

Теплотехника и металлургические печи

Источники тепловой энергии

- ▶ **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.

- ▶ 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* , *влага 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.

100% основного состава сульфидов.

Отношение топлива к нагреванию определяется по изменению состава топлива при его нагревании, характеристике получаемых продуктов и температуре, при которой наблюдаются изменения состава и свойств топлива. По отношению к нагреванию все разновидности топлива делятся на теплоустойчивые и теплоластойчивые. Теплоустойчивые виды топлива при нагревании разлагаются с образованием новых соединений: горючих газов, кокса и т. п. Почти все виды естественного (природного) топлива могут быть отнесены к теплоустойчивым, особенно твердое топливо. Теплоластойчивые виды топлива — это преимущественно искусственное топливо, прошедшее уже ту или иную обработку (древесный уголь, кокс, термантрацит, газы). Отношение топлива к нагреванию очень важно для рациональной организации процессов переработки топлива — газификации, коксования, перегонки, а также для процессов сжигания топлива.

Свойства топлива зависят главным образом от его химического состава. Основным элементом любого топлива природного происхождения является углерод (его содержание составляет от 30 до 85% массы). В состав топлива также входят H, O, N, S, зола, влага

Практическая ценность топлива определяется количеством теплоты, выделяющейся при его полном сгорании. Так, при сжигании 1 кг древесины выделяется теплота, равная 10,2 МДж, каменного угля - 22 МДж, бензина - 44 МДж. Эта величина прямо зависит от содержания в топливе углерода и водорода и обратно - от содержания кислорода и азота.

Другая важнейшая характеристика топлива - его жаропроизводительность, оцениваемая значением максимальной температуры, которую теоретически можно получить при полном сгорании топлива в воздухе. При сгорании дров, например, максимальная температура не превышает 1600°C , каменного угля - 2050°C , бензина - 2100°C .

Топливо	твердое	жидкое	газообразное
Природное	каменный уголь, антрацит, торф, бурый уголь, сланцы	дрова, уголь, нефть	природный газ, попутный газ нефтяных месторождений
Искусственное	деревянный уголь, полукокс, брикет торфа и угля	уголь, бензин, кокс, 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

Элементарный состав твердых и жидких топлив

Элементарный состав твердых и жидких топлив записывается в виде суммы содержания в них углерода C , водорода H , кислорода O , серы S , азота N , золы A и влаги W (в процентах). В зависимости от того, какая масса топлива берется в расчет, каждому числу присваивается соответствующий надстрочный индекс:

Горючая масса:

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

Сухая:

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

Рабочая:

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

Коэффициенты пересчета масс топлива

Заданная масса топлива	Масса топлива, на которую делается пересчет		
	Горючая	Сухая	Рабочая
Горючая	1	$\frac{100\% - A^c}{100\%}$	$\frac{100\% - (W^p + A^p)}{100\%}$
Сухая	$\frac{100\%}{100\% - A^c}$	1	$\frac{100\% - W^p}{100\%}$
Рабочая	$\frac{100\%}{100\% - (W^p + A^p)}$	$\frac{100\%}{100\% - W^p}$	1

- Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности (зольности) на другую проводится по формуле:

$$X_{p_1}^p = x^{p*} (100 - W_{p_1}^p) / (100 - W^p);$$

$$X_{p_1}^p = x^{p*} (100 - A_{p_1}^p) / (100 - A^p).$$

Углерод

- Углерод является основным горючий элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 50-65%, в бурых углях 67-72%, каменных углях 76-90% и в антрацитах 92-94%, т.е. с увеличением геологического возраста твердого топлива содержание в нем углерода повышается. Состав жидких нефтяных топлив является достаточно стабильным и содержание в них углерода на горючую массу колеблется в узких пределах 86-87%.
- Углерод характеризуется высоким удельным тепловыделением. При полном сгорании 1 кг углерода выделяется 33600 кДж теплоты. Следовательно, углерод по существу определяет тепловую ценность топлива.

Водород

- Водород является вторым важнейшим горючим элементом топлива. Его содержание на горючую массу составляет: в древесине и торфе 6,0-6,5 % , в бурых углях около 5,0 %, в каменных углях 4,0-5,5 % и антрацитах 1,5-2,5 %. В жидких нефтяных топливах содержание водорода значительно выше и на горючую массу составляет 10-12 %. Тепловая ценность водорода почти в четыре раза выше тепловой ценности углерода. При полном сгорании 1 кг водорода и конденсации продуктов сгорания выделяется 141500 кДж тепла, без учета конденсации водяных паров 119000 кДж.

Сера

- Сера, является третьим, весьма нежелательным, горючим элементом топлива. В общем случае сера топлива состоит из серы органической (S_o), входящей в топливо в виде органических соединений, серы колчеданной (S_k), входящей в состав топлива в виде колчедана (FeS_2), и серы сульфатной (S_c), входящей в топливо в виде, например, гипса ($CaSO_4$). Сера органическая и колчеданная образуют серу горючую (летучую) $S_a = S_o + S_k$. Сульфатная же сера не горит, и в элементарном составе топлива включается в золу. Содержание серы в топливах колеблется от 0 до нескольких %. При полном сгорании 1 кг серы летучей выделяется 9000 кДж тепла.

Кислород и азот

- Кислород и азот являются нежелательными элементами топлива. Наличие их в топливе снижает содержание горючих элементов. Кислород, кроме того, связывает часть горючих элементов топлива, обесценивает его. Азот в топливе способствует образованию в газообразных продуктах сгорания окислов азота, обладающих высокой токсичностью, значительно превышающей токсичность окислов серы.

Зола

- Зола представляет собой смесь различных минеральных веществ, которые остаются после полного сгорания горючей части топлива. Содержание золы обычно дается на сухую массу. Зольность жидких топлив нормируется ГОСТами и по своему значению невелика. Например, для дизельного топлива не более 0,02%, для топочных мазутов не более 0,30 %. В твердых топливах содержание золы может достигать значительных величин (до 30 % и более на сухую массу). Зола является внешним балластом топлива.

Влага

- Влага относится к внешнему балласту топлива. Наличие её (так же, как кислорода и азота) уменьшает содержание горючей части топлива. Это снижает тепловую ценность топлива, а также увеличивает расходы на его транспорт. Влага, кроме того, снизит полезное тепловыделение топлива, поскольку часть тепла при горении расходуется на превращение её в пар. Это ведёт также к понижению температурного уровня в зоне горения и ухудшает условия теплообмена.

