



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

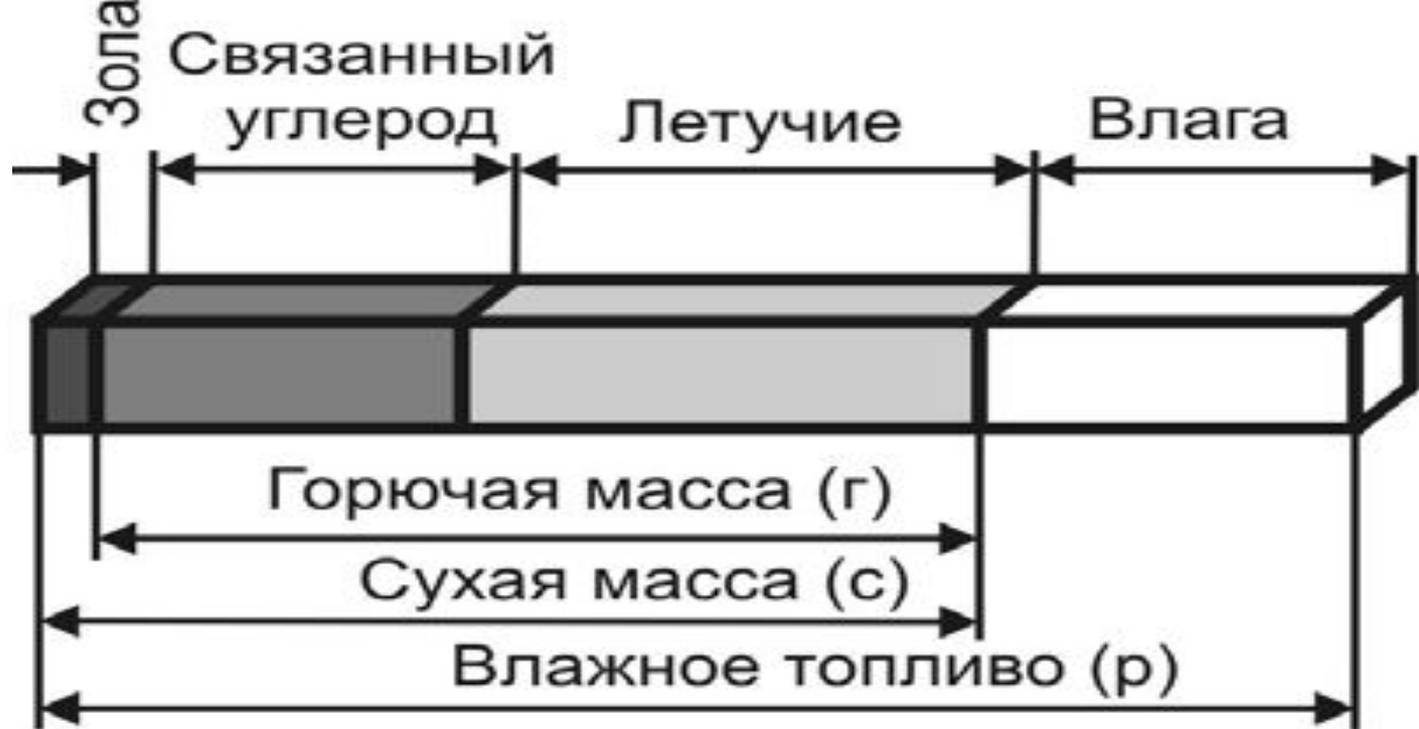
$$W^p + A^p + V^p + C_{св}^p = 100 \text{ масс. \%}$$

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

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**: **$S_l = S_{ор+k}$** .

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
 $CaCO_3 \dots$

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, горючая и органическая 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)

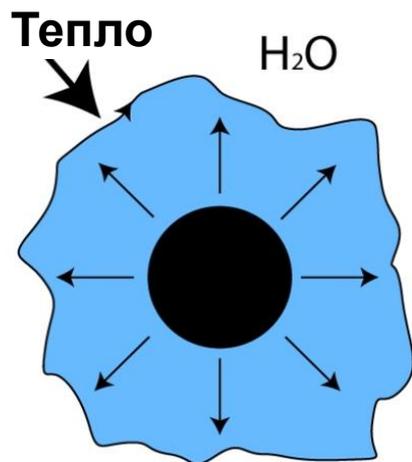
$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_{\text{ор}}^o = 100\%$$

Летучие вещества и связанный углерод (коксовый остаток)

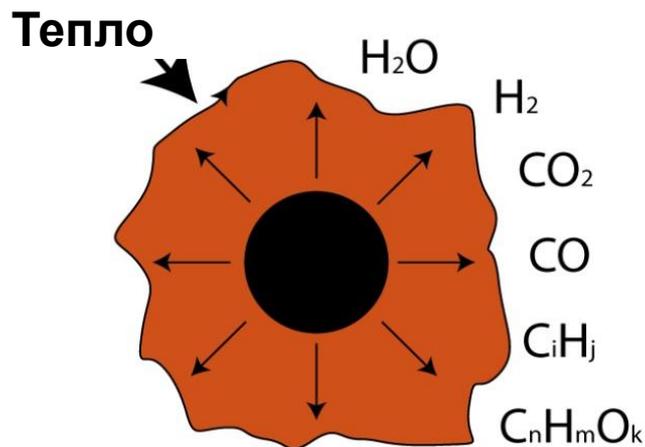
- Одной из основных особенностей поведения *твердых топлив* при нагревании является *термическое разложение* их органической массы на газообразные **летучие вещества** и **твердый коксовый остаток** (связанный углерод $C_{св}$, зола, следы O и H).
- Летучие продукты состоят из **неконденсирующихся газов** (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

