

Лекция 1

Топливо. Горение топлива

Перечень вопросов

- ▶ 1. Классификация топлив
- ▶ 2. Характеристики топлив
- ▶ 3. Физика горения
- ▶ 4. Особенности сжигания топлив

Классификация ТОПЛИВ



- ▶ **Энергетическое топливо** – это горючие вещества, которые экономически целесообразно использовать для получения тепловой и электрической энергии.
- ▶ По органическому составу и агрегатному состоянию топливо подразделяется на твердое, жидкое и газообразное. Эти топлива могут быть естественными и искусственными.
- ▶ В зависимости от расположения месторождения добычи топлива от источника потребления топлива разделяют местное (месторождение вблизи источника потребления) и дальнепривозное.

Топливо	твердое	жидкое	газообразное
Природное	каменный уголь, антрацит, дрова, торф, бурый уголь, сланцы	нефть	природный газ, попутный газ нефтяных месторождений
Искусственное	деревянный уголь, полукокс, кокс, брикет торфа и угля	бензин, керосин, мазут, лигроин, дизтопливо	коксовый газ, генераторный газ, доменный газ, газ из угольных месторождений при их газификации
Топливные отходы	отходы углеобогащения, отходы при переработке древесины (опилки, щепа)	кислый гудрон	газы при переработке нефти

Характеристики ТОПЛИВ

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. The shapes are primarily triangles and polygons, creating a dynamic, layered effect. The overall composition is clean and modern, with the text centered on a white background.

- ▶ Основной характеристикой топлива является его *химический состав*, который выражается в процентах от общей массы или объема топлива.
- ▶ Основными элементами твердого и жидкого топлива является *углерод C* , *водород H* , *сера S* , *кислород O* , *азот N* , *минеральные примеси A* , *влаги W* . Эти элементы по-разному участвуют в процессе горения, выделяя различное количество тепла при его сжигании.
- ▶ *C , H и S* - составляют горючую массу топлива.
- ▶ *O и N* - составляют внутренний балласт топлива.
- ▶ *A и W* - внешний балласт топлива.

- ▶ В зависимости от содержания балластных элементов в топливе и общей массы топлива, элементарный состав в справочниках и таблицах обычно приводится в 3-х видах:
- ▶ состав на рабочую массу, когда присутствуют все элементы:

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

- ▶ на сухую массу:

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

- ▶ на горючую массу:

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

- ▶ Основными элементами газообразного топлива являются
- ▶ предельные углеводороды C_nH_{2n+2}
- ▶ непредельные углеводороды C_nH_{2n}
- ▶ водород H_2
- ▶ оксид углерода CO
- ▶ диоксид углерода CO_2
- ▶ сероводород H_2S
- ▶ водяной пар H_2O
- ▶ кислород O_2
- ▶ азот N_2
- ▶ Состав газовой смеси

$$\sum C_nH_{2n+2} + \sum C_nH_{2n} + H_2 + CO + CO_2 + H_2S + H_2O + O_2 + N_2 = 100\%$$

- ▶ Для твердого и жидкого топлив все расчеты, производимые в процессе горения топлива, необходимо выполнять с элементарным составом топлива, заданным на рабочую массу.
- ▶ **Влажность топлива** - количество воды (влаги), присутствующее в топливе и отнесенное к массе топлива. Она зависит от связи с органическим материалом топлива и подразделяется на **внешнюю влагу** (поверхностная влага и капиллярная) и **внутреннюю**, входящую в коллоидные частицы топлива и гидратные соединения ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- ▶ Внутренняя влага не удаляется из топлива при внешнем подогреве, а лишь при прокаливании (при 102°C и выше). Внешняя влага удаляется при температурах $< 98^\circ \text{C}$.
- ▶ **Зольность топлива** - характеристика, которая устанавливает количество минеральных примесей в топливе, которое не участвует в процессе горения.

- ▶ **Летучие вещества** - это газообразные продукты, выделяемые из твердого и жидкого топлива в диапазоне температур 150-800° С без доступа кислорода - окислителя. После выделения летучих из топлива остается кокс, содержащий углерод и твердую минеральную часть топлива. В состав летучих веществ входят: и др.
- ▶ **Высшая теплота сгорания топлива** - общее количество тепла, выделяемое при сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива (или 1 м³ газообразного) с учетом превращения водяных паров выделяемых продуктов сгорания в жидкость. Эта теплота не учитывает тепло, затрачиваемое на процесс парообразования .
- ▶ **Низшая теплота сгорания топлива** - определяется путем вычитания из высшей теплоты сгорания теплоты, пошедшей на процесс парообразования.

Физика горения

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the page, creating a modern, layered effect. The text 'Физика горения' is centered on the left side in a dark green, sans-serif font.

