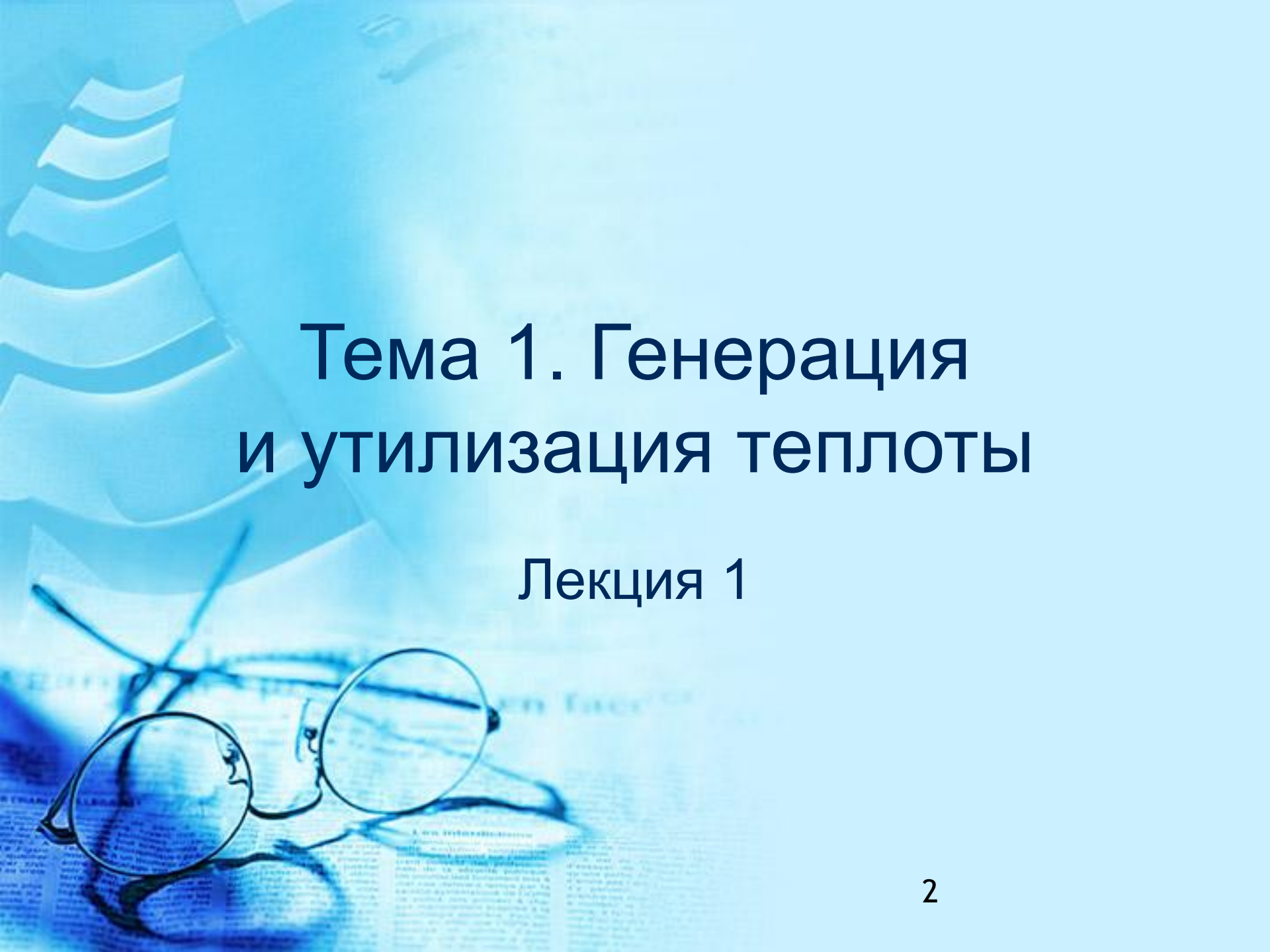




# ТЕПЛОТЕХНИКА



# Тема 1. Генерация и утилизация теплоты

## Лекция 1

# § 1. Классификация топлива. Показатели качества топлива

Твердое топливо: а) *естественное*

Некоторые металлургические печи отапливаются *пылеуглём*, но чаще уголь используют как сырье для получения искусственных газов, применяемых впоследствии для отопления печей.

б) *искусственное*

*Кокс* - пористые, механически прочные куски серого цвета, получаемые при нагревании измельченного каменного угля без доступа воздуха до температуры 950-1050 °С. Это наиболее дорогое из всех видов металлургического топлива.

Иногда вместо кокса используют *термоантрацит*, получаемый при термической обработке продуваемого водяным паром антрацита (высококачественного угля, при горении которого не образуются углеводороды, и который горит, поэтому, коротким пламенем и бездымно).

Из всех видов **жидкого топлива** в металлургии используют в основном **мазут** - остаток фракционной перегонки нефти после отгонки бензина, лигроина, керосина и газойля.

Мазут сгорает почти полностью, так как имеет малую зольность; он немного легче воды. Качество мазута характеризуется температурой вспышки и застывания. Температура вспышки, - при которой пары мазута в смеси с воздухом вспыхивают при приближении пламени; эта температура значительно ниже температуры воспламенения, при которой жидкий мазут воспламеняется самопроизвольно, без воздействия постороннего пламени. Температура застывания зависит от содержания парафина в мазуте.





**Газообразное топливо** - основной вид применяемого в металлургических печах органического топлива. Его достоинства: удобство транспортировки, легкость в управлении процессом горения и возможность создания газовых смесей, обладающих различной теплотой сгорания. Недостатки: низкая плотность и взрывоопасность.

*а) естественное*

Различают *природный газ вулканического происхождения*, почти полностью состоящий из метана  $CH_4$ , и *попутные газы нефтяных месторождений*, в состав которых входят и другие углеводороды.



## б) искусственное

Побочными продуктами производства являются *коксовый и доменный газы*, состоящие, соответственно, в основном из  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  и из  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ .