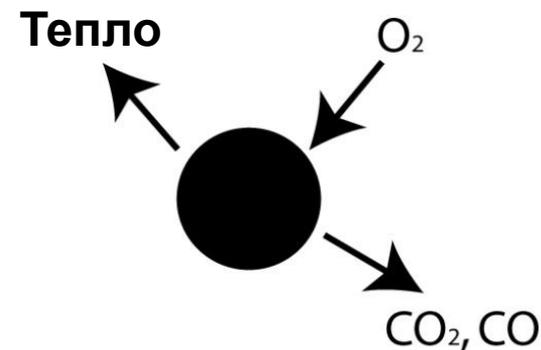
Нагревание и сушка



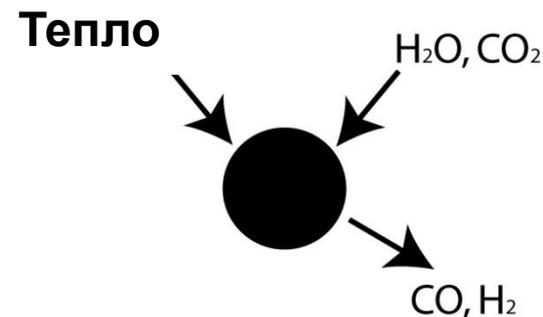
Выход летучих
(пиролиз)