Горение Горение топлива Горение топлива - химическая реакция соединения Горение топлива - химическая реакция соединения горючих элементов топлива Горение топлива - химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающаяся интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя используют кислород интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя используют кислород воздуха.

Процессы горения разделяют на 2 группы:

- 1). гомогенное горение горение - горение горение - горение газообразных горючих (характеризуется системой "газ+газ");
- 2). гетерогенное горение горение - горение горение - горение твердых и жидких горючих (характеризуется системой "твердое тело горение - горение твердых и жидких горючих

- ▶ Процесс горения Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение - самовозгорание Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение -самовозгорание твердого топлива Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение -самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение -самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение представляет собой взрыв Процесс горения может протекать с разной скоростью - от медленного до мгновенного. Медленное горение -самовозгорание твердого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение представляет собой взрыв. В тепловых энергетических установках практически значимое имеет

Горение Горение - это в основном химический процесс, т.к. в результате его протекания происходит качественные изменения состава реагирующих масс. Но в то же время химическая реакция Горение - это в основном химический процесс, т.к. в результате его протекания происходит качественные изменения состава реагирующих масс. Но в то же время химическая реакция горения сопровождается различными физическими явлениями: перенос теплоты, диффузионный перенос реагирующих масс и др.

Время горения Время горения топлива складывается из времени протекания физических ($\tau_{\text{физ}}$) и химических процессов ($\tau_{\text{хим}}$):

$$\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{физ}} + \tau_{\text{хим}} \cdot$$

- ▶ Время протекания физических процессов состоит из времени, необходимого для смешивания топлива с окислителем ($\tau_{см}$) и времени, в течение которого топливо - воздушная смесь подогревается до температуры (t_n) и времени, в течение которого топливо - воздушная смесь подогревается до температуры воспламенения (t_n):
- ▶ $\tau_{физ} = \tau_{см} + \tau_n$.
- ▶ Время горения ($\tau_{гор}$) определяется скоростью наиболее медленного процесса.