- Теплота сгорания газообразных топлив подсчитывается (в МДж/ м³) как сумма произведений теплоты сгорания отдельных компонентов и их содержания в 1 м³ газообразного топлива:

$$Q_{\text{H}}^{\text{c}} = 0,126\text{CO} + 0,358\text{CH}_4 + 0,58\text{C}_2\text{H}_2 + 0,108\text{H}_2 + \dots$$

Характеристики ТОПЛИВ

Газообразное топливо

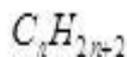
- Газообразное топливо состоит из горючих и негорючих компонентов
- К **горючим компонентам** относятся: окись углерода (CO), водород (H₂), углеводороды (C_mH_n), сероводород (H₂S).
- К **негорючим компонентам** относятся: углекислый газ (CO₂), азот (N₂), сернистый газ (SO₂), водяной пар (H₂O), кислород (O₂). Это балластные составляющие. Их присутствие в топливе приводит к понижению температуры его горения. Содержание в топливе более 0,5% свободного кислорода считается опасным по условиям техники безопасности
- Различают сухой и влажный газ (рабочий газ). В первом случае при каждом компоненте ставят значок “с”, а во втором “в” или “р”
- Теплоту сгорания газообразного топлива подсчитывают по компонентному составу
- Теплота сгорания газообразного топлива равна сумме теплот горения газообразных горючих составляющих (кДж/м³):

$$Q_{н}^p = 127,7CO + 108H_2 + 356CH_4 + 590C_2H_4 + 636C_2H_6 + 918C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 234H_2S$$

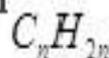
Сравнительная характеристика разновидностей газообразного топлива приведена в табл. 21. Горючие газы делятся на две категории: 1) высококалорийные с теплотворностью более 3000 ккал/м^3 — естественный, коксовый и полукоксовый, светильный, нефтяной; 2) низкокалорийные с теплотворностью менее 3000 ккал/м^3 — генераторный, доменный, подземной газификации. Для отопления металлургических печей наибольшее значение имеют естественный, коксовый, генераторный и доменный газы. Остальные чаще используют для бытовых и энергетических нужд, а также в виде сырья для химической промышленности.

Газообразное топливо обладает по сравнению с твердым и жидким топливом рядом преимуществ, к которым относятся: 1) простота и отличная регулируемость процесса сжигания при малом избытке воздуха и полном сгорании; 2) возможность высокотемпературного подогрева топлива и воздуха перед сжиганием; 3) возможность транспортировки на большие расстояния по трубам; 4) малое содержание минеральной пыли; 5) возможность получения из низкосортного твердого топлива.

- ▶ Основными элементами газообразного топлива являются



- ▶ предельные углеводороды



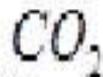
- ▶ непредельные углеводороды



- ▶ водород



- ▶ оксид углерода



- ▶ диоксид углерода



- ▶ сероводород



- ▶ водяной пар



- ▶ кислород



- ▶ азот

- ▶ Состав газовой смеси

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

- ▶ 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.

Характеристика твердого топлива по средним показателям

Виды топлива	Состав рабочего топлива, % (по массе)							Отношение к нагреванию		Q_{II}^P , ккал/кг	$t_{к'}$, °C	$L_{теор}$, м ³ /кг	$V_{г'}$, м ³ /кг
	C ^P	H ^P	O ^P	S ^P	N ^P	A ^P	w ^P	выход летучих, % от горючей массы $L_{г'}$	температура воспламенения, °C				
<i>Естественное</i>													
Дрова (воздушносухие)	36,5	4,5	32	Нет	1	1	25	85	300	3100	1700	3,4	4,2
Торф (воздушносухой)	37,4	4,2	22	0,4	1,2	4,8	30	70	225	3340	1750	3,7	4,5
Бурый уголь	48,1	3,4	11,7	1,0	1,2	15,6	19	41	400	4340	1800	4,8	5,3
Каменный уголь	70	4,4	8,3	2,0	1,0	8	6	35	500	6500	2100	7,2	7,6
Антрацит	84	3	2	1	1	4	5	7	700	7000	2100	8,2	8,5
Горючие сланцы	19,4	2,3	2,4	0,4	4,1	53,1	10,1	80	—	1890	—	—	—
<i>Искусственное</i>													
Древесный уголь	70,6	3,5	O ^P + N ^P 14,1	—	—	1,8	10	4	350	6190	2100	6,8	7,0
Кокс	83,5	0,8	0,6	0,6	1,5	9	4	2	700	6600	2200	7,6	7,7

Характеристика жидкого топлива по средним показателям

Виды топлива	Состав рабочего топлива, % (по массе)						Температура воспламенения, °C	Q_H^p , ккал/кг	t_k , °C	$L_{теор}$, м ³ /кг	$V_{Г}$, м ³ /кг
	C^p	H^p	O^p+N^p	S^p	A^p	ω^p					
<i>Естественное</i>											
Нефть	85	12	0,9	0,1—4,0	0,2	1	360	9 800	2100	10,9	11,6
<i>Искусственное</i>											
Бензин	85	14,9	0,05	0,05	0	0	410	10 450	1900	11,6	12,4
Керосин	86	13,7	0,1	0,2	0	0	270	10 260	1900	11,4	12,2
Моторное топливо	85,1	12,5	0,45	0,4	0,05	1,5	500	9 880	2000	10,7	11,4
Мазут малосернистый	85,3	10,2	0,7	0,5	0,3	3,0	550	9 310	2090	10,0	10,9
Мазут сернистый . .	82,5	10,6	0,5	3,1	0,3	3,0	550	9 280	2050	10,2	11,1
Смола каменноугольная от коксования	84,5	6,6	1,9	1	1	5	—	8 500	2040	11,5	10,5
Смола буроугольная от полукоксования	80,0	10,3	2,8	1	1	5	—	8 900	2000	12,1	10,6
Смола или масло сланцевое	79,0	9,8	4,7	0,5	1	5	—	8 700	2000	11,9	10,9

Теплотворная способность некоторых топлив

Вид топлива	Теплотворная способность твердого и жидкого топлива, ккал/кг (средние значения)
Дрова с влажностью: 25%	3300
30%	3000
50%	2800
Торф кусковой (W=30%), Торф брикетный	3000 4000
Подмосковный уголь	3000
Бурый уголь	4700
Каменный уголь	500 - 7200
Антрацит	7000
Нефть	10000
Мазут	9000-9700

Физика горения

The background of the slide is white with abstract green geometric shapes on the right and bottom edges. These shapes consist of overlapping triangles and polygons in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. The overall style is clean and modern.

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

Процессы горения разделяют на 2 группы:

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

- ▶ 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 теплоэнергетических установках практическое значение имеет такая **скорость реакции**, при которой происходит устойчивое **горение**, т.е. при постоянной подаче в зону **горения топлива** и **окислителя**. При этом соотношение **концентрации топлива** и **окислителя** должен быть определенным. При нарушении этого соотношения (богатая смесь, бедная смесь) **скорость реакции** снижается и уменьшается тепловыделение на единицу объема.