Горение кокса

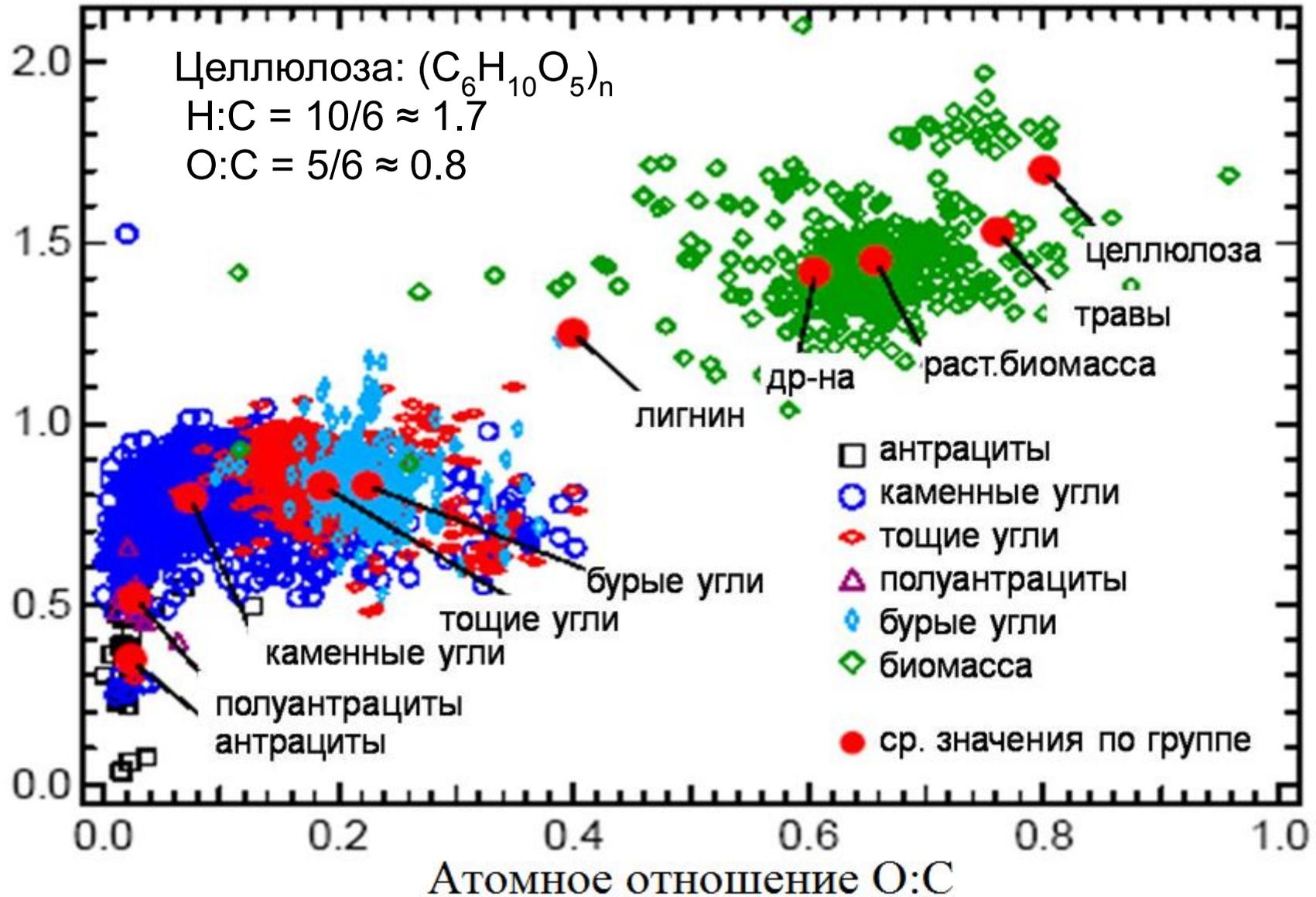


Газификация кокса

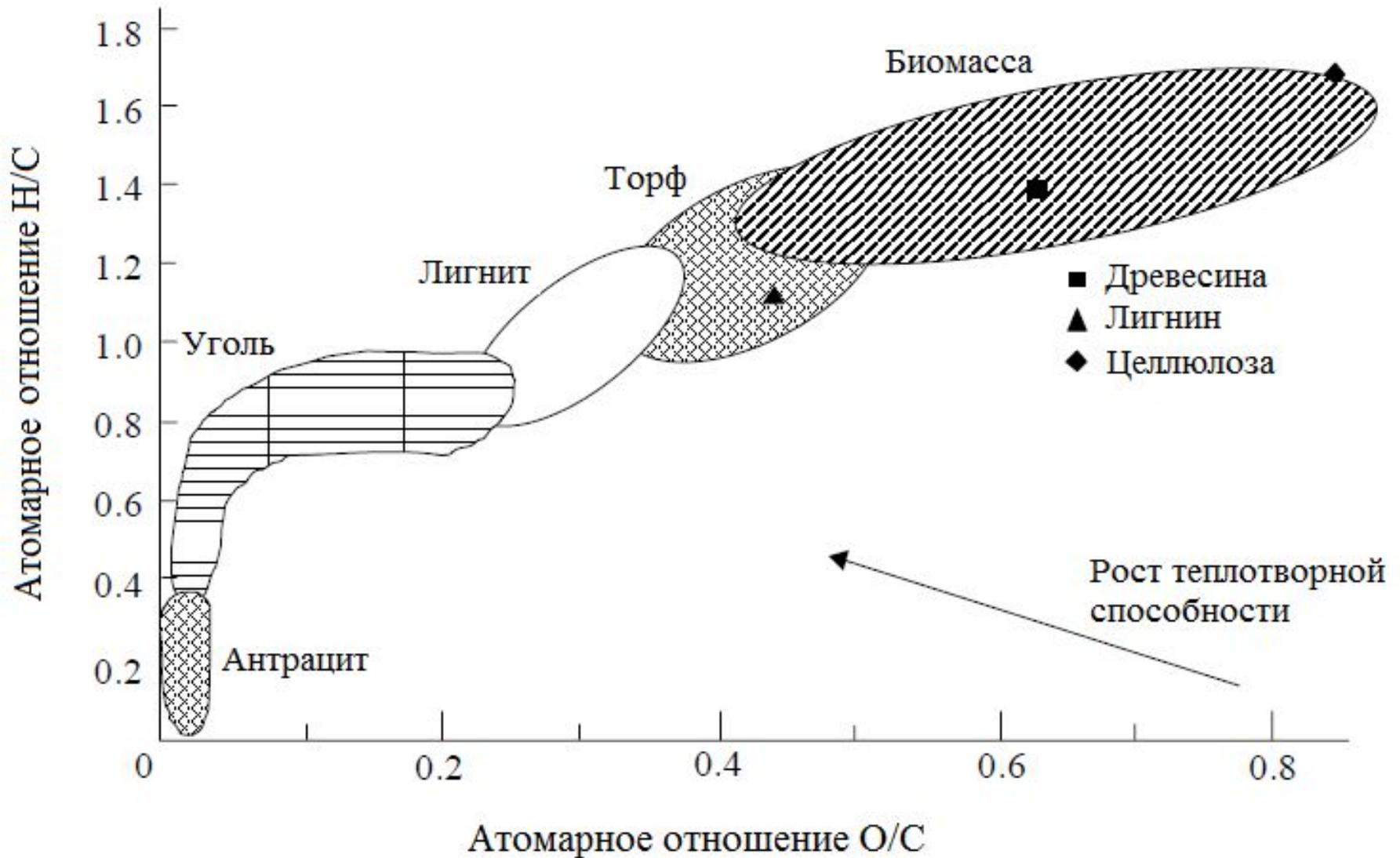


Состав горючей массы твердых топлив (диаграмма ван Кревелена)

