S} + H_2 \rho_{H_2} + \sum C O_m \rho_{n_x} + H_2 \rho_2 + \sum C H \rho_{m_n} \right]$$

Пример: низшая теплота сгорания метана

- $Q_H^p = Q_B^p - r (m_{H_2O} / m_{топл})$
- $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$
- $r = 2440 \text{ кДж/кг (25}^\circ\text{C)}$
- $Q_B^p = 55\,500 \text{ кДж/кг (табл. данные)}$
- $m_{H_2O} = 2 \times (2 \times 1 + 16) = 36 \text{ кг воды}$
- $m_{топл} = 12 + 4 \times 1 = 16 \text{ кг метана}$
- $Q_H^p = 55\,500 - 2440 (36/16) = 50\,000 \text{ кДж/кг} =$
 $= 50\,000 / \rho_{CH_4} = 50\,000 / (M_{CH_4} / 22.4) = 35714 \text{ кДж/м}^3$

Условное топливо и нефтяной эквивалент

- **Условное топливо (у.т.; coal equivalent)** имеет теплоту сгорания

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}}^{\text{p}} &= 29300 \text{ кДж/кг у.т.} \\ &= 7000 \text{ ккал/кг у.т.} = 7 \text{ Гкал/т у.т.} \end{aligned}$$

- **Нефтяной эквивалент (н.э.; oil equivalent)**

$$\begin{aligned} Q_{\text{H}}^{\text{p}} &= 41870 \text{ кДж/кг} \\ &= 10000 \text{ ккал/кг} = 10 \text{ Гкал/т н.э.} \end{aligned}$$