Горение – это в основном химический процесс, т.к. в результате его протекания происходят 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 топлива** складывается из времени протекания физических ($\tau_{\text{физ}}$) и химических процессов ($\tau_{\text{хим}}$):

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

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

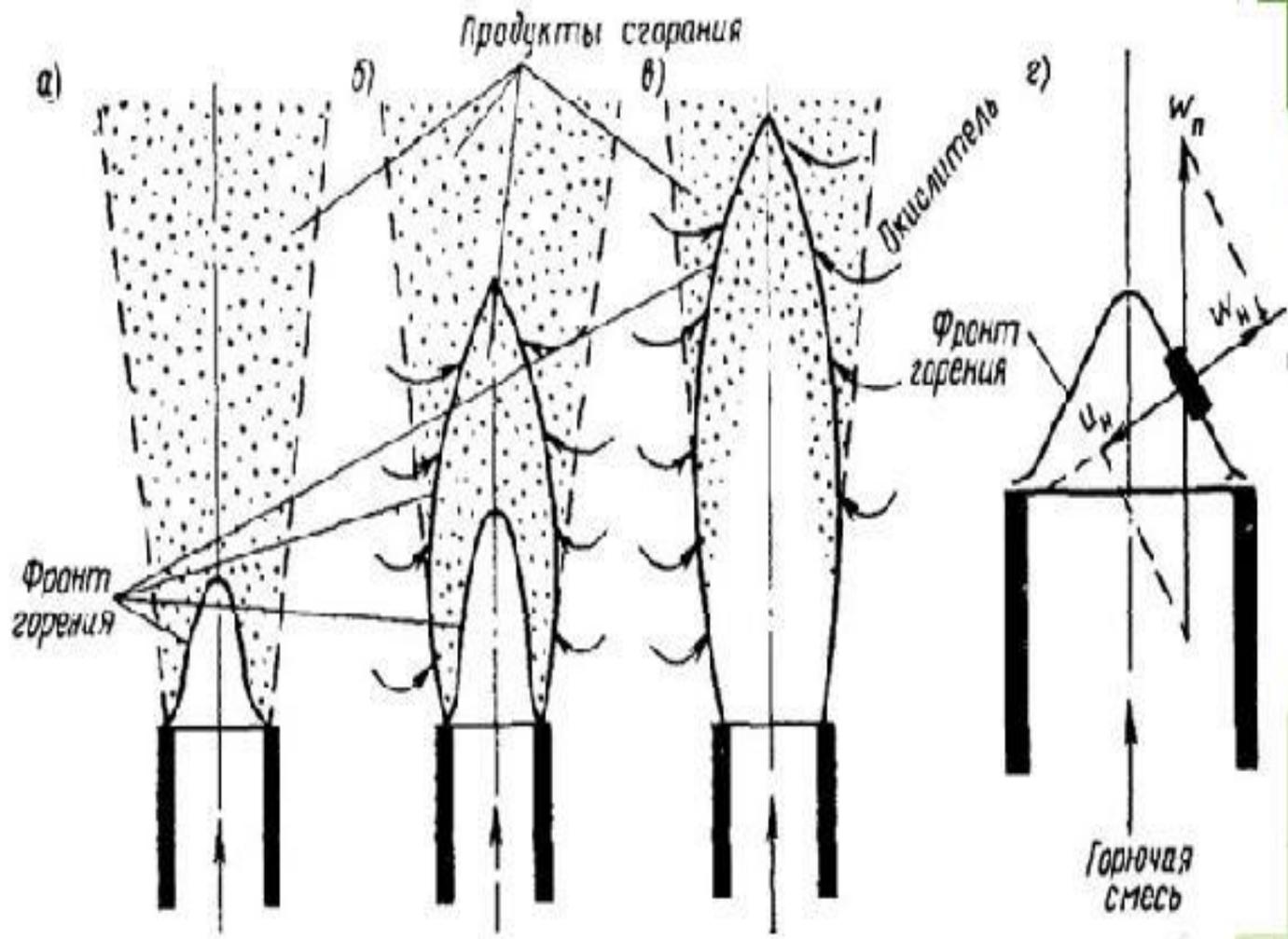
Особенности сжигания топлив

Горение газообразного топлива

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.

Горючий газ в смеси с окислителем сгорает в факеле. Различают два метода сжигания газа в факеле - кинетический и диффузионный. При кинетическом сжигании до начала горения газ предварительно смешивается с окислителем. Газ и окислитель подаются сначала в смешивающее устройство горелки. Горение смеси осуществляется вне пределов смесителя. При этом скорость горения не должна превышать скорости химических реакций горения $\tau_{гор} = \tau_{хим}$.

