

# Тепловые электрические станции (Введение в специальность)

## Лекция 3

### ТОПЛИВО И ЕГО СВОЙСТВА

*«Качество всех видов топлива  
поставляемого электростанции  
должно соответствовать  
государственным стандартам и  
техническим условиям на поставку»  
(ПТЭ)*

# Что такое топливо

- Топливом называют химические вещества или смеси веществ, способные в результате физико-химических преобразований выделять тепловую энергию
- В зависимости от происхождения и вида реакции энергетические топлива подразделяются на:
  - органическое природное (естественное),
  - органическое искусственное и
  - ядерное
- Органическое, естественное и искусственное топливо при горении выделяет тепловую энергию за счет химических реакций окисления
- Ядерное топливо – это химическое вещество, способное выделять тепловую энергию в результате ядерных преобразований - цепной реакции деления ядер радиоактивных веществ (урана-235 и др.)

## Газообразное топливо (природный, попутный и искусственный газы)

- углеводороды: метана  $CH_4$ ; этана  $C_2H_6$ ; пропана  $C_3H_8$ ; бутана  $C_4H_{10}$ ; пентана  $C_5H_{12}$ ; этилена  $C_2H_4$ ; бутилена  $C_4H_8$ , бензола  $C_6H_6$ ; гексана  $C_6H_{14}$  и др.;
- оксиды углерода: угарного газа  $CO$ ; углекислого газа  $CO_2$ ;
- азот  $N_2$ ;
- сероводород  $H_2S$ ;
- водород  $H_2$ ;
- кислород  $O_2$ .
- В природном газе больше всего метана (80÷98 %) и нет угарного газа, кислорода, водорода, сероводорода
- В искусственных газах чаще всего находится угарный газ, водород, азот, но совсем мало углеводородов

# Характеристики газообразных топлив

<i>Состав и характеристики топлива</i>	<i>Газообразное топливо</i>		
	<i>Природный газ</i>	<i>Попутный газ</i>	<i>Искусственный, промышленный газ</i>
<i>Низшая теплота сгорания, , МДж/м<sup>3</sup></i>	<i>35÷38</i>	<i>36÷47</i>	<i>3÷20</i>
<i>Плотность при 0<sup>0</sup>С и 101,3 кПа, ρ, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>0,723÷0,83</i>	<i>0,775÷1,2</i>	<i>0,4÷1,3</i>
<i>Углеводороды, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, %</i>	<i>94÷99,3</i>	<i>73,0÷99,5</i>	<i>0,2÷27,0</i>
<i>Угарный газ, СО, %</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>7,0÷30,0</i>
<i>Углекислый газ, СО<sub>2</sub>, %</i>	<i>0.01÷1,0</i>	<i>0,2÷1,8</i>	<i>3,0÷11,0</i>
<i>Азот, N<sub>2</sub>, %</i>	<i>0,6÷6,7</i>	<i>0,1÷27,0</i>	<i>4,0÷60,0</i>
<i>Сероводород, H<sub>2</sub>S, %</i>	<i>-</i>	<i>0,5÷1,1</i>	<i>-</i>
<i>Водород, H<sub>2</sub>, %</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>2,0÷58,0</i>
<i>Кислород, O<sub>2</sub>, %</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>До 1,0</i>

## Характеристики газообразных топлив (продолжение)

- Плотность газообразных топлив меньше, чем плотность воздуха.
- Это способствует быстрому перемешиванию его в воздухе.
- При повышении температуры плотность газов уменьшается, поэтому более холодные струи воздуха легко проникают в увеличивающиеся объемы газообразных топлив.
- Все это способствует лучшему воспламенению и горению газообразных топлив

В попутном газе метана меньше 40÷80 %, иногда до 93 %, однако в нем встречается сероводород