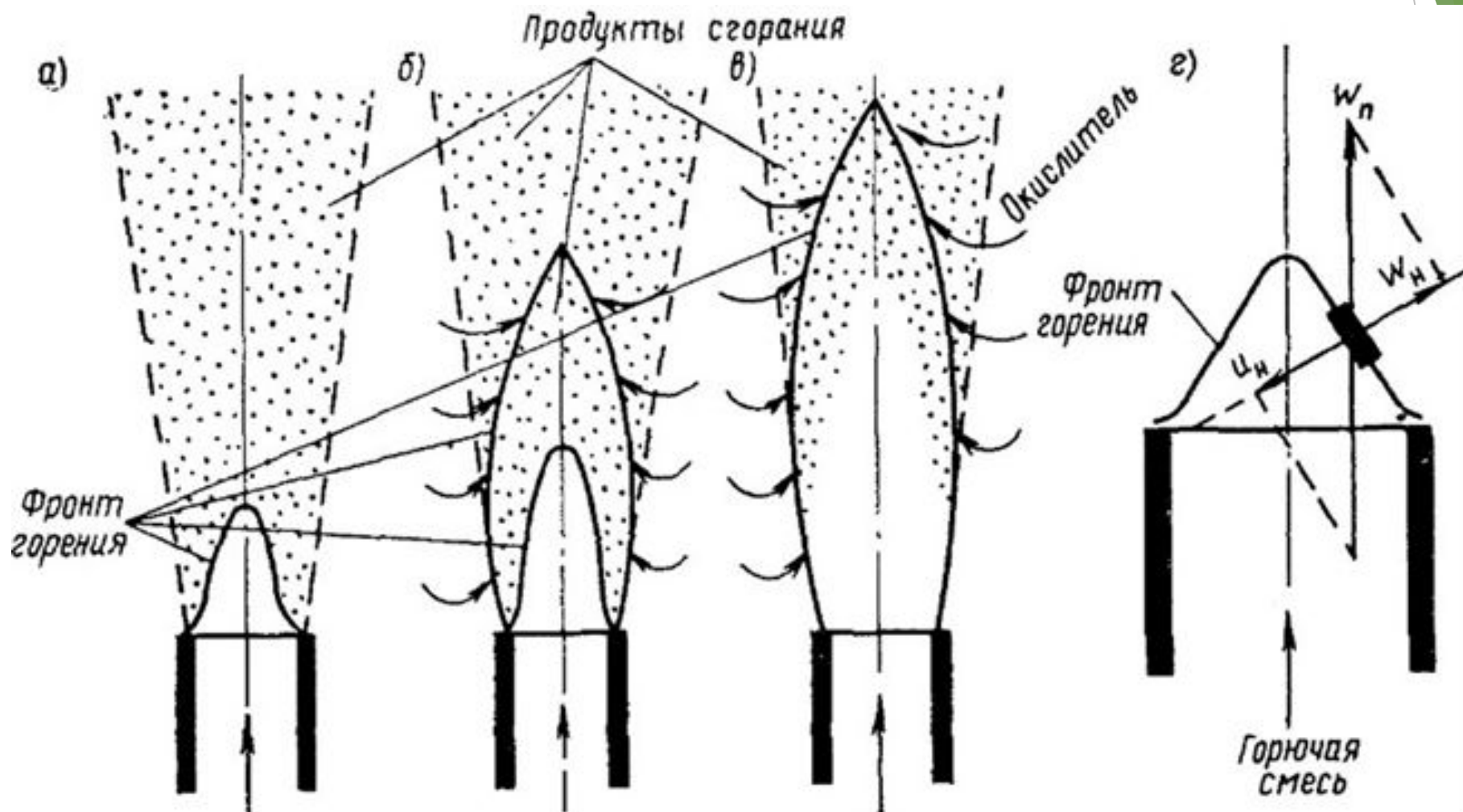
Особенности сжигания ТОПЛИВ

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the page, creating a modern, layered effect. The text is positioned on the left side of the page against a plain white background.

Горение газообразного топлива

Минимальная температура Минимальная температура при которой происходит воспламенение Минимальная температура при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой Минимальная температура при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой воспламенения Минимальная температура при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой воспламенения. Значение этой температуры Минимальная температура при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой воспламенения. Значение этой температуры для различных газов Минимальная температура при которой происходит воспламенение смеси, называется температурой воспламенения. Значение этой температуры для различных газов неодинаково и зависит от теплофизических свойств горючих газов, содержания горючего в смеси, условий зажигания, условий отвода теплоты в каждом конкретном устройстве и т.д.

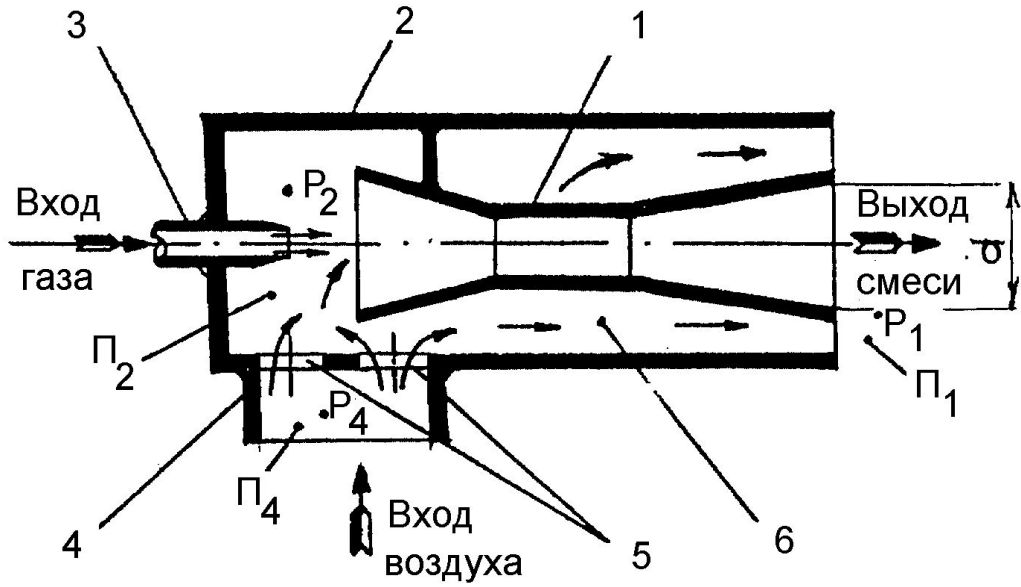
- ▶ Диффузионное горение Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с ВОЗДУХОМ Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ поступает в рабочий объем отдельно от воздуха Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ поступает в рабочий объем отдельно от воздуха. Скорость процесса будет ограничена скоростью смешивания газа Диффузионное горение происходит в процессе смешивания горючего газа с воздухом. Газ поступает в рабочий объем отдельно от воздуха. Скорость процесса будет ограничена скоростью смешивания газа с ВОЗДУХОМ $\tau_{гор} = \tau_{физ}$.
- ▶ Кроме этого существует смешанное (диффузионно-кинетическое) горение Кроме этого существует смешанное