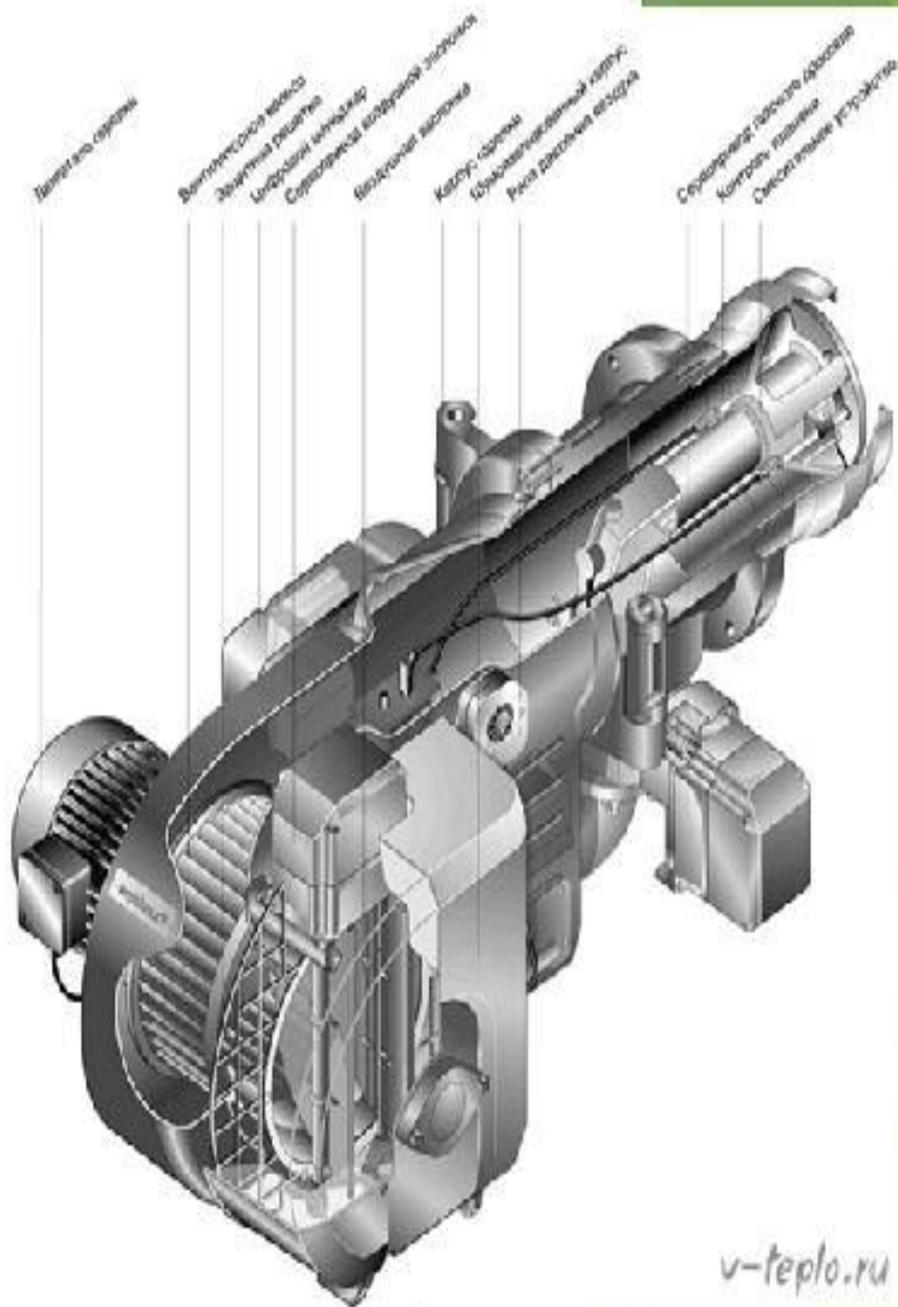
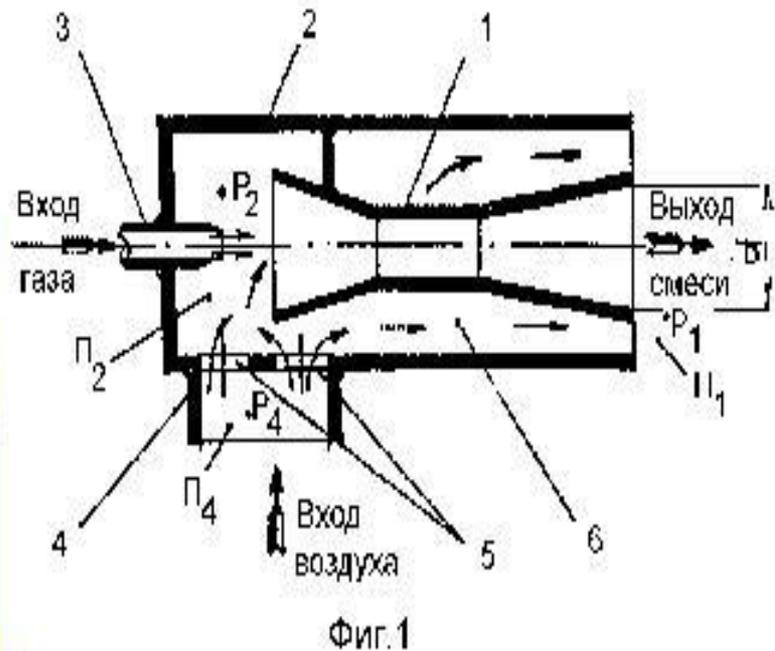
- ▶ Диффузионное **горение** происходит в процессе смешивания горючего **газа** с **воздухом**. **Газ** поступает в рабочий объем отдельно от **воздуха**. Скорость процесса будет ограничена скоростью смешивания **газа** с **воздухом** $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{физ}}$.
- ▶ Кроме этого существует смешанное (диффузионно-кинетическое) **горение**. При этом **газ** предварительно смешивается с некоторым количеством **воздуха**, затем полученная смесь поступает в рабочий объем, где отдельно подается остальная часть **воздуха**.



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).



В горелке с естественной тягой воздуха используется принцип инъекции, 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 инъекции (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:

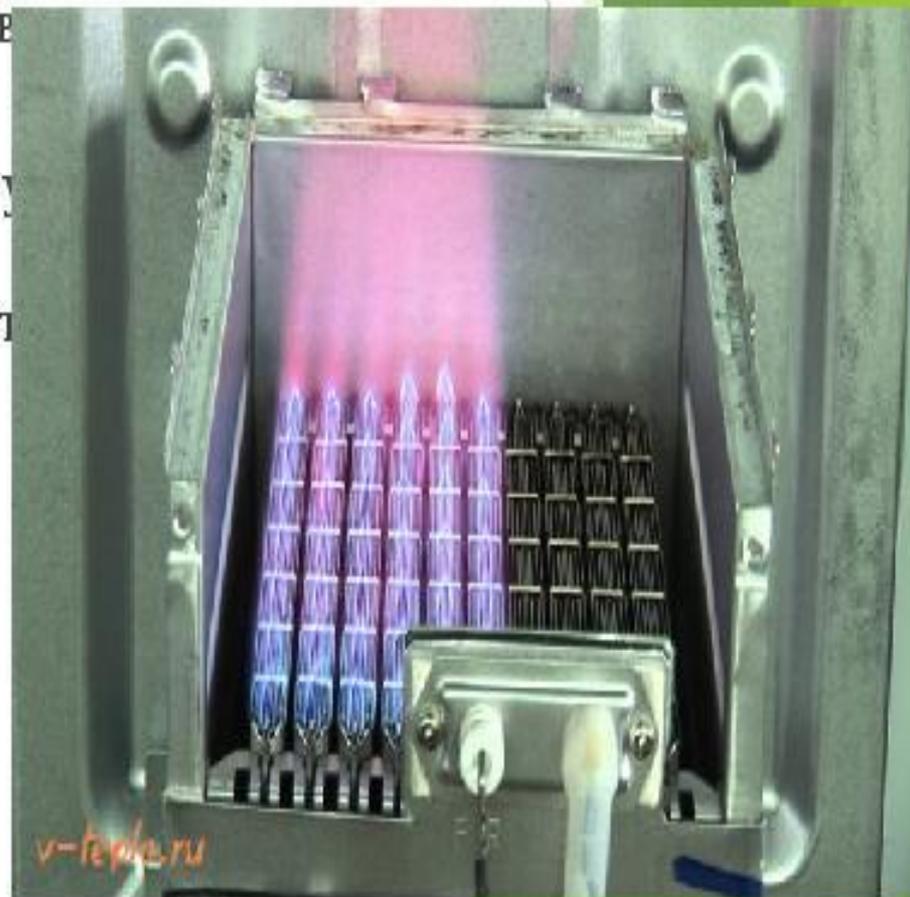
- ▶ Газовые горелки с частичным предварительным смешиванием (например, - 50%);
- ▶ Газовые горелки с полным предварительным смешиванием (100%);
- ▶ Диффузионные горелки.