Атомное отношение Н:С



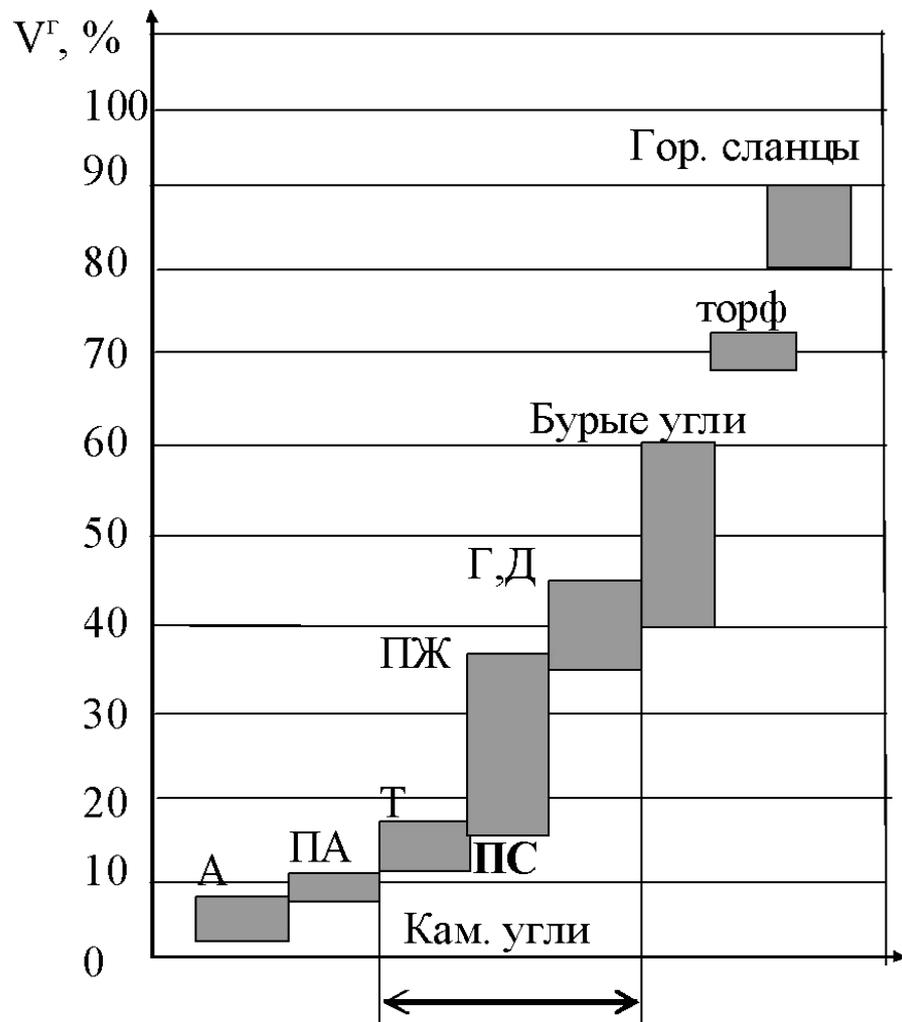
Состав горючей массы – теплота сгорания



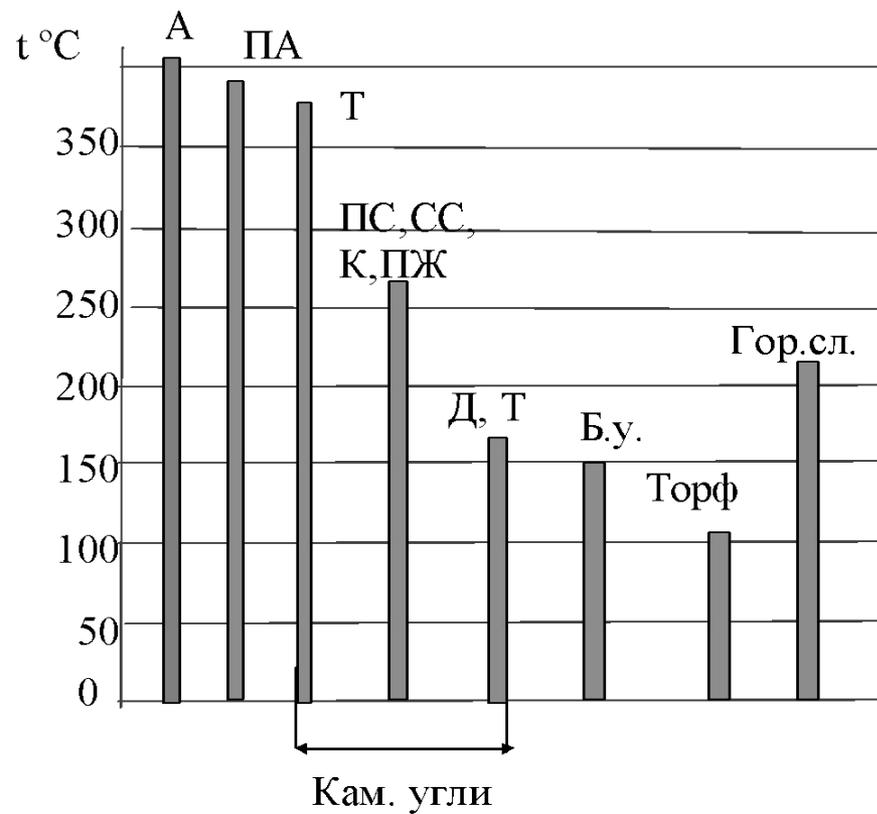
Состав и продукты термического разложения топлива

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 H _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 к **горючим элементам**.
- 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* её обычно немного, но в некоторых бурых и каменных углях – до 7-8% на *горючую* массу топлива.
- В *нефти* S входит в состав органических соединений; при переработке большая часть переходит в мазут (0,3-3,5%).
- В *природных газах* S 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.
- S – причина коррозии низкотемпературных поверхностей нагрева из-за *серного ангидрида* SO_3 , который сильно повышает температуру конденсации водяных паров (точку росы) в продуктах сгорания топлива и, растворяясь в конденсате, образует H_2SO_4 .
- 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
<i>Каменные угли</i>										
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- ковский <i>бурый</i>	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)

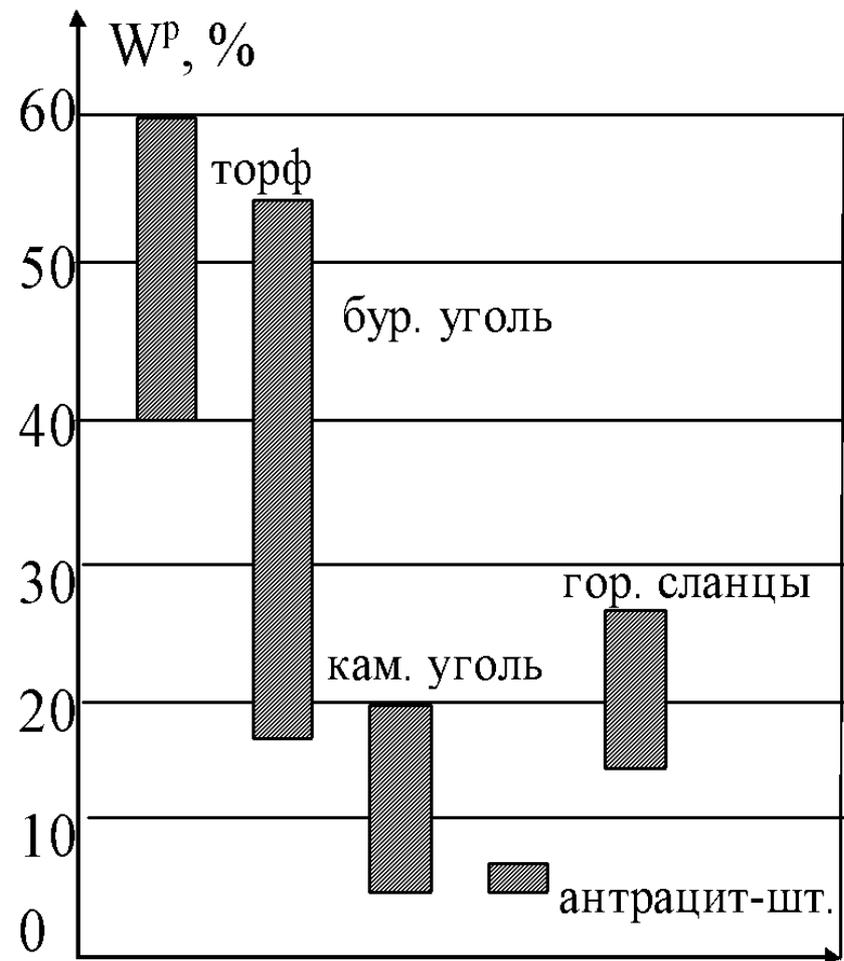
Класс	Условное обозначение	Размер кусков, мм
Плитный	П	Более 100
Крупный	К	50—100
Орех	О	25—50
Мелкий	М	13—25
Семечко	С	6—13
Штыб	Ш	Менее 6
Рядовой	Р	0—200

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:



$$W^P = \frac{m_{H_2O}}{m_{раб}} 100\% = \frac{m_{H_2O}}{m_{сух} + m_{H_2O}} 100\%$$

$$w^P = \frac{W^P}{100\%} \quad \text{– массовая доля влаги в топливе}$$

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

$$M = \frac{m_{H_2O}}{m_{сух}} 100\% = \frac{W^P}{100 - W^P} 100\%$$

$$M = \frac{w^P}{1 - w^P} 100\%; \quad w^P = \frac{M}{100 + M}$$

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.