*Генераторный газ* получают путем газификации, т.е. превращения твердого или жидкого топлива в горючий газ при неполном окислении воздухом, кислородом или водяным паром при высокой температуре. Генераторный газ содержит  $CO$  и  $H_2$  - продукты восстановления  $CO_2$  и  $H_2O$  углеродом газифицируемого топлива (угля, мазута, кокса).



*Установка по газификации  
твердого топлива  
производства ФГУП «НПЦ  
газотубостроения «Салют»»*

Химический анализ позволяет определить **элементарный химический состав топлива**:

$C + H + O + N + S_{\text{л}} + A + W = 100 \%$  по массе,

органическая

горючая

сухая

рабочая масса

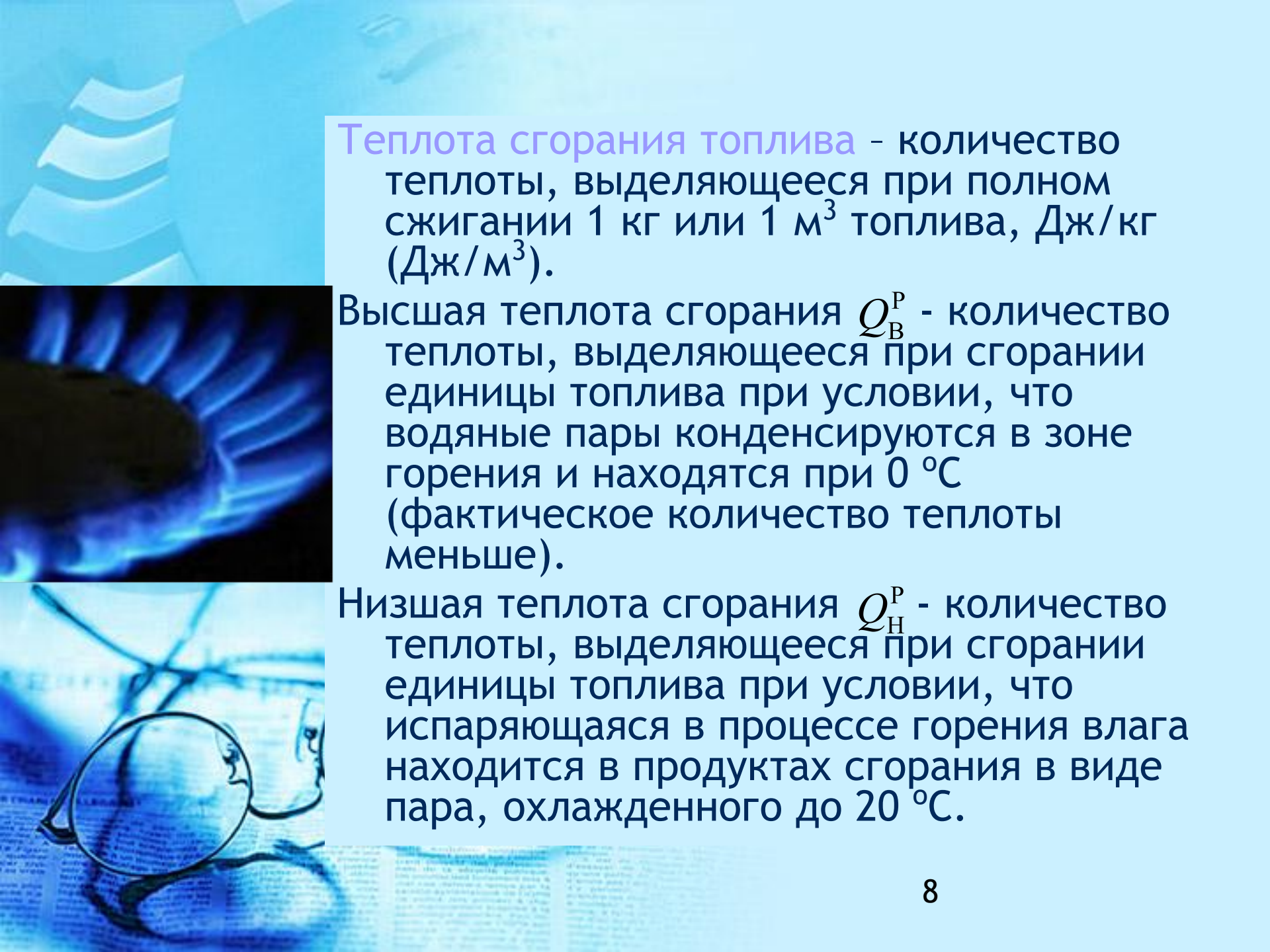
где  $A$  - зола,  $W$  - влага.

Находящаяся в топливе сера делится на летучую (горючую) и минеральную (негорючую), входящую в состав золы.




*Горючая сера*






Теплота сгорания топлива - количество теплоты, выделяющееся при полном сжигании 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива, Дж/кг (Дж/м<sup>3</sup>).



Высшая теплота сгорания  $Q_B^P$  - количество теплоты, выделяющееся при сгорании единицы топлива при условии, что водяные пары конденсируются в зоне горения и находятся при 0 °С (фактическое количество теплоты меньше).



Низшая теплота сгорания  $Q_H^P$  - количество теплоты, выделяющееся при сгорании единицы топлива при условии, что испаряющаяся в процессе горения влага находится в продуктах сгорания в виде пара, охлажденного до 20 °С.





Теплота сгорания различных видов топлива колеблется в широких пределах. Для мазута, например, она составляет свыше 40 МДж/кг, а для доменного газа - около 4 МДж/м<sup>3</sup>.

Для сравнительной оценки различных видов топлива вводят понятие **условного топлива**, для которого низшая теплота сгорания

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 29,3 \text{ МДж/кг.}$$

## § 2. Кинетический и диффузионный режимы горения топлива

Горение заранее подготовленной смеси топлива с воздухом или кислородом называют *кинетическим*; а горение, протекающее одновременно со смесеобразованием - *диффузионным*.