## Жидкие топлива

- Жидкие топлива - бензин, керосин, солярка, мазут и другие сжиженные горючие вещества.
- Все они являются продуктами переработки нефти.
- Нефть состоит из смеси парафиновых (метановых), нафтеновых и реже ароматических углеводородов с общим содержанием углерода  $82\div 87$  % и водорода –  $11,5\div 14,5$  %.
- Помимо этого в нефти содержится  $4\div 5$  % примесей: кислород в составе нафтеновой кислоты, сера, азот, смолистые и асфальтовые вещества.
- Спутниками нефти являются нефтяной газ и вода.
- Парафиновая нефть содержит  $62$  % и более твердых углеводородов

## Энергетические жидкие топлива

- В энергетике в качестве жидкого топлива используется мазут.
- Мазут это остаток после перегонки нефти, т.е. после отгонки из нее бензина, керосина и дизельного топлива.
- Мазут, в зависимости от предельной вязкости жидкости при  $80^{\circ}\text{C}$ , применяется двух марок: 40 ( $8^{\circ}\text{ВУ}$ ) и 100 ( $16^{\circ}\text{ВУ}$ ), где ВУ – условная вязкость жидкости в градусах.
- По содержанию серы мазут разделяют на низкосернистый (серы до 0,5 %) малосернистый (серы  $0,5 \div 1,0$  %), сернистый (серы  $1,0 \div 2,0$  %) и высокосернистый (более 2,0 %).
- Плотность мазута  $890 \div 1000$   $\text{кг/м}^3$ .

## Характеристика мазутов

Состав и характеристики топлива	Марка мазута			
	Низкосернистый	Малосернистый	Сернистый	Высокосернистый
Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	41,68÷40,82	40,53÷39,21	39,57÷38,29	39,06÷37,57
Температура вспышки, °С	156÷208	100÷200	110÷200	90÷210
Углерод, C <sup>r</sup> , %	87,33	86,58	85,71	85,04
Водород, H <sup>r</sup> , %	11,90	12,04	11,45	10,64
Сера, S, %	0,39÷0,5	0,85÷1,0	1,8÷2,0	2,55÷3,5
Кислород и азот, O <sup>r</sup> +N <sup>r</sup> , %	0,2	0,3	0,5	0,71
Зольность, A <sup>r</sup> , %	0,03÷0,14	0,03÷0,14	0,05÷0,14	0,06÷0,14
Влажность, W <sup>r</sup> , %	0,15÷1,0	0,20÷1,0	0,49÷1,0	1,0

## Горение жидких топлив

- Жидкое топливо всегда воспламеняется и горит в паровой фазе.
- Этому способствует низкая температура испарения и вспышки углеводородов, как основных составляющих мазутов, а также распыливание жидкого топлива через форсунки в виде мелких капель.
- В остальном процесс горения парообразной смеси с окислителем во многом похож на горение газообразного топлива.

# Твердые топлива

- Твердые топлива это угли (каменные, бурые, тощие, антрациты), древесина, торф, горючие сланцы.
- Угли делятся на три вида в зависимости от основных генетических признаков (табл.), которые в свою очередь объединяются в технологические марки, группы и подгруппы.
- На выбор способа сжигания твердого топлива влияют следующие физико-химические свойства:
- состав органической и минеральной массы сырого топлива,
- количество и химический состав золы,
- влажность,
- содержание летучих в топливе,
- теплота сгорания и др..

# Состав и характеристика твердых топлив

Состав и характеристики топлива	Твердое топливо			
	Угли	Древесина	Торф	Сланцы
Теплота сгорания, , МДж/м <sup>3</sup>	6,28÷28,05	10,22	10,47÷10,89	5,86÷10,89
Углерод, $C^r$ , %	65,0÷96,0	50,0	55,0÷56,0	83,0÷84,0
Водород, $H^r$ , %	3,0÷6,0	6,0	5,0÷6,0	6,0
Сера, , %	≤8,0	-	0,3	4,0÷15,0
Кислород, $O_2$ , %	0,0÷40,0	43,0	35,0÷40,0	10,0
Азот, $N^r$ , %	1,0	1,0	3,0	0,0÷1,0
Зольность, $A^r$ , %	7,0÷45,0	1,0÷3,0	5,0÷12,0	45,0÷64,0
Влажность, $W^r$ , %	5,0÷55,0	40,0÷60,0	40,0	15,0÷20,0
Выход горючих летучих, $V^r$ , %	2,0÷50,0	80,0÷90,0	65,0÷75,0	80,0÷90,0