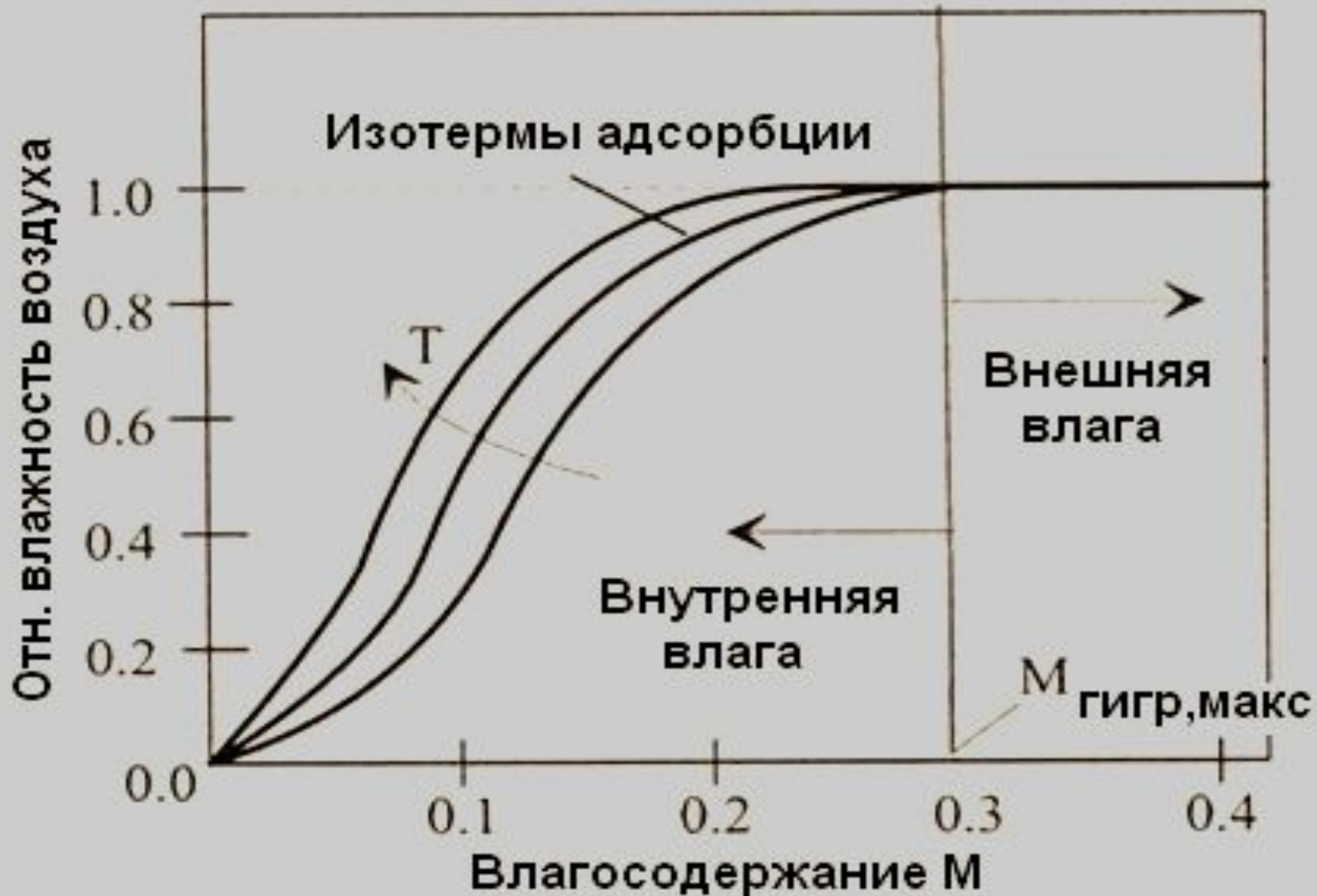
Рабочая масса топлива

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p_{\text{ор+к}} + A^p + W^p_{\text{вне+вну}} = 100\%$$

**Аналитическая масса топлива –
без внешней, но с внутренней влагой**

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S^a_{\text{ор+к}} + A^a + W^a_{\text{вну}} = 100\%$$

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 рассчитывать рабочий состав топлива *при других влажности и (или) зольности* по известной горючей массе, 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:

~~Асташевские 2 ленинградские~~ $\frac{100 - W^P}{100}$,

~~Аштарфские сланцы~~ — $\frac{100 - W^P}{100}$

Зольность твердых топлив

Золей 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.

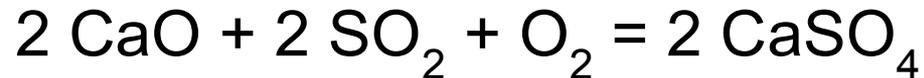
Трансформации минеральной части

- 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 %);