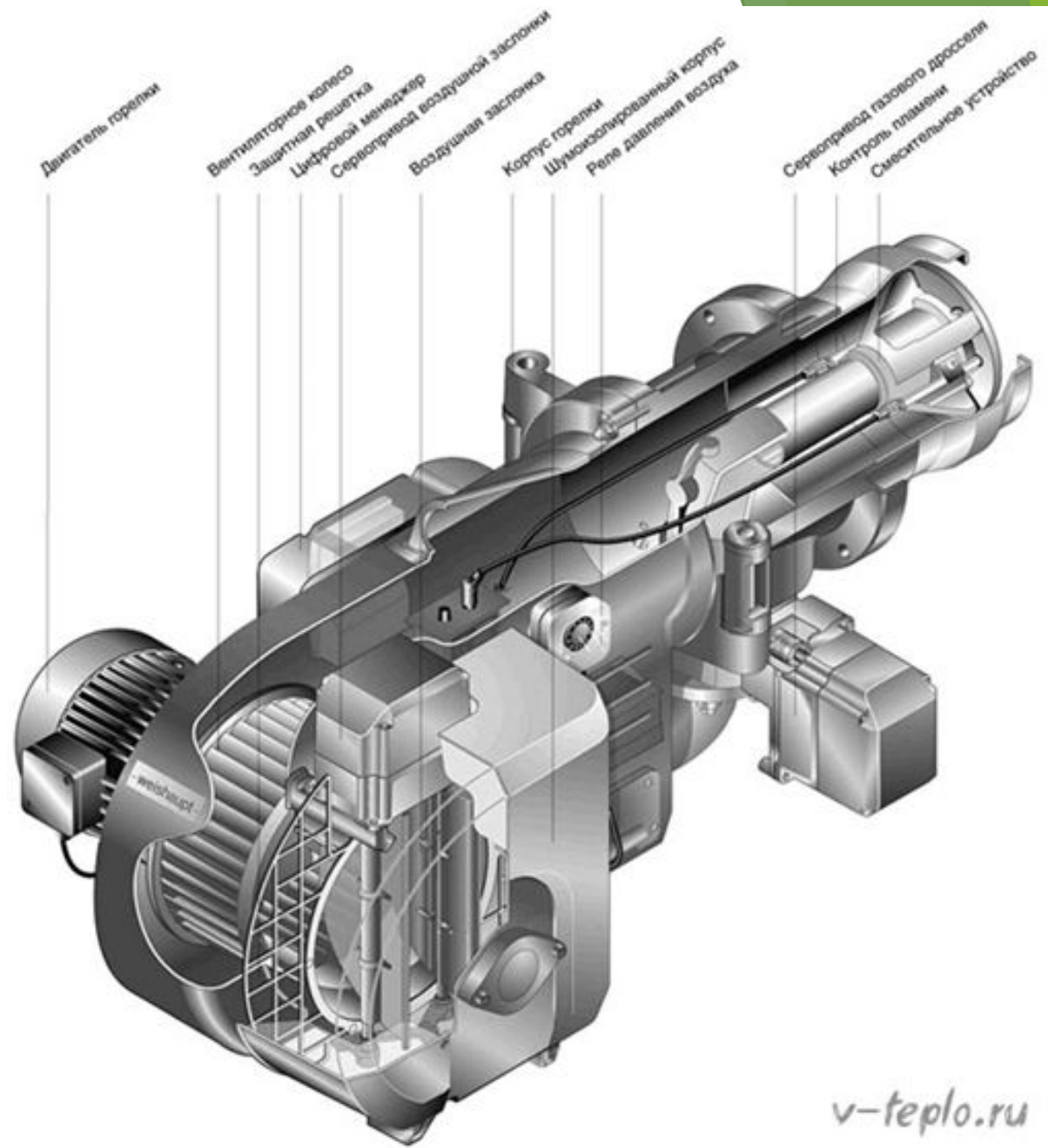
Газовые горелки можно классифицировать по двум критериям.

Первый зависит от того, каким образом в горелку подаётся поток воздуха, необходимого для горения. Согласно этому критерию можно выделить следующие типы горелок:

- ▶ Горелки с естественной тягой (инжекционные);
- ▶ Горелки с форсированной тягой;
- ▶ Горелки с принудительной подачей воздуха (вентиляторные).



Фиг. 1



В горелке с естественной тягой воздуха используется принцип инжекции, т.е. часть воздуха подсасывается из атмосферы за счёт разрежения, создаваемого при движении потока газа через горелку. При этом воздух смешивается с горючим газом.

Как правило, в горелках с естественной тягой поток воздуха, попадаемый в горелку по принципу инжекции (первичный воздух), достигает не более 50% от того значения, которое необходимо для достижения идеального горения. Поэтому требуется наличие дополнительного количества воздуха в камере сгорания (вторичный воздух).

В горелках с форсированной тягой для обеспечения постоянства рабочих условий и безопасного (с точки зрения санитарно-гигиенических норм) горения применяется вентилятор, который обеспечивает подачу необходимого для горения воздуха в закрытую камеру сгорания. При этом количество первичного воздуха может достигать 100% от того значения, которое необходимо для идеального горения.

Первые две категории горелок, как правило, применяются в бытовых напольных и настенных котлах.

В вентиляторных горелках подача воздуха осуществляется напорными вентиляторами. Эти вентиляторы обеспечивают более или менее постоянные напор и производительность в не зависимости от тяги.