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 в

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



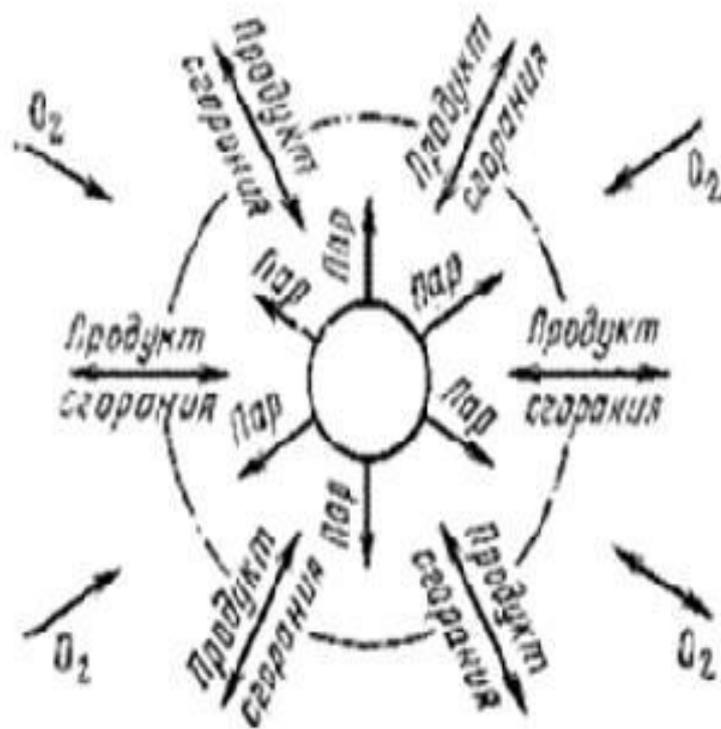
Горение жидкого топлива

Основным жидким **топливом**, используемым в теплоэнергетике и промышленной **теплотехнике** является **мазут**. 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:

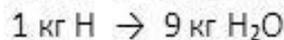
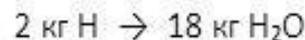
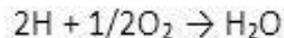
- ▶ 1) подсушка **топлива** и нагревание до **температуры** начала выхода летучих веществ;
- ▶ 2) воспламенение летучих веществ и их выгорание;
- ▶ 3) нагревание кокса до воспламенения;
- ▶ 4) выгорание горючих веществ из кокса.

Эти стадии иногда частично накладываются одна на другую.

Выход летучих веществ у различных топлив начинается при различных температурах: у торфа при 550-660К, у бурых углей при 690-710К, у тощих углей и антрацита при 1050-1070К.

Теплота сгорания топлива

- Энергетическая ценность топлива, в первую очередь, определяется его теплотой сгорания или теплотворностью Q
- **Теплота сгорания** - количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы массы (для твёрдых и жидких топлив) или единицы объема (для газообразных топлив) топлива [кДж/кг, кДж/м³, ккал/кг или ккал/м³]
- Теплотворность различных видов топлива колеблется в широких пределах — от 4000 до 40 000 кДж/кг
- В зависимости от агрегатного состояния влаги в продуктах сгорания различают **высшую** и **низшую теплоту сгорания**
- Влага в продуктах сгорания топлива образуется при горении горючей массы водорода H , а также при испарении начальной влаги топлива W . В продукты сгорания попадает также и влага воздуха, использованного для горения. Однако ее обычно не учитывают.



- При содержании в топливе водорода с горючей массой H кг при горении образуется $9H$ кг влаги. При этом в продуктах сгорания содержится $(9H + W)$ кг влаги. На превращение 1 кг влаги в парообразное состояние затрачивается около 2500 кДж теплоты
- Теплота, затраченная на испарение влаги, не будет использована, если конденсации паров воды не произойдет. В этом случае получим низшую теплоту сгорания
- **Низшая теплота сгорания** Q_n — это теплота сгорания топлива, вычисленная при условии, что после его сгорания вода находится в виде пара. Низшую теплоту сгорания учитывают для подсчета потребности в топливе и его стоимости, при составлении тепловых балансов и определении коэффициентов полезного действия установок, использующих топливо
- **Высшая теплота сгорания** Q_v — это теплота сгорания топлива, вычисленная при условии, что вся вода, образующаяся при сгорании, конденсируется в жидкость и охлаждается до первоначальной температуры, с которой топливо поступает на горение

$$Q_n = Q_v - 25(H+W)$$

Определение теплоты сгорания топлива

- Теплоту сгорания определяют двумя методами: экспериментальным и расчетным
- **Экспериментальный метод:** для определения теплоты сгорания применяют калориметры (калориметрическую бомбу)
- **Методика определения:** навеску топлива сжигают в калориметре, теплота, выделяющаяся при горении топлива, поглощается водой. Зная массу воды, по изменению ее температуры можно вычислить теплоту сгорания
- **Расчетный метод:** теплоту сгорания рассчитывают по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_H^p = 339,3C_p + 1256H_p - 109(O_p - S_p) - 25,14(9H_p + W_p) \text{ кДж/кг},$$

где C_p , H_p , O_p , S_p и W_p соответственно содержание углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в рабочем топливе, %.

- **Условное топливо** – это понятие, которое используют для нормирования и учета расхода топлива
- Условным принято называть топливо с низшей теплотой сгорания (29 310 кДж/кг или 7000 ккал/кг) Для перевода любого топлива в условное следует разделить его теплоту сгорания на 29 310 кДж/кг, т. е. найти эквивалент данного топлива: например, для мазута он равен 1,37-1,43, для природных газов – 1,2-1,4.

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 339C^{\text{p}} + 1025H^{\text{p}} - 108,5(O^{\text{p}} - S^{\text{p}}) - 25W^{\text{p}}$$

кДж/кг

- Минимальное (теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива), находится по формуле (в м³/ кг)

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,265H^p - 0,0333 (O^p - S^p)$$

Действительное количество воздуха определяется произведением коэффициента избытка воздуха α и теоретического количества воздуха (в м³/кг)

$$V_{\text{д}} = \alpha V^0$$

Минимальный (теоретический) объем
воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3
газообразного топлива, ($\text{ м}^3 / \text{ м}^3$)

$$V_0 = 0,0476 [0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum(m + n/4)\text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2]$$

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}$$

Газообразное топливо (2)

- Высшую и низшую теплоту сгорания газообразного топлива с высоким содержанием метана можно посчитать по формулам:

$$Q_B = 30,2CO + 30,5H_2 + 95CH_4 + 166C_2H_6 + 237C_3H_8 + 307C_4H_{10} + 377C_5H_{12} + \\ + 150C_2H_4 + 220C_3H_6 + 290C_4H_8 + 360C_5H_{10} + + 350C_6H_6 + 61H_2S \text{ (ккал/м}^3\text{)}$$

$$Q_H = 30,2CO + 25,8H_2 + 85,5CH_4 + 152C_2H_6 + 218C_3H_8 + 283C_4H_{10} + 349C_5H_{12} + \\ + 141C_2H_4 + 205C_3H_6 + 271C_4H_8 + 337C_5H_{10} + 335C_6H_6 + 56H_2S \text{ (ккал/м}^3\text{)}$$

Теоретические объемы продуктов сгорания, полученные при полном сгорании твердого и жидкого топлив без учета химического недожога с теоретически необходимым количеством воздуха ($\alpha=1$), $\text{нм}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{CO}_2}^0 = 1,866 \frac{C^p}{100}$$

$$V_{\text{SO}_2}^0 = 0,699 \frac{S_{\text{op}}^p}{100} + 0,9611 \frac{S_{\text{к}}^p}{100}$$

$$V_{\text{RO}_2}^0 = 1,866 \frac{C^p + 0,375S_{\text{л}}^p}{100}$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,1112H^p + 0,01244W^p + 0,0161V_{\text{с}}^0$$

При наличии парового дутья или парового распыливания мазута при расходе пара $G_{\text{п}}$, $\text{кг}/\text{кг}$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,1112H^p + 0,01244W^p + 0,0161V_{\text{с}}^0 + 1,244G_{\text{п}}$$

Состав и объем продуктов сгорания

В случае газообразного топлива выражения для определения состава продуктов сгорания остаются без изменения с заменой весовых процентов на объемные.