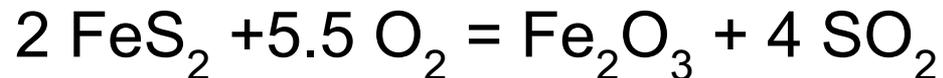
- Реакции связывания серы



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

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

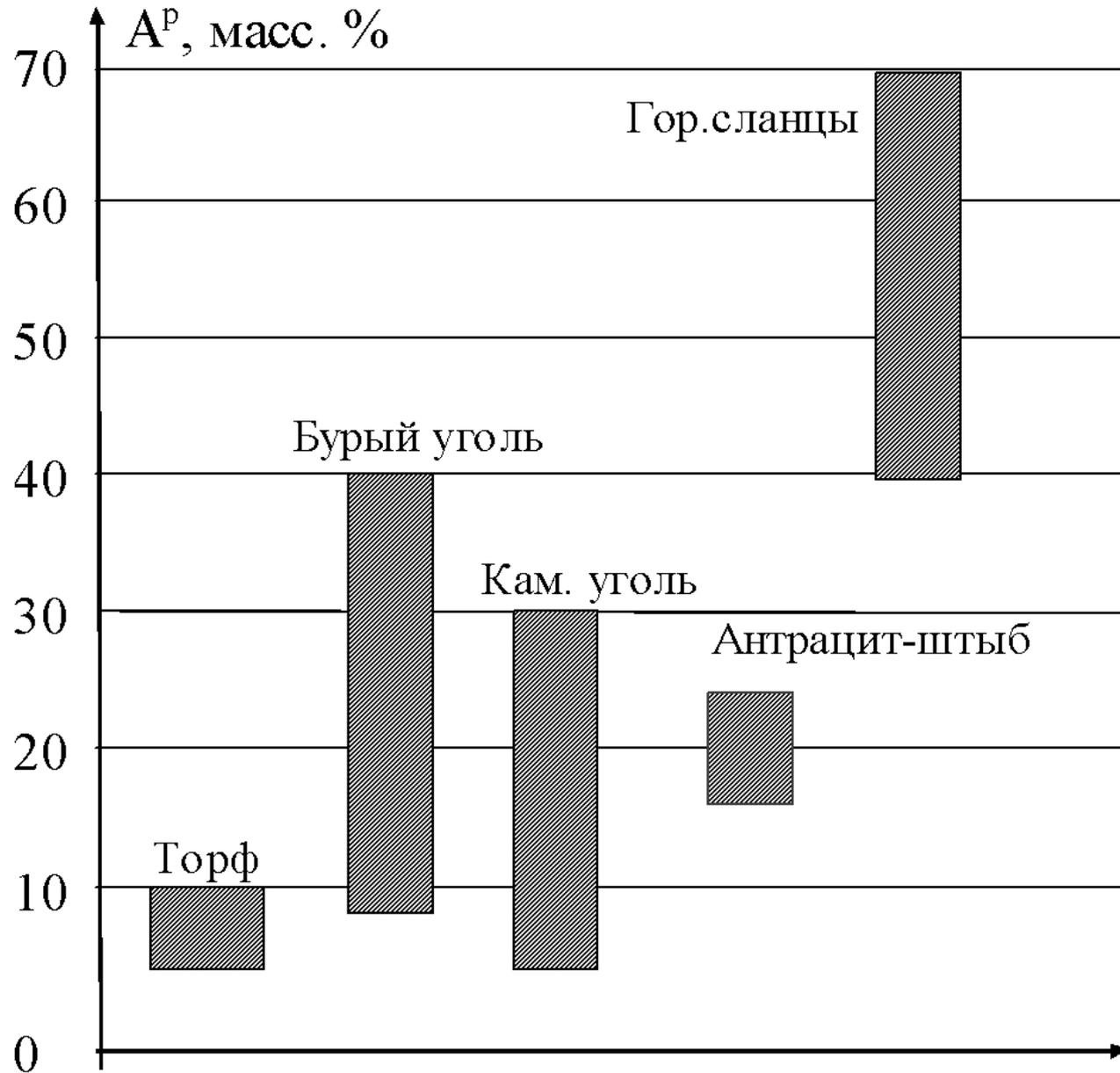
- Горение железного колчедана (пирита)



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

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

Зольность твердых топлив



Компоненты золы

Тугоплавкие (1600 – 2800 °С)

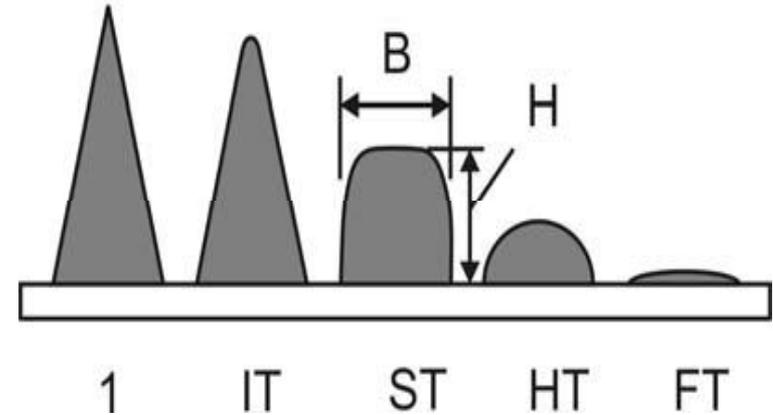
- Диоксид кремния (кремнекислота) SiO_2
- Глинозём Al_2O_3
- Оксиды кальция CaO (известь) и магния MgO (магнезия)

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, °C			
	T_1 (IT)	T_2 (ST)	T_3 (HT)	T_4 (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

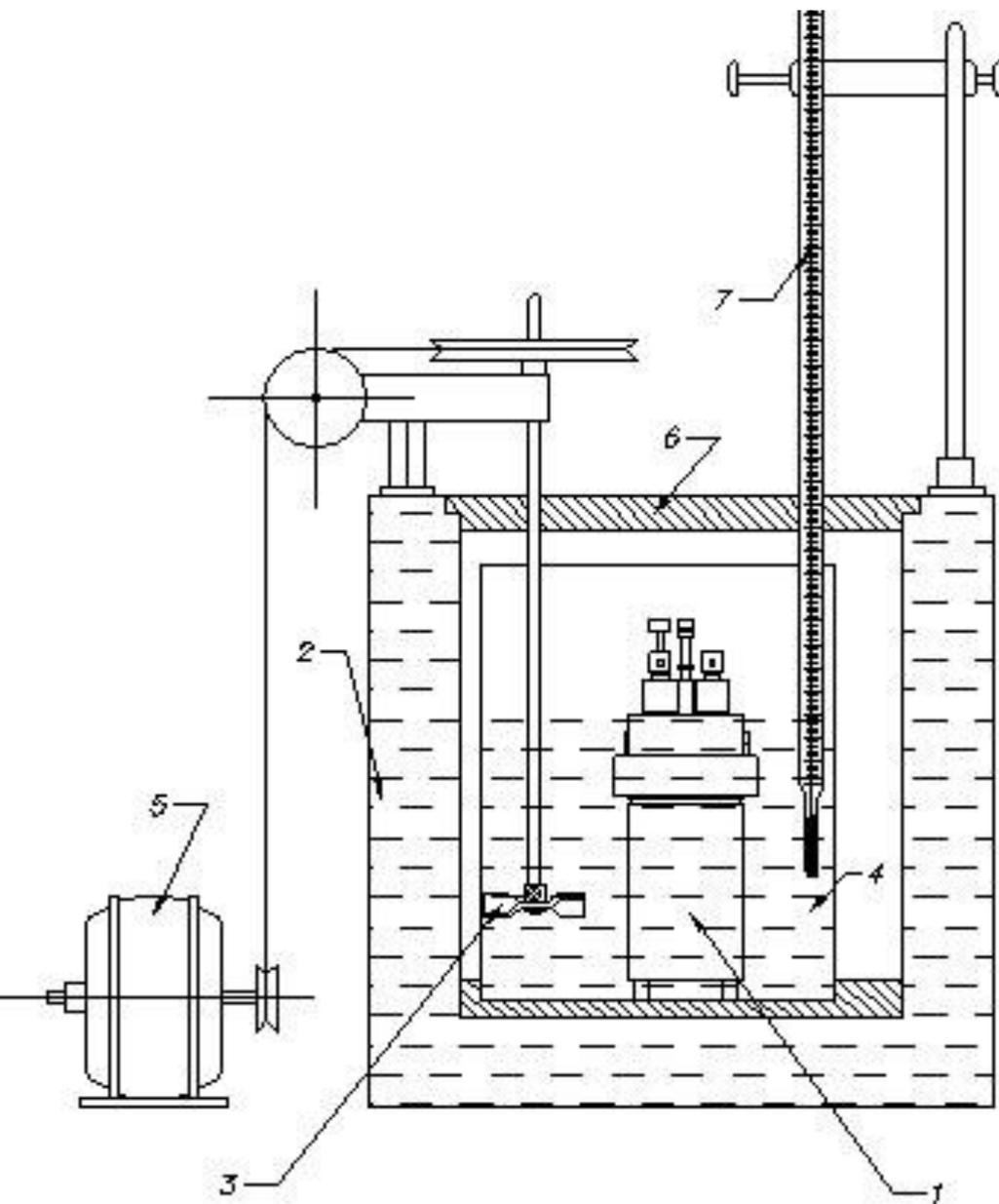
Теплота сгорания (*теплотворная способность*) топлива