Использование вентиляторов позволяет добиться:

- ▶ широкой области регулирования;
- ▶ использования вентиляторных горелок с газоплотными теплогенераторами с высоким КПД;
- ▶ оптимального смешивания топлива и воздуха;
- ▶ низкого избытка воздуха и (как следствие) высокое КПД горения.

Предшествующее смешиванию процентное содержание можно разделить на следующие группы:

- ▶ Газовые горелки с частичным предварительным смешиванием (например, - 50%);
- ▶ Газовые горелки с полным предварительным смешиванием (100%);
- ▶ Диффузионные горелки.

В первых двух случаях смешивание газа и воздуха частично или полностью происходит до того, как смесь попадет в камеру сгорания. Поэтому горелки с форсированной тягой являются также и горелками с предварительным смешиванием.

Предварительное смешивание дает более быструю реакцию окисления, вследствие чего пламя у таких горелок короче. Кроме того, при постоянно устойчивом соотношении газ-воздух горение происходит тише.

В диффузионных горелках образование и горение газозвушной смеси происходят более или менее одновременно. Для того, чтобы обеспечить экологически чистое горение с минимальным количеством избыточного воздуха, необходима повышенная турбулентность. Однако чем больше турбулентность потока, тем больше потери давления со стороны воздуха.

Горелки с принудительной тягой могут относиться к типу горелок с предварительным смешиванием, и к типу диффузионных горелок.



Горение жидкого топлива

Основным жидким топливом, используемым в теплоэнергетике и промышленной теплотехнике является мазут является мазут. В установках небольшой мощности также используют смесь технического керосина со смолами.

При зажигании жидкого горючего, имеющего свободную поверхность, загорается его пар, содержащийся в пространстве над поверхностью, образуя горящий факел. За счет тепла, излучаемого факелом, испарение резко увеличивается. При установившемся режиме теплообмена между факелом и зеркалом жидкости количество испаряющегося, а следовательно, и сгорающего горючего достигает максимального значения и далее остается постоянным во времени.

Температура жидкого горючего, при которой пары над его поверхностью образуют с воздухом смесь, способную воспламениться при поднесении источника зажигания, называется температурой вспышки.

Поскольку жидкие горючие сгорают в паровой фазе, то при установившемся режиме скорость горения определяется скоростью испарения жидкости с ее зеркала.



Картину возникновения химического недожога можно представить следующим образом.

Парообразные углеводороды при движении внутри конусообразного факела до фронта пламени при нахождении в области высоких температур при отсутствии кислорода, подвергаются термическому разложению вплоть до образования свободного углерода и водорода.

Свечение пламени обуславливается нахождением в нем частиц свободного углерода. Последние, раскалившись за счет выделяемого при горении тепла, излучают более или менее яркий свет.

Часть свободного углерода не успевает сгорать и в виде сажи уносится продуктами сгорания, образуя коптящий факел.

Таким образом, исследования горения жидких горючих со свободной поверхности показали, что:

- ▶ 1) горение жидких топлив происходит после их испарения в паровой фазе. Скорость горения жидких топлив со свободной поверхности определяется скоростью их испарения за счет тепла, излучаемого зоной горения, при установившемся режиме теплообмена между факелом и зеркалом испарения;
- ▶ 2) скорость горения жидких горючих со свободной поверхности растет с увеличением температуры их подогрева, с переходом к горючим с большей интенсивностью излучения зоны горения, меньшей теплотой парообразования и теплоемкостью и не зависит от величины и формы зеркала испарения;
- ▶ 3) интенсивность излучения зоны горения на зеркало испарения, горящего со свободной поверхности жидкого горючего, зависит только от его физико-химических свойств и является характерной константой для каждого жидкого горючего;
- ▶ 4) горению жидких горючих со свободной поверхности присущ повышенный химический недожог, величина которого характерна для каждого горючего.

Имея в виду, что горение жидких топлив происходит в паровой фазе **процесс горения капли жидкого горючего можно представить следующим образом.**

Капля жидкого топлива окружена атмосферой, насыщенной парами этого горючего. Вблизи от капли по сферической поверхности устанавливается зона горения. Химическое реагирование смеси паров жидкого топлива с окислителем происходит весьма быстро, поэтому зона горения весьма тонка. Скорость горения определяется наиболее медленной стадией — скоростью испарения горючего.

В пространстве между каплей и зоной горения находятся пары жидкого топлива и продукты горения. В пространстве вне зоны горения — воздух и продукты сгорания.

В зону горения изнутри диффундируют пары топлива, а снаружи — кислород. Здесь эти компоненты смеси вступают в химическую реакцию, которая сопровождается выделением тепла. Из зоны горения тепло переносится наружу и к капле, а продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство и в пространство между зоной горения и каплей.

По мере выгорания капли из-за уменьшения поверхности общее испарение уменьшается, зона горения суживается и исчезает при полном выгорании капли.