Объемы продуктов сгорания при сжигании 1 м³ сухого газообразного топлива в нм³/нм³:

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum(m+n/4)C_mH_n - O_2]$$

$$V^0_{N_2} = 0,79V^0 + N_2/100$$

$$V_{RO_2} = 0,01[CO_2 + CO + SO_2 + H_2S + \sum mC_mH_n],$$

Объем водяного пара в нм³/нм³

$$V^0_{H_2O} = 0,01[H_2 + H_2S + \sum(n/2)C_mH_n + 0,124d_{г.тл}] + 0,161V^0$$

$d_{г.тл}$ – влагосодержание газообразного топлива, отнесенное к 1 м³ сухого газа, г/м³.

Влагосодержание продуктов сгорания в г/кг_{пс}

$$d_{пс} = 804V_{H_2O} / (1,977 V_{RO_2} + 1,251V_{N_2} + 1,429V_{O_2}).$$

Примеры решения задач

Задача 1

- Определить количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1 кг следующего состава:

$$C^p = 37,2\%; H^p = 2,6\%; S^p = 0,6\%; N^p = 0,4\%; O^p = 12\%; W^p = 40\%; A^p = 7,2\%.$$

Решение

- $V^0 = 0,0889 * 37,2 + 0,265 * 2,6 - 0,033 * (12,0 - 0,6) = 3,613 \text{ м}^3/\text{кг}$

Задача 2

Определить состав рабочей массы топлива, если в таблицах указан следующий состав $C_p = 38,6\%$; $H_p = 2,6\%$; $S_p = 3,8\%$; $N_p = 0,8\%$; $O_p = 3,1\%$; $W_p = 11,0\%$; $A_p = 40,1\%$, а технический анализ показал, что действительная влажность составляет $W_{p1} = 16\%$. Какова при этом будет теплота сгорания?

Решение

1. Пересчет элементарного состава топлива с одной влажности на другую проводится по формуле

$$X^{p_1} = X^p * ((100 - W^{p_1}) / (100 - W^p));$$

$$C^{p_1} = 36,4\%$$

$$H^{p_1} = 2,4\%$$

$$O^{p_1} = 2,9\%$$

$$S^{p_1} = 3,6\%$$

$$N^{p_1} = 0,8\%$$

$$A^{p_1} = 37\%$$

2. Теплота сгорания по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_{H1}^p = 339 * C^{p_1} + 1025 * H^{p_1} - 108,5 * (O^{p_1} - S^{p_1}) - 25W^{p_1} = 14,5 \text{ МДж/ кг.}$$

Пример расчета горения мазута. Для показа практического использования приведенных выше формул и графиков для расчетов горения топлива проводим расчет горения мазута. Исходный мазут имеет следующий состав, % (по массе):

$$C^{\Gamma} = 88,3; \quad H^{\Gamma} = 10,5; \quad O^{\Gamma} + N^{\Gamma} = 0,7; \quad S^{\Gamma} = 0,5; \quad w^P = 3; \quad A^c = 0,31.$$

Пересчитаем состав топлива на рабочую массу, %, используя коэффициенты табл. 16.

$$A^P = A^c \frac{100 - w^P}{100} = 0,31 \frac{100 - 3}{100} = 0,3;$$

$$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - (w^P + A^P)}{100} = 88,3 \cdot 0,967 = 85,3;$$

$$H^P = H^{\Gamma} \frac{100 - (w^P + A^P)}{100} = 10,5 \cdot 0,967 = 10,2;$$

$$O^P + N^P = 0,7 \cdot 0,967 = 0,7;$$

$$S^P = 0,5 \cdot 0,967 = 0,5;$$

$$w^P = 3,0;$$

Итого 100%.

Теплотворность мазута по формуле (158), принимая, что $O^P = \frac{1}{2} (O^P + N^P)$

$$Q_H^P = 78,3 \cdot 85,3 + 289 \cdot 10,2 - 26 \cdot (0,35 - 0,5) - 6 \cdot (9 \cdot 10,2 + 3) = 9070 \text{ ккал.}$$

Теоретическое количество сухого воздуха при $U = 21\%$ и $d_B = 0$ по формуле (163)

$$L_{\text{теор}} = 0,0889 \cdot 85,3 + 0,2667 \cdot 10,2 + 0,0333 \cdot (0,5 - 0,35) = 10,3 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Практическое количество воздуха при заданном коэффициенте избытка $\alpha = 1,15$ по формуле (164)

$$L_{\text{пр}} = 1,15 \cdot 10,3 = 11,9 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Количество продуктов горения, $\text{м}^3/\text{кг}$, по формулам (165):

$$V_{\text{CO}_2} = 0,0187 \cdot 85,3 = 1,6;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112 \cdot 10,2 + 0,0124 \cdot 3 = 1,18;$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot 0,5 = 0,0035;$$

$$V_{\text{O}_2} = \frac{21}{100} (1,15 - 1) \cdot 10,3 = 0,325;$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,008 \cdot 0,35 + \left(1 - \frac{21}{100}\right) \cdot 11,9 = 9,4.$$

Общее количество газов от горения по формуле (166)

$$V_{\Gamma} = 1,6 + 1,18 + 0,0035 + 0,325 + 9,4 = 12,5 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Состав продуктов горения, %, по формулам (167):

$$\text{CO}_2 = \frac{1,6}{12,5} \cdot 100 = 12,8;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{1,18}{12,5} \cdot 100 = 9,45;$$

$$\text{SO}_2 = \frac{0,0035}{12,5} \cdot 100 = 0,03;$$

$$\text{O}_2 = \frac{0,325}{12,5} \cdot 100 = 2,6;$$

$$\text{N}_2 = \frac{9,4}{12,5} \cdot 100 = 75,12;$$

Итого 100.