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_g^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.

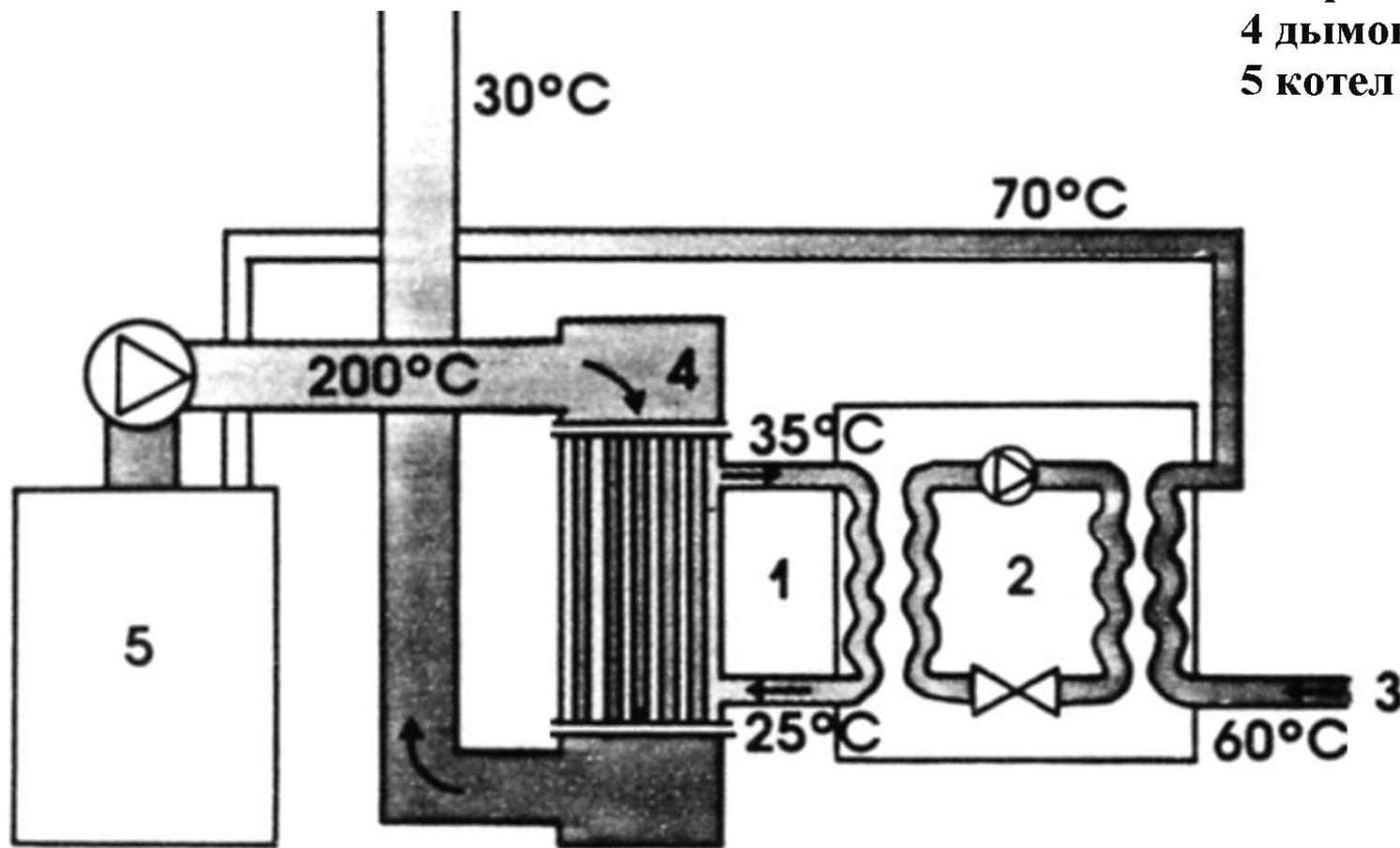
■ **Низшая теплота сгорания Q_H^p** – количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого и жидкого (кДж/кг) топлива или 1 м³ газообразного топлива (кДж/м³), и не включающее **теплоту конденсации** паров воды, которые содержатся в продуктах сгорания.

■ 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 твердого и жидкого топлива по элементному составу (масс. %)

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

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

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

Влияние влажности на низшую теплотворную способность древесины



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

Пересчет теплоты сгорания при изменении влажности топлива

На сухую массу:

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

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

Определение теплотворной способности бинарной смеси топлив

$$Q_{н см}^p = b_1 Q_{н 1}^p + (1 - b_1) Q_{н 2}^p,$$

b_1 — массовая доля одного из топлив в смеси.

Формулы пересчета высшей теплоты сгорания

$$Q_v^p = Q_H^p + 225 H^p + 25 W^p$$

$$Q_v^z = Q_H^z + 225 H^z$$

$$Q_v^c = Q_H^c + 225 H^c$$

кДж/кг

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.