Горение твердого топлива

Процесс горения состоит из следующих стадий:




















- ▶ 1) подсушка топлива) подсушка топлива и нагревание до температуры) подсушка топлива и нагревание до температуры начала выхода летучих веществ;
- ▶ 2) воспламенение) воспламенение летучих веществ и их выгорание;
- ▶ 3) нагревание кокса) нагревание кокса до воспламенения;
- ▶ 4) выгорание горючих веществ) выгорание горючих веществ из кокса.

Эти стадии иногда частично накладываются одна на другую.

Выход летучих веществВыход летучих веществ у различных топливВыход летучих веществ у различных топлив начинается при различных температурахВыход летучих веществ у различных

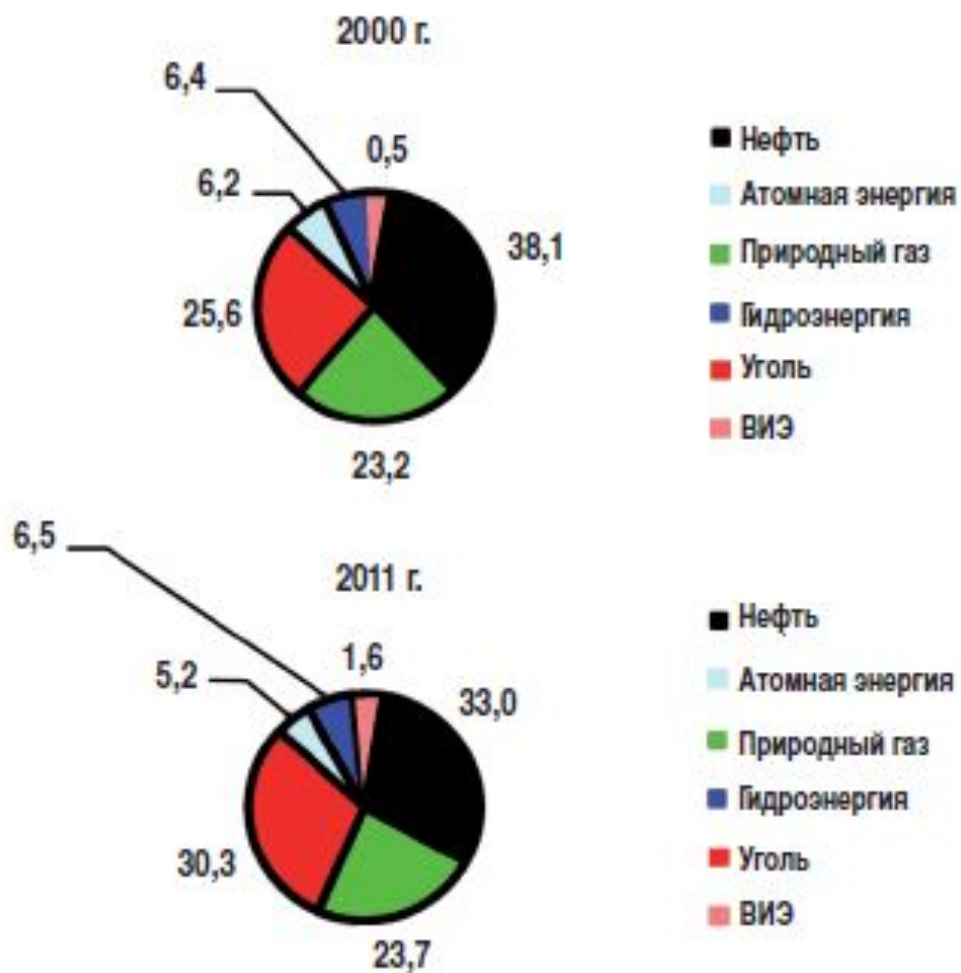
ИНТЕРЕСНО



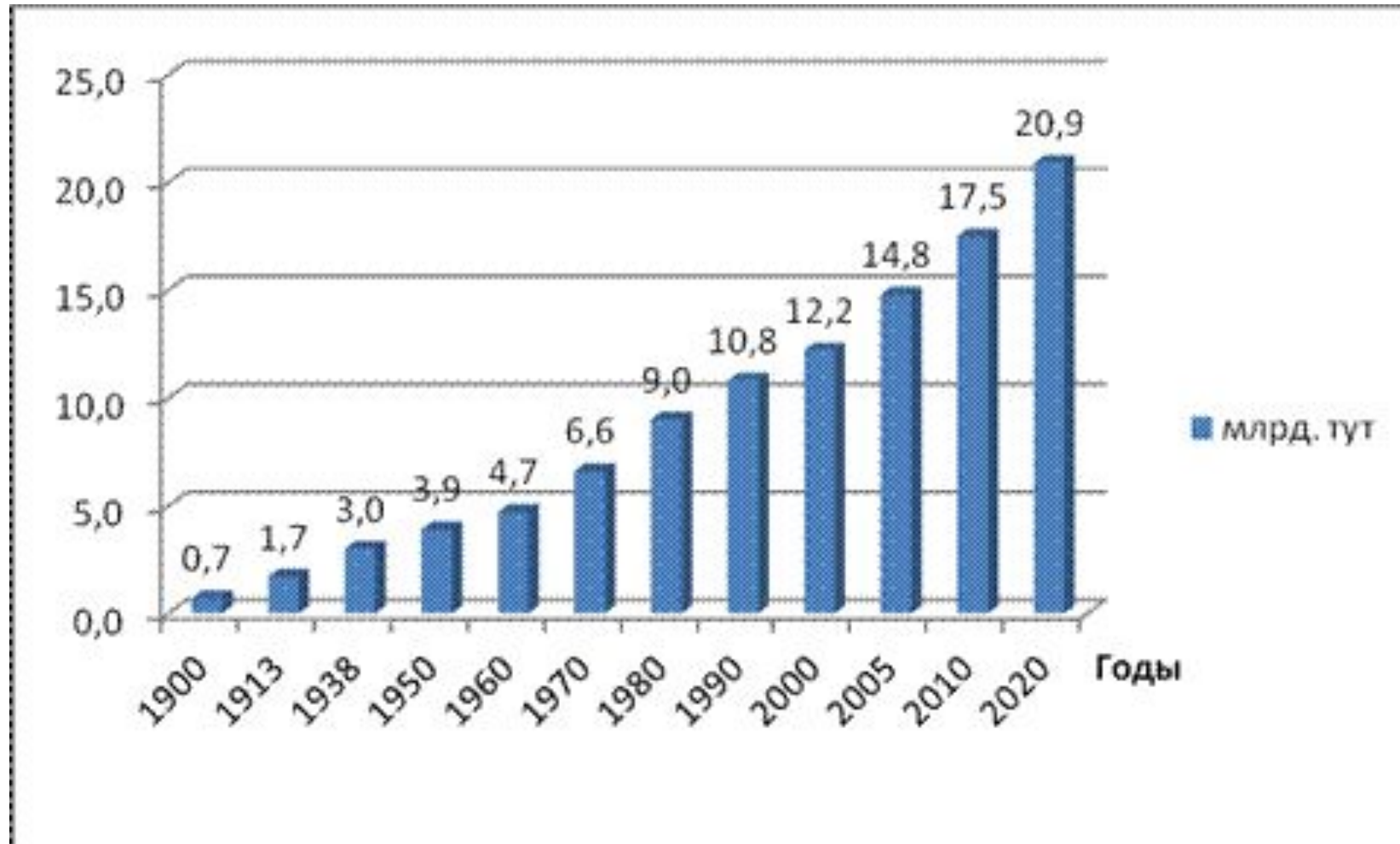
	Газ		Уголь		Нефть	
	трлн м ³	мир. Доля	млрд тонн	мир. Доля	млрд барр	мир. Доля
Все страны мира	185,7		891,5		1687,9	
 США	9,3	5%	237,3	27%	44,2	3%
 КНР	3,3	2%	114,5	13%	18,1	1%
 Россия	31,3	17%	157,0	18%	93,0	6%
 Великобритания	0,2	0%	0,2	0%	3,0	0%
 Франция						
 Индия	1,4	1%	60,6	7%	5,7	0%