Плотность продуктов горения по формуле (173)

$$\rho = \frac{44 \cdot 12,8 + 18 \cdot 9,45 + 28 \cdot 75,12 + 32 \cdot 2,6 + 64 \cdot 0,03}{22,4 \cdot 100} = 1,29 \text{ кг/м}^3.$$

Для проверки проделанного расчета горения мазута составляем материальный баланс процесса горения на 1 кг исходного топлива:

	Приход, кг
1. Мазут	1
2. Воздух	$11,9 \cdot 1,29 = 15,4$
<hr/>	
Итого	16,4

	Расход, кг
1. Газообразные продукты горения	$12,5 \cdot 1,29 = 16,1$
2. Зола топлива	0,3
<hr/>	
Итого	16,4

Теоретическая температура горения мазута определяется по формуле (161) и графику рис. 100 из условия подогрева воздуха и мазута до 100°C . Вначале вычисляем физическое тепло, вносимое мазутом и воздухом:

$$Q_{\text{физ}} = 0,5 \cdot 100 + 11,9 \cdot 0,311 \cdot 100 = 420 \text{ ккал.}$$

Приняв приблизительное значение теоретической температуры горения мазута 2100°C , найдем тепло, идущее на диссоциацию H_2O и CO_2 . По графику рис. 100 при $t = 2100^{\circ}\text{C}$ и парциальном давлении

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \text{ и } p_{\text{CO}_2} = 0,1, \text{ величина } a = 0,06 \text{ и } b = 0,2.$$

Отсюда

$$Q_{\text{дисс}} = 2600 \cdot 0,06 \cdot 1,18 + 3000 \cdot 0,2 \cdot 1,6 = 1147 \text{ ккал.}$$

Напишем теперь формулу (161):

$$t_{\text{теор}} = \frac{9070 + 420 - 1147}{\sum V_{\Gamma} C_{\Gamma}} = \frac{8343}{\sum V_{\Gamma} C_{\Gamma}}.$$

При условии $t_{\text{теор}} = 2100^\circ \text{C}$ найдем значение $\sum V_{\text{r}}C_{\text{r}}$ с помощью развернутого расчета по теплоемкостям отдельных газовых составляющих (см. приложение):

$$\begin{aligned} \sum V_{\text{r}}C_{\text{r}} &= 1,6 \cdot 0,582 + 1,18 \cdot 0,474 + 0,0035 \cdot 0,569 + \\ &+ 0,325 \cdot 0,376 + 9,4 \cdot 0,356 = 4,98. \end{aligned}$$

При этом значении находим $t_{\text{теор}}$:

$$t_{\text{теор}} = \frac{8343}{4,98} = 1680^\circ \text{C}.$$

Так как полученная температура не совпадает с ранее принятой 2100°C , производим пересчет. Примем $t_{\text{теор}} = 1900^\circ \text{C}$ и определим для этого значения $Q_{\text{дисс}}$:

$$Q_{\text{дисс}} = 2600 \cdot 0,025 \cdot 1,18 + 3000 \cdot 0,1 \cdot 1,6 = 557 \text{ ккал}.$$

Значение $\sum V_{\text{r}}C_{\text{r}}$ при $t = 1900^\circ \text{C}$ будет

$$\begin{aligned} \sum V_{\text{r}}C_{\text{r}} &= 1,6 \cdot 0,575 + 1,18 \cdot 0,464 + 0,0035 \cdot 0,569 + \\ &+ 0,325 \cdot 0,373 + 9,4 \cdot 0,352 = 4,93. \end{aligned}$$

При полученных значениях величин находим $t_{\text{теор}}$:

$$t_{\text{теор}} = \frac{9070 + 420 - 557}{4,93} = \frac{8933}{4,93} = 1820^\circ \text{C}.$$

Это значение $t_{\text{теор}}$ может считаться окончательным, так как оно отличается от принятого для расчета диссоциации и теплоемкостей всего на 80 град .

Практическая температура горения $t_{\text{пр}}$ мазута в металлургической печи при величине пирометрического коэффициента $\eta_{\text{пир}} = 0,85$ определится по формуле (162)

$$t_{\text{пр}} = 0,85 \cdot 1820 = 1550^\circ \text{C}.$$

Проведем расчет горения мазута заданного состава с помощью диаграммы рис. 101:

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 9310 \text{ ккал/кг};$$

$$L_{\text{пр}} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{r}} = 12,6 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Состав продуктов сгорания, %: $12,8 \text{ CO}_2$; $10,3 \text{ H}_2\text{O}$; $2,5 \text{ O}_2$. Теоретическая температура горения при $\alpha = 1,15$ и $t_{\text{b}} = 100^\circ \text{C}$

$$t_{\text{теор}} = 1930^\circ \text{C}.$$

Теплосодержание продуктов сгорания 9670 ккал .

Индукционные печи. Подвод энергии к нагреваемому материалу в печах такого типа не требует контактных устройств, максимальный уровень температуры определяется только свойствами использованных огнеупоров. Преобразование электрической энергии в тепло происходит в объеме нагреваемого материала, а значит, возрастает тепловой коэффициент полезного действия. Возникающие электродинамические силы способствуют перемешиванию расплава в ванне печи, что ускоряет процесс и обеспечивает получение более однородного металла.

В *канальных индукционных печах* нагрев металла осуществляется в короткозамкнутом витке вторичной обмотки трансформатора – *канале*. Первичная обмотка трансформатора выполнена в виде многовитковой катушки – индуктора, который размещен на стальном магнитопроводе. Коэффициент трансформации равен отношению количества витков индуктора и вторичной обмотки W_2 . Поскольку канал является единственным витком в вторичной обмотки, $W_2 = 1$ и коэффициент трансформации численно равен числу витков индуктора W_1 .

Величина ЭДС пропорциональна индукции магнитного поля, сечению магнитопровода и частоте питающего тока. Индукция магнитного поля ограничена свойствами материала магнитопровода, по этой причине его выполняют в виде пакета листов электротехнической стали.

При прочих равных условиях повышение частоты питающего тока способствует увеличению мощности печи, поэтому наряду с печами промышленной частоты используют печи повышенной (200–400 Гц) и высокой частоты (до 100–150 кГц).

Так как активное сопротивление канала невелико, ток в нем достигает значительной величины и выделяет на активном сопротивлении канала количество тепла, достаточное для нагрева и плавления металла.

Взаимодействие магнитных потоков питающего тока и тока в канале вызывает сжимающий, моторный и вихревой электродинамические эффекты.

Сжимающий эффект состоит в возникновении силы, стремящейся сократить поперечное сечение металла в канале, что в некоторых случаях может закончиться полным разрывом вторичной цепи. Одновременно ограничивается плотность тока, а значит, и мощность печи. Силой, противодействующей сжимающему эффекту, является гидростатическое давление столба металла в канале, поэтому предпочтительно расположение канала в вертикальной плоскости.

В печах с вертикальным каналом сжимающий эффект проявляется меньше, чем в печах с горизонтальным каналом.