*Гомогенное* и *гетерогенное* горение - соответственно, горение газа и горение твердого или жидкого топлива. Гетерогенное горение включает в себя элементы гомогенного. Например, при нагреве частицы угля перед ее воспламенением из нее выделяются летучие вещества, которые, смешиваясь с кислородом, сгорают в режиме гомогенного горения; таким образом, процесс горения протекает только на границе раздела фаз.



*Зажигательная поверхность спичечного коробка покрыта смесью красного фосфора и порошка стекла. В состав спичечной головки входят окислители ( $PbO_2$ ,  $KClO_3$ ,  $BaCrO_4$ ) и восстановители ( $S$ ,  $Sb_2S_3$ ).*

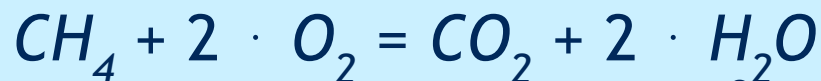
Рассмотрим гомогенное горение как более общее.

*Коэффициент расхода воздуха*

$$n = \frac{V_B^D}{V_B^T}$$

отношение действительного расхода воздуха, затрачиваемого для сжигания единицы топлива, к стехиометрическому (теоретически необходимому).

Например, из реакции горения метана



видно, что для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> метана необходимо подавать 2 м<sup>3</sup> кислорода. Если кислорода подают на 5 % больше, то  $n = 1,05$ .

Коэффициент расхода воздуха является важнейшим параметром, путем изменения которого регулируют процесс горения: температуру горения, количество и химический состав продуктов сгорания, устойчивость процесса горения.





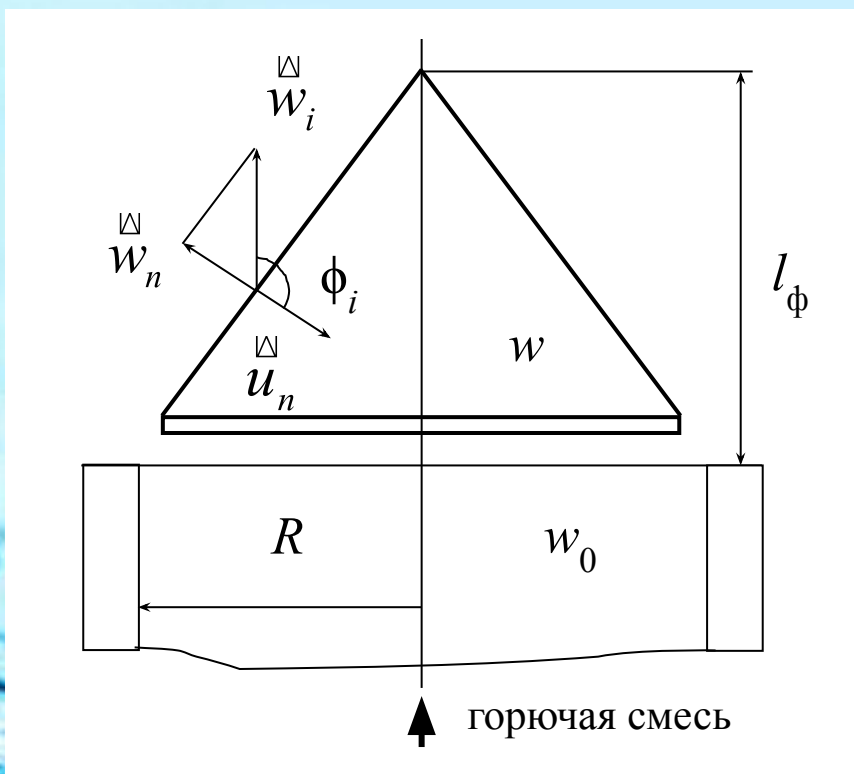
Пламя представляет собой светящуюся газовую оболочку, в которой происходит экзотермическая реакция газообразных продуктов разложения материала с окислителем.

Сгорание топлива в пламенных печах производится в факеле.

*Факел* - это состоящая из компонентов с различными физическими свойствами (топливо, воздух и продукты сгорания) струя, в пределах которой осуществляется горение.

*Фронт пламени* - зона интенсивной реакции и резкого возрастания температуры. Фронт пламени делит факел на две зоны: внутреннюю и внешнюю. Во внутреннюю зону подается топливо и окислитель, либо только топливо; туда же диффундирует из пламени часть высокотемпературных продуктов сгорания. Во внешней зоне находятся продукты сгорания, либо продукты сгорания и окислитель (при  $n > 1$ ).

Рассмотрим **кинетический ламинарный факел**, который образуется при горении струи топлива и окислителя, истекающей из трубы в неограниченный объем воздуха. Если сбоку к срезу трубы поднести запальник, то произойдет зажигание горючей смеси. Образуется тонкий фронт пламени в виде конической поверхности:



Пламя с нормальной скоростью распространения пламени  $u_n$ , зависящей от физико-химических свойств горючей смеси, распространяется навстречу движению струи и к ее оси.

На некотором расстоянии от среза трубы по периметру вытекающей струи образуется зажигающее кольцо - устойчивое кольцо пламени с диаметром, меньшим диаметра выходного отверстия трубы, служащее естественным запальником для свежей смеси.

У стенок трубы (ниже зажигающего кольца) смесь охлаждается из-за теплоотвода через стенки трубы и примешивания холодного воздуха из окружающей среды - это приводит к снижению нормальной скорости распространения пламени, и пламя сюда не проникает. В процессе распространения от зажигающего кольца к центру струи пламя одновременно относится движущейся смесью и достигает оси трубы на некотором расстоянии от среза трубы, называемом длиной факела  $l_\phi$ .