# Характеристика ископаемых углей

<b>Вид угля</b>	<b>Теплота сгорания, , МДж/кг</b>	<b>Выход горючих летучих, <math>V^r</math>, %</b>
<b>Бурый уголь</b>	<b>Менее 24</b>	<b>40,0÷50,0</b>
<b>Каменный уголь</b>	<b>24 и более</b>	<b>10,0 и более</b>
<b>Антрацит</b>	<b>24 и более</b>	<b>2,0÷10,0</b>

# Физико-химический состав топлива

Обозначения	Углерод C	Водород H	Кислород O	Азот N	Сера органическая $S_{org}$	Сера колчеданная $S_k$	Гидратная влага $W_2$	Балласт		
								Зола A	Влага	
									Аналитич. влага $W^a$	Внешняя влага $W^{вн}$
0	Органическая масса									
daf	Сухая беззольная									
d	Сухая									
a	Аналитическая масса									
r	Рабочая (рабочее топливо)									
af	Влажная беззольная масса (-A)									

# Особенности твердого топлива, поступающего на ТЭС

**Твердое топливо, поступающее на российские ТЭС, не всегда соответствует своему названию.**

**Оно содержит 30÷50 % и более минерального балласта (золы) и поэтому его скорее можно назвать просто минералом, который в равной мере может быть использован как для получения тепловой энергии, так и других продуктов производства.**

## Физико-химические характеристики топлива

- Основными характеристиками любого топлива - удельная теплота сгорания, плотность, взрывоопасность, содержание токсичных веществ (сера, ванадий и др.), а также теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность).
- Дополнительно:
- для газообразных топлив - предельную концентрацию газа в воздухе при взрыве.
- для жидких топлив - вязкость, температуры: вспышки, воспламенения и самовоспламенения, застывания.
- для твердых топлив - состав органической и минеральной частей, зольность, влажность, содержание горючих летучих, абразивность и размолоспособность

## Удельная теплота сгорания топлива

- Это количество тепла, которое может выделить 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> природного газа
- Оценка происходит по низшей теплоте сгорания на рабочую массу топлива  $Q_H^r$
- Теплота сгорания обычно определяется экспериментально на основе испытаний в калориметрической бомбе.
- Однако приближенно удельная теплота сгорания может быть определена с помощью эмпирических формул Д.И.Менделеева
- По величине удельной теплоты сгорания определяется расход топлива необходимый для производства энергетической нагрузки.

# Плотность

- **Массовая содержание вещества в единице объема**
- **Плотность также характеризует массовый (или объемный) расход топлива**
- **Твердое топливо - неоднородная структура, состоящая из твердого материала, пронизанного порами, трещинами и пространством между кусками топлива. Поэтому для них имеет значение несколько величин плотности**
- **Действительная плотность - масса одного куска топлива без объема пор и трещин**
- **Кажущаяся это плотность одного куска с учетом объемов пор и трещин внутри куска**
- **Насыпная плотность учитывает массу и объем, занимаемый твердым телом, порами, трещинами и пространством между кусками и частицами**

## Взрывоопасность топлива

- Взрывоопасность это возможность быстрого почти мгновенного воспламенения и сгорания горючих веществ.
- Взрывоопасность определяется содержанием в топливе газовой составляющей.
- Для газообразных топлив большое значение имеет концентрационный предел взрываемости горючих газов с воздухом.
- Углеводородные топлива (природный газ и нефтепродукты) тем более взрывоопасны, чем больше атомов углерода находится в молекуле углеводорода.
- У твердых топлив взрывоопасность определяется содержанием горючих летучих в топливе. Считается, что при  $V^r > 10$  % твердое топливо взрывоопасно