Моторный эффект заключается в воздействии на металл в канале силы тяжести и горизонтальной силы отталкивания, вследствие чего металл вытесняется к наружной стенке канала.

Вихревой эффект наблюдается в местах изменения сечения канала, где изменяется плотность тока в канале.

Он улучшает перемешивание металла в канале и ванне печи и способствует выравниванию температуры.

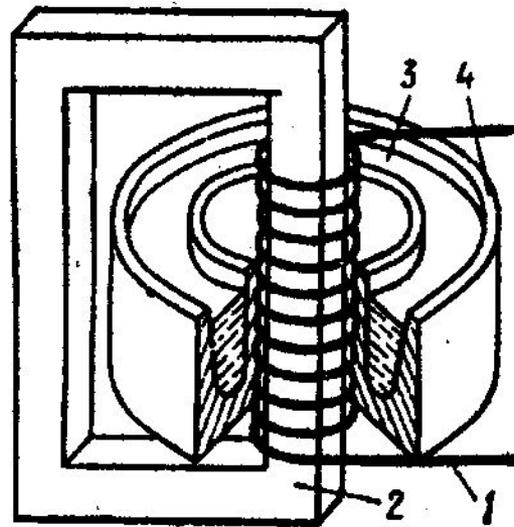
Гидростатическое давление металла в горизонтально расположенном канале печи меньше, что позволяет увеличить объем ванны. При разрушении футеровки в печах с горизонтальными каналами меньше опасность повреждения индуктора прорвавшимся через стенки канала металлом, проще ремонт футеровки и лучше охлаждается вертикально расположенный индуктор. Недостатком печей с горизонтальным каналом является необходимость оставлять больше металла в печи после выпуска.

Для ускорения ремонта индукционных печей индуктор, магнитопровод и футеровка с каналом выполняются в виде отдельного взаимозаменяемого конструктивного узла, который называется индукционной единицей. По количеству индукторов, каналов и магнитопроводов они могут быть одинарными и двойными.

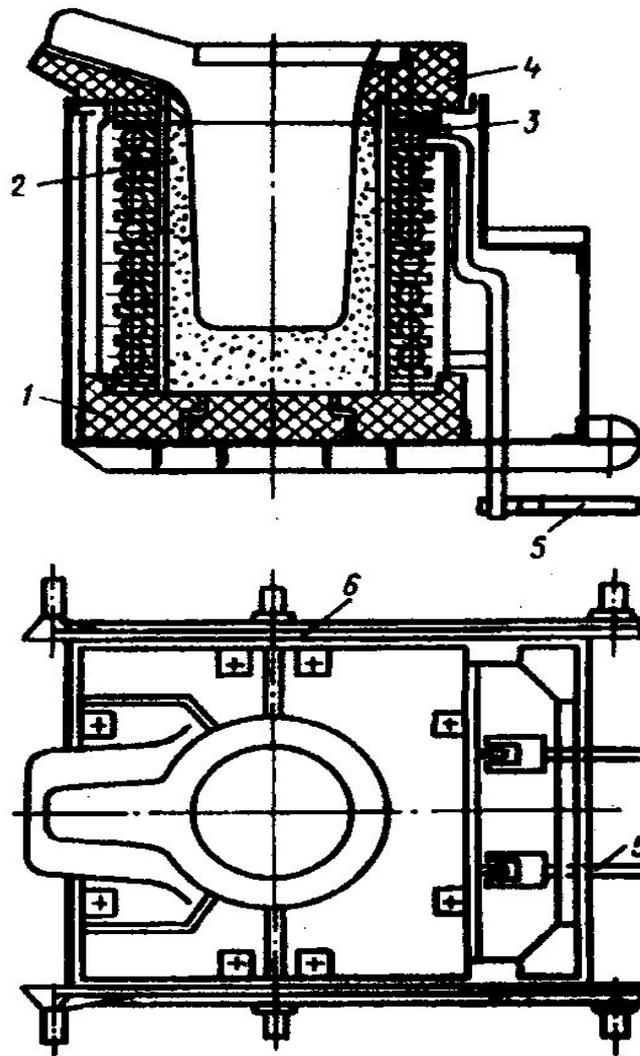
Преимущества нагрева в тигельных индукционных электропечах следующие:
отсутствие необходимости
в жидком металле (болоте) при плавке твердой шихты;
малая масса футеровки и тепловая инерция, возможность периодической работы;
высокая химическая однородность
расплавленного металла и равномерность температуры по объему ванны; малый угар;
компактность и небольшие размеры печи.

Недостатком тигельных индукционных печей является значительный магнитный
поток рассеяния, поэтому индуктивное сопротивление таких печей велико, а
коэффициент мощности ($\cos \varphi$) низок и составляет 0,03 – 0,2.

Для повышения коэффициента мощности необходимо в цепь
индуктора включить емкостное сопротивление. Печь оборудуют
батареей конденсаторов, изменяя емкость
которой, достигают резонанса токов, и значение $\cos \varphi$ увеличивается
до значений, близких к единице.

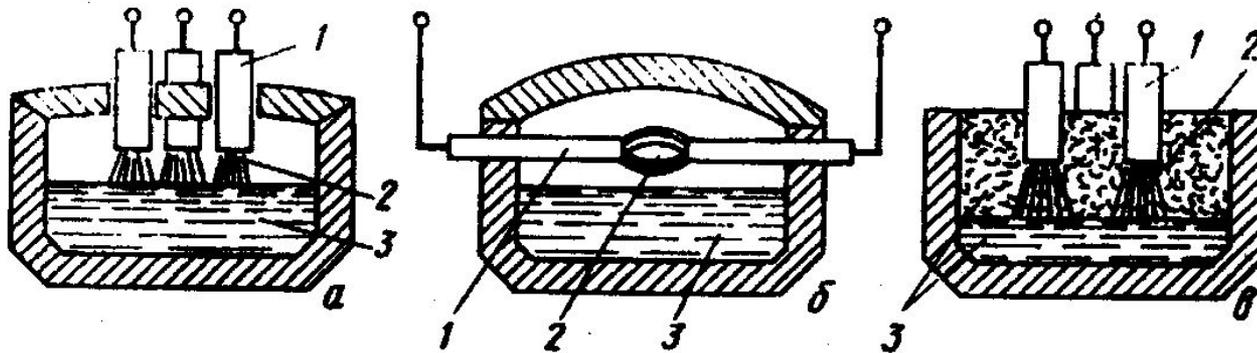


Принцип действия индукционной канальной печи:
1 – индуктор; 2 – магнитопровод; 3 – нагреваемый материал; 4 - футеровка



Индукционная тигельная печь:

1 – нижняя керамическая плита; 2 – футеровка; 3 – индуктор;
4 – верхняя керамическая плита; 5 – токоподводящая шина; 6 –
каркас



Типы дуговых электропечей:

а – прямого нагрева; б – косвенного нагрева; в – смешанного
нагрева

1 – электрод; 2 – дуга; 3 – металл, шлак