Условием устойчивости фронта пламени является

$$u_n = w_n = w_i \cdot \cos \phi_i,$$

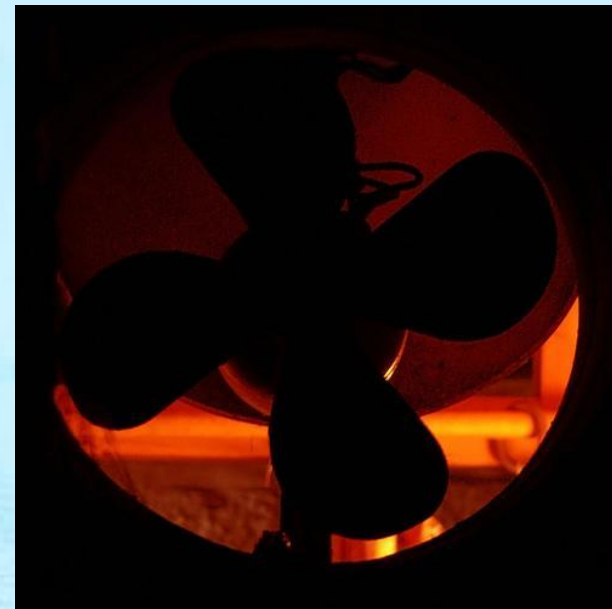
где  $w_n$  - проекция вектора скорости смеси в  $i$ -той точке  $w_i$  на нормаль к элементу фронта пламени в этой точке, м/с;

$\phi_i$  - угол между вектором скорости нормального распространения пламени и вектором скорости смеси в  $i$ -той точке.

Начиная с определенного значения средней скорости горючей смеси на выходе из горелки  $w_0$ , произойдет *отрыв* пламени. Это произойдет в тот момент, когда нарушится условие равновесия применительно к зажигающему кольцу. При увеличении  $w_0$  возрастает количество смеси, проходящее через единицу поверхности зажигающего кольца, следовательно, уменьшается температура кольца и скорость нормального распространения пламени в нем. Это на фоне увеличения  $w_0$  приводит к отрыву пламени.

*Верхний по скорости предел устойчивости пламени* - предельно большая скорость потока, при которой горение устойчиво.

Нельзя допускать и *проскока* пламени - его проникновения в трубу при слишком значительном уменьшении скорости смеси. *Нижний по скорости предел устойчивости пламени* - предельно малая скорость истечения горючей смеси, при которой еще не наступает проскок.



Определим, от чего зависит длина факела при устойчивом горении, для этого примем, что радиус зажигающего кольца примерно равен радиусу выходного отверстия трубы. Тогда время, в течение которого пламя распространится от границы струи до ее оси,

$$t = \frac{R}{u_n}.$$

За это же время пламя сместится вдоль оси факела на расстояние, равное длине факела:

$$l_{\phi} = w \cdot t \approx w_0 \cdot t = \frac{w_0 \cdot R}{u_n},$$

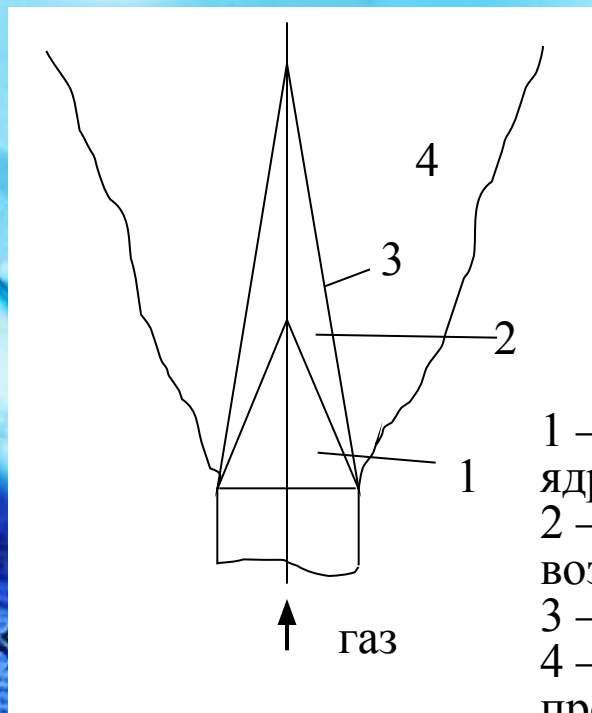
где  $w$  - средняя по сечению скорость движения газов в пределах факела м/с.

Таким образом, длина факела зависит от радиуса среза трубы, средней скорости истечения, а также от температуры и состава смеси (от этих факторов зависит величина  $u_n$ ).

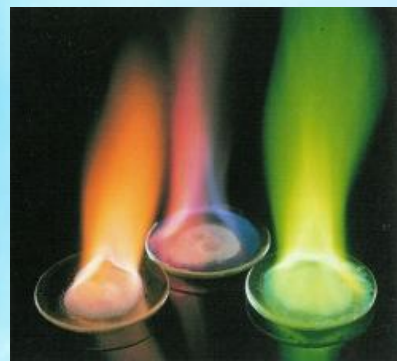


## Рассмотрим диффузионный ламинарный факел.

Пусть из трубы подается ламинарная струя топлива, которое в пограничном слое при помощи молекулярной диффузии и конвекции перемешивается с воздухом, образуя горючую смесь. Если к периферии струи поднести запальник, то по ее периметру возникнет зажигающее кольцо и сформируется фронт пламени конической формы:



1 – потенциальное ядро потока,  
2 – топливно-воздушная смесь,  
3 – фронт пламени,  
4 – смесь продуктов сгорания и воздуха



*Все горючие твердые вещества подразделяются на два класса: безгазовые и газофицирующиеся при горении.*

*К веществам и материалам первого класса, не образующим при горении газообразных продуктов, могут быть отнесены различные термитные смеси, продуктами сгорания которых являются нелетучие конденсированные вещества - оксиды металлов.*

*Подавляющее большинство твердых веществ и материалов относятся ко второму классу.*

Предположим, что фронт образовался в точках пространства, куда горючее поступает в избытке ( $n < 1$ ). В этом случае часть горючего пройдет сквозь фронт в окружающую среду, смешается там с кислородом и сгорит, при этом приход кислорода во фронт еще больше сократится. Очевидно, в таких условиях фронт пламени не может быть устойчивым. Подобным образом можно доказать, что фронт пламени не может быть устойчивым в точках, куда кислород поступает в избытке ( $n > 1$ ).