## Вязкость топлива

- Вязкость характеризует силы внутреннего трения, действующие между слоями жидкости при ее движении и зависит от скорости движения одного слоя относительно другого, а также от размеров частиц или молекул, из которых и состоит жидкое топливо.
- При прокачке вязких жидких топлив затрачиваются большие усилия, что увеличивает затраты на собственные нужды.
- Жидкие топлива с большей вязкостью распыляются из форсунок крупными каплями, которые хуже горят и до конца не догорают (увеличиваются потери с недожегом топлива).
- В расчетах используется динамическая  $\mu$ , Па с, и кинематическая  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, вязкости, связь между которыми описывается выражением  $\mu = \nu \rho$ .

# Температура вспышки и воспламенения жидких топлив

- Температура вспышки и воспламенения жидких топлив характеризует взрывоопасность и, связанную с ней, пожароопасность топлив.
- Температура **вспышки** это температура, при достижении которой из топлива выделяется столько паров, что смесь их с воздухом создает взрывоопасную концентрацию.
- Температура вспышки для мазутов колеблется в пределах от  $60^{\circ}\text{C}$  до  $240^{\circ}\text{C}$ .
- Температура **воспламенения** выше температуры вспышки на  $60\text{-}70^{\circ}\text{C}$ .
- При температуре **самовоспламенения** мазут начинает гореть самопроизвольно, без розжига пламенем. Для мазутов такая температура находится в пределах  $500\text{-}600^{\circ}\text{C}$ .

## Содержание токсичных веществ и Температура застывания

- **Содержание токсичных веществ** в топливе влияет на загрязнение окружающей среды.
- При массовых выбросах дымовых газов на тепловых электростанциях предельно допустимые выбросы вредных веществ зависят от содержания токсичных веществ в топливе.
- **Температура застывания** это температура, при которой мазут теряет свою текучесть.
- Температура застывания зависит от содержания в мазутах асфальтосмолистых веществ и высокомолекулярных углеводородов

## Органическая часть твердых топлив

- Органическая часть твердых топлив в зависимости от стадии углефикации выстраиваются в ряд: древесина, торф, бурый уголь, каменный уголь и антрацит.
- Элементарный состав видов топлива этого ряда характеризуется увеличением содержания углерода и уменьшением кислорода.
- Содержание водорода и, особенно, азота практически не изменяется

<i>Топливо</i>	<i>Углерод</i>	<i>Кислород</i>	<i>Водород</i>	<i>Азот</i>
<i>Древесина</i>	<b>50</b>	<b>40÷44</b>	<b>5÷6</b>	<b>0,5÷1,5</b>
<i>Торф</i>	<b>55÷60</b>	<b>33÷38</b>	<b>5÷6</b>	<b>0,5÷1,5</b>
<i>Бурый уголь</i>	<b>64÷77</b>	<b>15÷25</b>	<b>5÷6</b>	<b>0,5÷1,5</b>
<i>Каменный уголь</i>	<b>75÷90</b>	<b>4÷15</b>	<b>5÷6</b>	<b>0,5÷1,5</b>
<i>Антрацит</i>	<b>94÷97</b>	<b>2÷4</b>	<b>1÷2</b>	<b>0,5÷1,5</b>

# Минеральная часть твердых топлив

**Минеральная часть твердых топлив, поступающих на ТЭС, состоит из:**

- глинистых материалов (алюмосиликаты  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  и др.);
- кремнезема (кварц)  $SiO_2$ ;
- карбонатов  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $FeCO_3$ ;
- сульфидов  $FeS_2$ ,  $CaS$ ;
- сульфатов  $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $FeSO_4$ ;
- оксидов железа  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ;
- солей калия и натрия  $KCl$ ,  $NaCl$ , фосфаты и др.;
- шпатов (например,  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ );
- доломита  $CaMg(CO_3)_2$ ;
- так называемых малых отходов и др.
- При всем многообразии состава минеральных веществ, для большей части топлива 95...98% из их балласта составляют алюмосиликаты, карбонаты и сульфаты.