 Германия	0,0	0%	40,5	5%		
 Япония			0,3	0%		
 Бразилия	0,5	0%	6,6	1%	15,6	1%
 Мексика	0,3	0%	1,2	0%	11,1	1%
 Италия	0,1	0%			1,4	0%
 Южная Корея			0,1	0%		
 Канада	2,0	1%	6,6	1%	174,3	10%
 Иран	33,8	18%			157,0	9%
 Турция			8,7	1%		
 Испания			0,5	0%		
 Австралия	3,6	2%	76,4	9%	4,0	0%
 Индонезия	2,9	2%	28,0	3%	3,7	0%
 Саудовская Аравия	8,2	4%			265,9	16%
Остальные		48%		17%		53%

- ▶ Самые большие запасы нефти по последним оценкам находятся в Венесуэле - порядка трёхсот миллиардов баррелей, ~18% мировой доли (при осознании этого факта становится более ясно почему США и Евросоюз видят в Боливарианской республике «мало демократии»). С таким большим богатством нужен, конечно, и большой защитник, иначе может постичь судьба Ирака, на территории которого ~9% доказанных запасов Земли. ОАЭ и Кувейт осчастливлены двумя 6% долями нефтяного пирога.
- ▶ Не по рангу много газа у Катара - ~25%. Также не вошёл в таблицу Туркменистан с ~18%. ОАЭ, Венесуэла, Нигерия и Алжир оценочно обладают по ~5-6% мировых объёмов природного газа.