Так как зажигающий пояс находится на границе струи с окружающей средой, то есть в зоне с очень низкими скоростями, то его устойчивость высока. Проскок же вообще невозможен, поскольку через трубу подается чистый газ.

Время, в течение которого завершится формирование факела, равно времени диффузии воздуха от периферии к оси струи:

$$t = \frac{R^2}{2 \cdot D},$$

где  $R$  - радиус трубы, м;

$D$  - коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Длина факела

$$l_{\phi} = w \cdot t \approx w_0 \cdot t = \frac{R^2 \cdot w_0}{2 \cdot D}.$$

Учтем, что секундный расход газа через трубу

$$V = w_0 \cdot \pi \cdot R^2 \Rightarrow w_0 = \frac{V}{\pi \cdot R^2}.$$

Окончательно имеем

$$l_{\phi} \sim \frac{V}{D}.$$



Расчет горения топлива включает в себя следующие этапы.

1. Определение расхода воздуха на горение.

Производится по содержанию избыточного кислорода в продуктах сгорания, %:

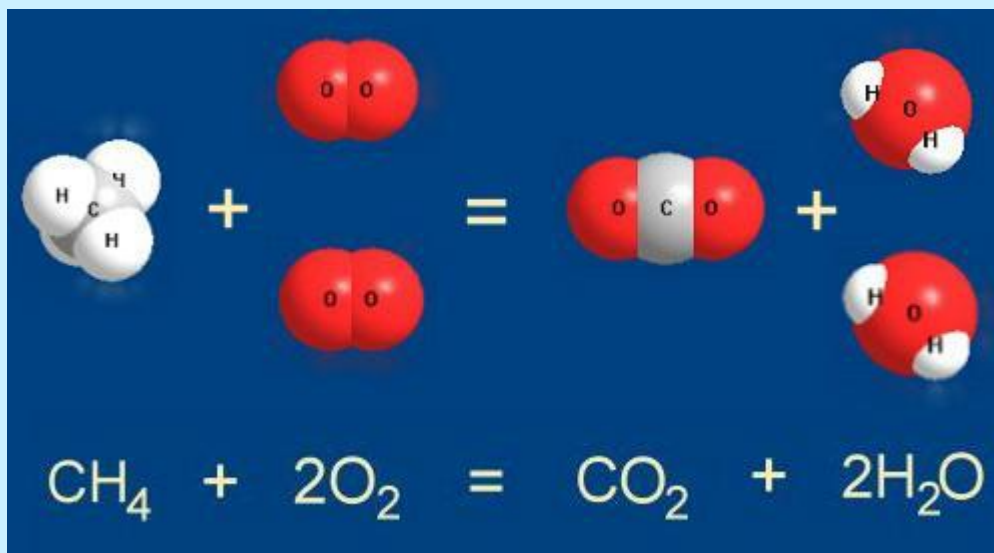
$$n = \frac{21}{21 - O_{2\text{ИЗБ}}},$$

где 21 - % кислорода в земной атмосфере.

*SPC-93-1195 - Сигнализатор  
газа  $O_2$ , газоанализатор  
стационарный*



2. Определение количества и состава продуктов сгорания.  
Производится на основании уравнений горения.  
Рассмотрим пример горения метана при подаче  
теоретического количества воздуха:



При сгорании  $1 \text{ м}^3$  метана образуется  $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$  и  $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ .  
Кроме того, с воздухом вносится

$$2 \cdot 3,762 = 7,524 \text{ м}^3 \text{ азота.}$$

Таким образом, полное количество продуктов сгорания:

$$1 + 2 + 7,524 = 10,524 \text{ м}^3.$$

Состав продуктов сгорания в объемных процентах:

$$\text{CO}_2 \dots \frac{1}{10,524} \cdot 100 = 9,5;$$

$$\text{H}_2\text{O} \dots \frac{2}{10,524} \cdot 100 = 19;$$

$$\text{N}_2 \dots \frac{7,524}{10,524} \cdot 100 = 71,5 \cdot$$

Если бы сжигание метана производилось с  $n > 1$ , то общее количество продуктов сгорания возросло бы из-за увеличения количества  $\text{N}_2$  и наличия избыточного  $\text{O}_2$  в продуктах сгорания.

Правильность расчета подтверждается составлением материального баланса в единицах массы, так как объемы реагирующих веществ могут быть не равны объемам полученных при горении соединений.

### 3. Расчет температуры горения.

*Калориметрической* называется температура, которая могла бы быть достигнута при условии, что вся теплота, выделившаяся при горении, использована только на нагрев продуктов сгорания:

$$t_{\text{К}} = \frac{Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}}{v_{\text{Д}} \cdot c},$$

где  $v_{\text{Д}}$  - объем дыма, образующегося при сгорании единицы топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );

$c$  - удельная теплоемкость продуктов сгорания,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .



*Горение свечи является примером процессов горения плавящихся материалов, которым пламя дает теплоту, достаточную для их плавления, испарения и разложения. Парафиновая свеча имеет минимальную температуру  $1400^\circ\text{C}$ .*



Из-за частичной диссоциации  $CO_2$  и  $H_2O$ , сопровождаемой поглощением теплоты, *теоретическая* температура всегда ниже калориметрической:

$$t_T = \frac{Q_H^P - Q_{\text{дисс}}}{v_D \cdot c},$$

где  $Q_{\text{дисс}}$  - определяемое расчетным путем количество теплоты, израсходованное на протекание процесса диссоциации.