## Зольность твердого топлива

- **Зольность** определяется его минеральной частью.
- Существуют технологии, позволяющие обогащать топливо органической частью, т.е. снижать до минимума (до 2÷5 %) зольность, что повышает качество твердого топлива и улучшает условия эксплуатации оборудования ТЭС.
- В процессе горения минеральная примесь балластирует горючую массу, образуя твердую или жидкую золу А, которая снижает теплотворную способность топлива. Участвуя в химических преобразованиях, она в то же время не создает теплового эффекта.
- Тем не менее, зольность топлива, поступающего на ТЭС России достаточно высокая до 30 % и более.

## Влажность топлива

- Влажность топлива снижает тепловую экономичность котла.
- При горении топлива часть выделяющейся теплоты затрачивается на испарение влаги и разложение ее на водород и кислород.
- Эта теплота расходуется сразу же, как только топливо попадает в зону горения. Поэтому влага особенно неблагоприятно влияет на воспламенение горючих веществ.
- В процессе горения водород и кислород реагируют с образованием водяных паров, создавая теплоту. Однако полные потери тепла в начальной стадии (на испарение воды) это не компенсирует.
- Влага в дымовых газах создает условия для появления коррозии. Поэтому температура уходящих газов на выходе из котельной установки должна быть выше температуры точки росы (конденсации).
- Влажность топлива создает проблемы и в системах топливо- и пылеприготовления, когда из-за влаги теряется подвижность топлива, происходит налипание на внутренних частях оборудования и замазывание различных каналов.

## Содержание горючих летучих газов в твердом топливе

- Содержание горючих летучих газов в твердом топливе определяет возможность быстрого воспламенения топлив.
- По интенсивности воспламенения топлива различают на низкорреакционные, средне- и высокорреакционные.
- Низкорреакционными считаются топлива с содержанием летучих менее  $7 \div 10$  %. К таким топливам относится антрацитовый штыб (АШ), у которого  $V^r \leq 5$  %.
- Такое топливо приходится сжигать с добавкой другого топлива мазута или природного газа.

# Абразивность

- **Абразивность** - способность частиц при движении истирать конструктивные материалы трубопроводов и другие детали.
- В наибольшей степени от абразивности страдают элементы мельниц. Поэтому и параметром абразивности выбрана зависимость, учитывающая потерю массы мелющих элементов отнесенную к работе  $A$ , затраченной на привод мельницы.

- Коэффициент абразивности, г/кВт ч, принимается выражение:

$$K_a = \Delta G / A$$

- Коэффициент абразивности изменяется от 0,17 (канско-ачинский БУ) до 3,0 (донецкий АШ).
- Абразивность топлив зависит от твердости и прочности его органических и минеральных составляющих.
- Абразивность топлив повышается при увеличении содержания в минеральной части пирита, песка, а также при угловатой форме частиц.

## Размолоспособность топлив

- **Размолоспособность** характеризуется энергозатратами при размол топлива, и зависят от прочности топлива и от необходимой степени измельчения пыли.
- Коэффициент размолоспособности топлива равен

$$k_p = A / A_{э\text{т}} \quad ,$$

- где  $A$ ,  $A_{э\text{т}}$  – работы, затраченные на размол исследуемого и эталонного топлив соответственно при одинаковой тонине помола.
- Исходный материал также должен иметь одинаковые условия: крупность кусков топлива при размоле 1,25÷3,2 мм и топливо должно быть одинаково просушено.
- Тонина помола определяется при просеивании остатком на сите с ячейкой в 90 мкм ( $R_{90}$ )



# Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)

**Благодарю за внимание**

Ефимов Николай Николаевич – проф., д.т.н., зав каф. ТЭС