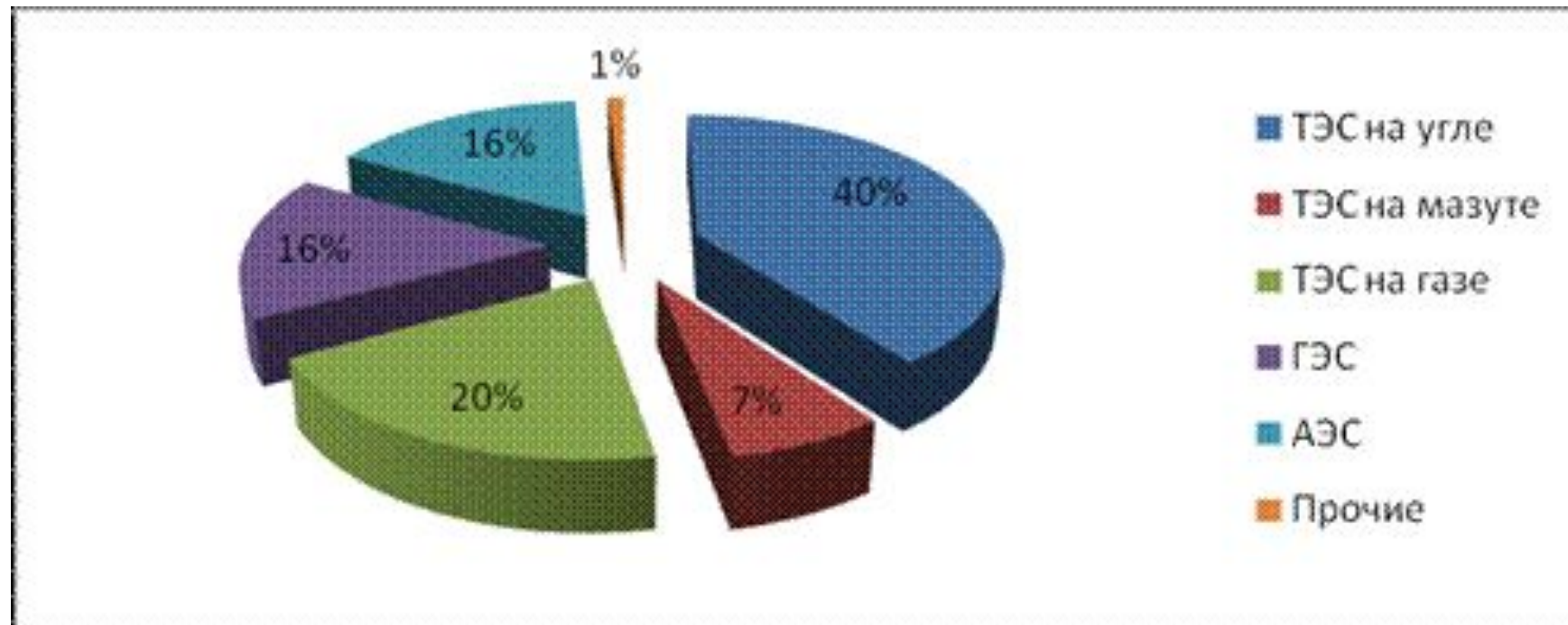
Структура потребления традиционных энергоресурсов в мире



Динамика мирового потребления ПЭР в 20-м - начале 21-го вв. с прогнозом до 2020 г., в млрд. т.у.т.



Структура мирового производства электроэнергии на 2008 год



Структура и динамика мирового энергопотребления по видам энергоресурсов в 2000 - 2011 гг.

					Среднегодовые темпы прироста, %		
	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2011 г.	2000 - 2005 гг.	2005 - 2010 гг.	2011 г. к 2010 г.
Глобальное энергопотребление, млн т н.э. Распределение (в %)	9382 (100,0)	10755 (100,0)	11978 (100,0)	12275 (100,0)	2,9	2,3	2,5
Нефть	3572 (38,1)	3902 (36,3)	4032 (33,7)	4059 (33,0)	1,8	0,7	0,7
Газ	2176 (23,2)	2498 (23,2)	2843 (23,7)	2906 (23,7)	3,0	2,8	2,3
Уголь	2400 (25,6)	2982 (27,7)	3532 (29,5)	3724 (30,3)	4,9	3,7	5,4
Атомная энергия	584 (6,2)	625 (5,8)	626 (5,2)	599 (4,9)	1,4	0	-4,3
Гидроэнергия	599 (6,4)	662 (6,2)	779 (6,5)	792 (6,5)	2,1	3,5	1,7
ВИЭ ²⁾	51 (0,5)	84 (0,8)	166 (1,4)	195 (1,6)	12,9	19,5	17,5