Из-за нагрева стен печи и заготовок *действительная* температура еще меньше:

$$t_D = \frac{Q_H^P - Q_{\text{дисс}} - Q_{\text{пот}}}{v_D \cdot c},$$

где  $Q_{\text{пот}}$  - количество теплоты, отдаваемое продуктами сгорания.

Величина  $Q_{\text{пот}}$  зависит от условий теплообмена продуктов сгорания с окружающей средой и оценивается с помощью выражения

$$t_{\text{д}} = t_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пир}},$$

где  $\eta_{\text{пир}} = 0,65 \div 0,8$  - зависящий от конструкции печи, ее теплового режима и определяемый экспериментальным путем пирометрический коэффициент.

Величина действительной температуры дает оценочную характеристику условий теплообмена при сжигании топлива в рабочем пространстве печи.

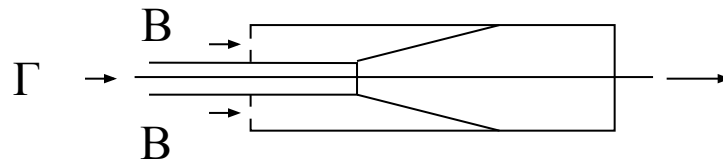


## § 3. Конструкции и схема выбора устройств для сжигания топлива

Для сжигания газообразного топлива применяются устройства, называемые **горелками**. По принципу смешения газа с воздухом их делят на две группы: с предварительным и с внешним смешением. Внутри каждой группы классификация производится по конструктивным признакам, которые обусловлены способом образования смеси.

Наиболее распространенные горелки с предварительным смешением - **инжекционные**, использующие инжектор - устройство, в котором вытекающая из сопла струя газа увлекает за собой окружающий воздух, и перемешивание газа и воздуха достаточно полно происходит в смесительной трубе до попадания в печь.

Рассмотрим истечение турбулентной струи газа в открытую с обоих торцов цилиндрическую камеру:



До соприкосновения со стенами камеры струя ведет себя как свободная, увлекая окружающий воздух через входной торец камеры. В связи с ограниченным проникновением окружающей среды кинетическая энергия струи не может быть полностью израсходована, и потому она частично превращается в потенциальную энергию давления, - струя топлива совершает работу противодавления, нагнетая подготовленную смесь в рабочее пространство печи.

В работе инжекционных горелок существенную роль играет туннель, стенки которого в процессе горения раскаляются, что обеспечивает поджигание новых порций газо-воздушной смеси и способствует устойчивому горению.



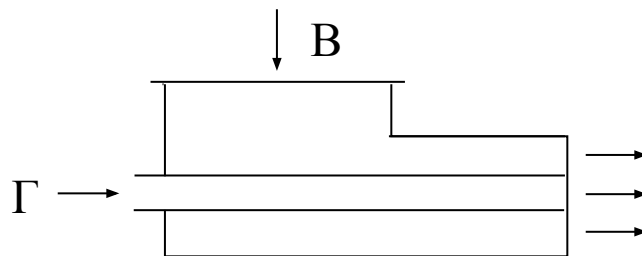
*Инжекционная газовая горелка вихревая (ГГВ) низкого и среднего давления ООО «ПКФ «СпецКомплектПрибор»»*



Достоинства горелок с предварительным смешением:

- 1) малая величина коэффициента расхода воздуха, что обеспечивает наивысшую температуру горения для данного топлива по сравнению с другими горелками;
- 2) автоматическое поддержание постоянного соотношения расходов газа и воздуха;
- 3) отсутствие воздухопроводов.

Широко распространенной горелкой без предварительного смешения является *двухпроводная*. По наружной трубе подается воздух, образующий облегающий поток по отношению к газу, который подается по внутренней трубе:



В *турбулентных* двухпроводных горелках воздушная струя закручивается по отношению к газовой, что способствует улучшению перемешивания топлива и окислителя.

*Плоскопламенные* горелки создают разомкнутый факел с углом раскрытия  $180^\circ$ , растекающийся тонким слоем и прилегающий к поверхности кладки печи, в которую вмонтирована горелка. При этом не только придается вращательное движение воздушному потоку, но и применяются специальной формы горелочные камни и рассекатели.



Плоскопламенная горелка (FFB),  
Hotwork  
Combustion  
Technology  
Limited,  
Великобритания



"Горящее гало". Мощная промышленная горелка,  
работающая в относительно слабом режиме.  
Chuck Baukal/John Zink Company



Горелки дутьевые типа  
"труба в трубе"  
Уфалейского завода  
металлоизделий  
(г. Верхний Уфалей  
Челябинской области)

Достоинства горелок без предварительного смешения: 1) возможность создания факела специальной формы; 2) возможность подогрева воздуха; 3) компактность.



Турбулентные горелки выбирают следующим образом:

1. Зная теплоту сгорания  $Q_H^P$  и часовой расход топлива  $B$  на горелку, определяют ее теплопроизводительность

$$Q = B \cdot Q_H^P.$$

2. По величине  $Q$ , задаваясь скоростью выхода топлива из горелки ( $20 \div 30$  м/с), с помощью специальной номограммы определяют диаметр горелки  $D$ .
3. Определив  $D$ , по перечисленным выше данным находят все необходимые размеры горелки.
4. Действительное давление газа и воздуха определяют по формулам:

$$p_{\Gamma} = \xi_{\Gamma} \cdot p_{\Gamma}', \quad p_{\text{В}} = \xi_{\text{В}} \cdot p_{\text{В}}',$$

где  $p_{\Gamma}'$  и  $p_{\text{В}}'$  - расчетное динамическое давление газа и воздуха;

$\xi_{\Gamma} = 0,7 \div 0,8$  и  $\xi_{\text{В}} = 2,5 \div 3$  - коэффициенты потерь.



В случае если не допустим контакт нагреваемого металла с продуктами сгорания, сжигание газа производят в *радиантных трубах*, выполненных из жаростойких сталей, а рабочее пространство печи заполняют защитным газом.