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

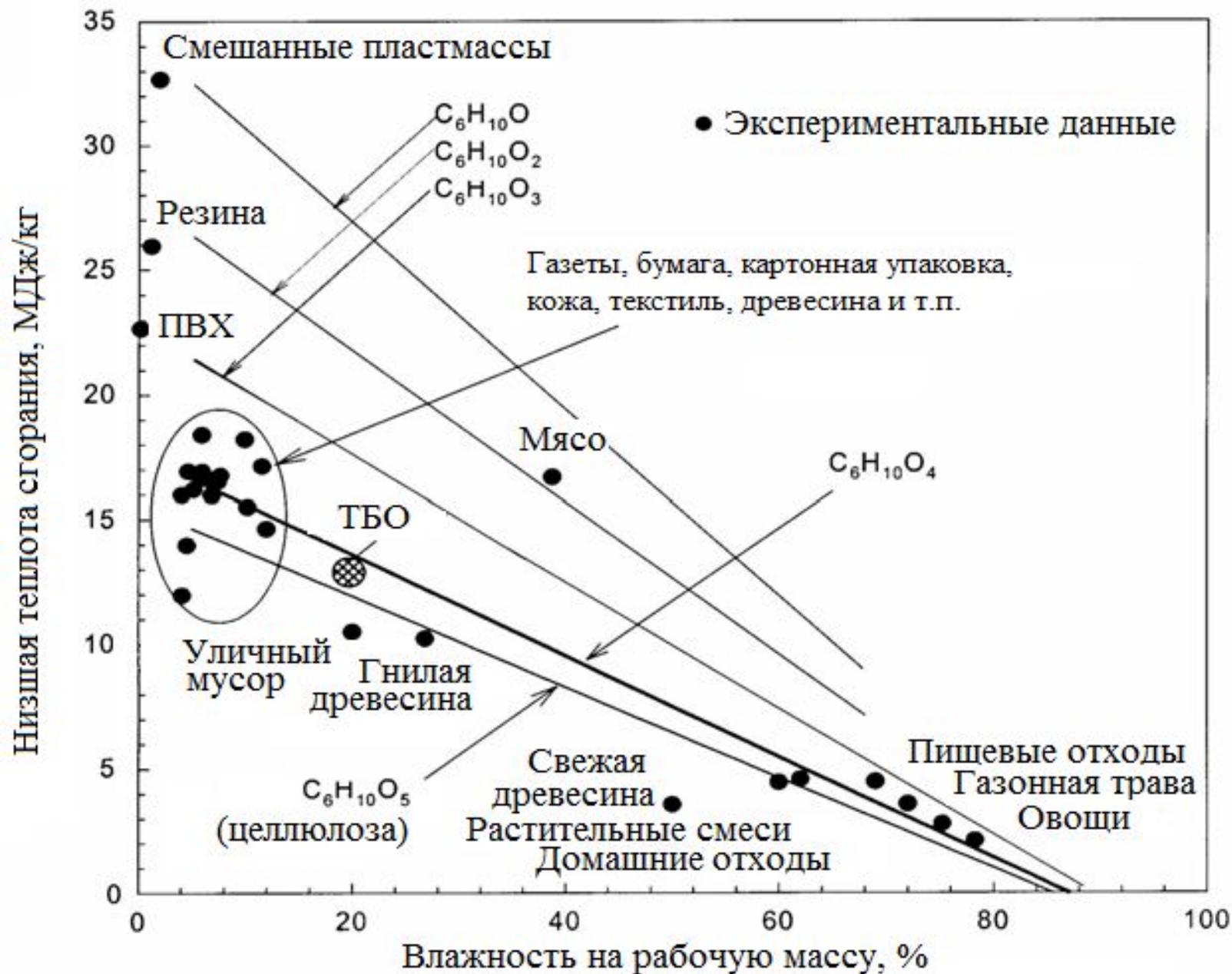
Низшая теплота сгорания основных видов органического топлива

- **6 200 – 7 500** кДж/кг (горючие сланцы, влажные биомасса, торф, бурый уголь)
- **20 000** кДж/кг (сухая биомасса)
- **25 000 – 29 000** кДж/кг (каменные угли)
- **38 000 – 42 000** кДж/кг (нефтепродукты).

Твёрдые бытовые отходы (ТБО)

- На 40-50% состоят из органических горючих материалов, на 20-40% - из металла, стекла, керамики
- Низшая теплотворная способность ТБО влажностью 40 – 60 % составляет **7– 8 МДж/кг** (выше горючих сланцев, но ниже бурых углей)

Углеродсодержащие отходы



Газообразное топливо – состав задаётся 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

$$Q_B^c = Q_H^c + r (m_{H_2O} / m_{\text{ТОПЛ}})$$

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

Масса влаги в продуктах сгорания 1 м³ топлива

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

$$m_{\text{ТОПЛ}} = 0.01 \left[H_2S \rho_{H_2S} + H_2 \rho_{H_2} + \sum CO_m \rho_{n_x} + N_2 \rho_2 + \sum C H \rho_{m_n} \right]$$

Пример: низшая теплота сгорания метана

- $Q_B^c = 55\,500$ кДж/кг (*табл. данные*)
- $Q_H^c = Q_B^p - r (m_{H_2O} / m_{топл})$
- $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$
- $r = 2440$ кДж/кг ($25^\circ C$)
- $m_{H_2O} = 2 \times (2 \times 1 + 16) = 36$ кг воды
- $m_{топл} = 12 + 4 \times 1 = 16$ кг метана
- $Q_H^c = 55\,500 - 2440 (36/16) = 50\,000$ кДж/кг =
 $= 50\,000 * \rho_{CH_4} = 50\,000 * (M_{CH_4} / 22.4) = 35714$ кДж/м³

Условное топливо и нефтяной эквивалент

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

$$Q_H^p = 29300 \text{ кДж/кг у.т.}$$
$$= 7000 \text{ ккал/кг у.т.} = 7 \text{ Гкал/т у.т.}$$

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

$$Q_H^p = 41870 \text{ кДж/кг}$$
$$= 10000 \text{ ккал/кг} = 10 \text{ Гкал/т н.э.}$$