*Радиационная труба  
производственно-  
инжиниринговой  
компании «ПЕРОЛ»*



*Радиантная труба  
ООО «Воткинский  
завод ТО» (Удмуртия)*

Жидкое топливо сжигают с помощью **форсунок**, обеспечивающих дробление мазута на мелкие капли перед его сжиганием, для чего используется энергия самого распыляемого топлива, либо вентиляторного воздуха, либо газообразного распылителя высокого давления: компрессорного воздуха, водяного пара. Твердое топливо сжигают в **пылеугольных горелках**.



*Жидкотопливная горелка R 20-30 немецкого производителя Giersch*



*Пылеугольная горелка ООО НТФ "ЭНЕРГОМАШ-инжиниринг" (г. Таганрог)*



## § 4. Тепловые эквиваленты сырьевых материалов шихты

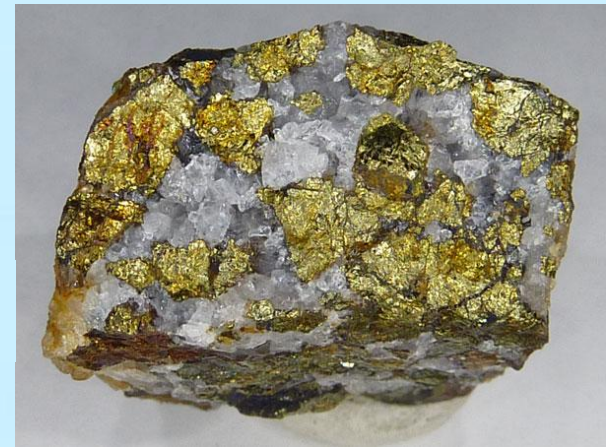
Шихтовые материалы могут выполнять функцию *технологического топлива* в случае, когда количество выделившейся в результате экзотермических реакций теплоты сопоставимо с энергетическими затратами на осуществление технологического процесса. Процессы, протекающие за счет химической энергии сырьевых материалов, называют *автогенными*.

Примером технологического топлива могут служить сульфидные материалы, применяемые при выплавке меди. Их энергообразующими компонентами являются *Fe* и *S*, входящие вместе с *Cu* в сложные химические соединения.



Пирит  $FeS_2$

Халькопирит  
 $CuFeS_2$



Состав шихты, как правило, задают содержанием  $S$  и  $Cu$ , тогда теплота сгорания шихты

$$Q_{xш} = 119,4 \cdot S - 12,4 \cdot Cu ,$$

где  $S$  и  $Cu$  - содержание серы и меди в шихте, выраженное в % от массы.

Эта формула получена перемножением величины тепловых эффектов реакций на соответствующие им количества энергообразующих компонентов и сложением полученных результатов. Знак «-» перед вторым слагаемым обусловлен тем, что восстановление сульфида меди оксидом меди является эндотермической реакцией.



Для сравнения потенциальных энергетических возможностей сырьевых материалов и топлива и оценки их взаимозаменяемости в условиях конкретного технологического процесса используют понятие *топливного эквивалента шихты*, который показывает, какое количество условного топлива заменяет тонна шихты.

*Тепловым эквивалентом шихты* называют количество теплоты, используемое на протекание технологического процесса, из общего количества теплоты, выделившейся при окислении единицы массы шихты, кДж/кг. Перегрев содержащихся в печи материалов ведет к нарушению технологического режима и поэтому из общего количества теплоты, полученного за счет химической энергии сульфидов, в печи может быть использована только ее часть.

Используют понятия *теплогенерационной* и *теплообменной составляющей* теплового эквивалента шихты, которые соответственно показывают, какое количество теплоты, используемой в печи, подводится к продуктам плавки в процессе теплогенерации и за счет теплообмена.

Известно, что продукты окисления сульфидов получают теплоту непосредственно при протекании экзотермических реакций, и потому считается, что скорость подвода теплоты к веществам, участвующим в реакциях окисления, определяется скоростью теплогенерационных процессов. К остальным материалам теплота подводится от продуктов окисления сульфидов за счет теплообмена: таким образом, скорость подвода теплоты к флюсам и порообразующим компонентам определяется интенсивностью протекающих в печи теплообменных процессов.

## § 5. Генерация теплоты за счет электрической энергии

При наложении электромагнитного поля в проводящей среде электроны проводимости обуславливают *ток проводимости*:

$$\vec{J} = -N_e \cdot e \cdot v_D,$$

где  $\vec{J}$  - вектор плотности тока проводимости, А/м<sup>3</sup>;

$N_e$  - плотность электронов проводимости, м<sup>-3</sup>;

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд электрона;

$v_D \sim 10^{-3} \div 10^{-5}$  м/с - скорость «дрейфа» электронов.

При неупругом взаимодействии электроны передают избыток кинетической энергии ионам, увеличивая амплитуду их колебаний, что и определяет повышение температуры, то есть нагрев вещества.

Если прохождение тока проводимости не связано с изменением структуры вещества и не сопровождается химическими реакциями, то, в соответствии с **законом Джоуля-Ленца**, внешняя работа электрических сил целиком идет на изменение тепловой энергии в единице объема нагреваемого вещества:

$$N_e \cdot v_D \cdot F = q_V,$$

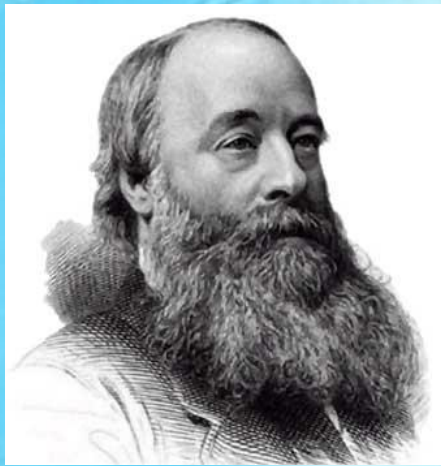
где  $F$  - сила, действующая на электрон, Н;

$q_V$  - удельная скорость преобразования энергии, Вт/м<sup>3</sup>.

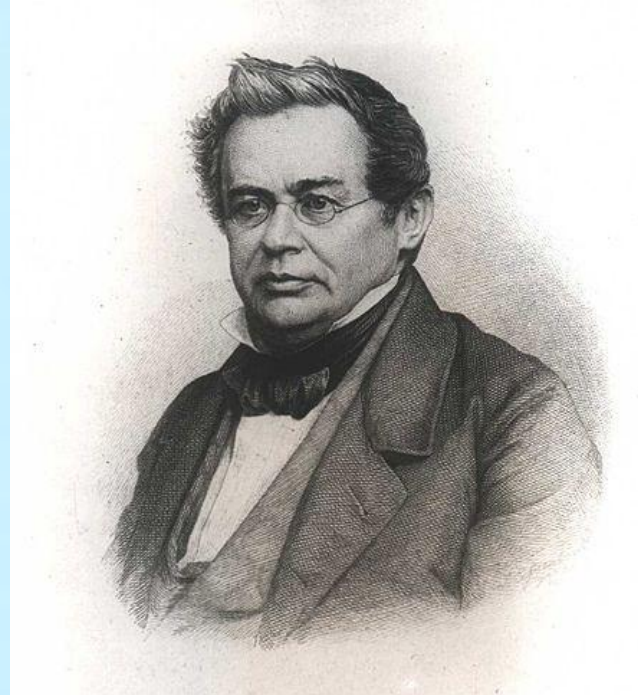
Последнее выражение выражает закон теплового действия тока проводимости и является частным случаем закона сохранения энергии.

Теплотехнические возможности теплогенерации по закону Джоуля-Ленца зависят от: 1) способа подвода электромагнитной энергии; 2) степени равномерности  $q_V$  в объеме нагреваемого тела.





**Джеймс Прескотт ДЖОУЛЬ** (1818-1889) - английский физик. Изучал природу тепла и обнаружил ее связь с механической работой. Это привело к теории сохранения энергии, что, в свою очередь, привело к разработке первого закона термодинамики. Он работал с лордом Кельвином над абсолютной шкалой температуры, делал наблюдения над магнитострикцией (изменение объема и линейных размеров тела при изменении состояния его намагниченности), открыл связь между током, текущим через проводник с определенным сопротивлением и выделяющейся при этом теплотой, названный законом Джоуля (1841).



**Эмилий Христианович ЛЕНЦ** (1804-1865) - знаменитый русский физик. Работал в области электромагнетизма. Важнейшие результаты его исследований излагаются и во всех учебниках физики. В их числе закон индукции (правило Ленца), по которому направление индукционного тока всегда таково, что он препятствует тому действию (например, движению), которым он вызывается (1834) и закон Джоуля и Ленца: количество теплоты, выделяемое током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению проводника (1842).

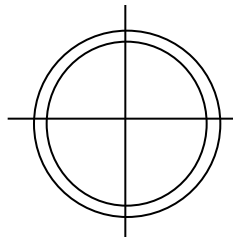
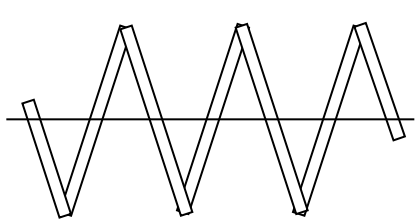
Возможно 2 способа прямого подвода энергии:

- 1) кондукционный, когда вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , В/м, направлен вдоль оси нагреваемого электропроводного тела (т.е. ток проводимости направлен вдоль оси нагреваемого тела);
- 2) индукционный, когда вектор  $\vec{E}$  направлен по нормали к оси и переменное электромагнитное поле индуцирует вихревые токи проводимости.

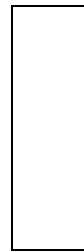
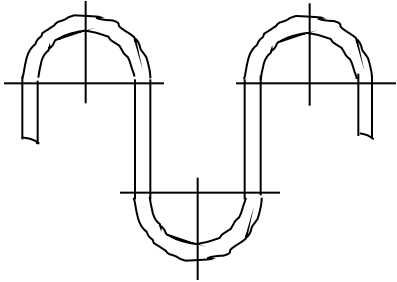
Когда невозможно обеспечить удовлетворительный нагрев, диссипацию энергии обеспечивают *косвенной* теплогенерацией, для чего используют электрические нагреватели.

Существуют 3 группы электронагревателей:

1. Металлические из хромоникелевых (нихром) и железохромоалюминиевых (фехраль) сплавов, имеющие предельную рабочую температуру 800-1200 °С. В современных электропечах сопротивления используют:



- проволочные  
спиральные,



- ленточные  
зигзагообразные

и проволочные зигзагообразные нагреватели.



2. Керамические (карборундовые) из  $SiC$  применяют в тех случаях, когда необходимо иметь температуру нагревателя 1250-1450 °С. Их изготавливают в виде трубок.
3. Металлокерамические нагреватели из дисилицида молибдена  $MoSi_2$  имеют предельную рабочую температуру 1450-1680 °С. Наиболее употребительная форма таких нагревателей - U-образная.



Карборундовые  
нагреватели.  
Размер: 26x400мм  
и 38x400мм,  
L=1200мм



Нагреватели из  
дисилицида  
молибдена



Алгоритм расчета нагревателей:

1. Находят рабочую температуру

$$t_{\text{Н}} = t_{\text{М}}^{\text{КОН}} + 100 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. Выбирают материал и определяют величину его удельного электросопротивления  $\rho$ , Ом · м.

3. По формуле для плотности результирующего теплового потока в системе 2 параллельных поверхностей находят удельную поверхностную мощность идеального нагревателя, т.е. такого, который не излучает сам на себя:

$$\omega_{\text{ИД}} = \frac{\sigma_0 \cdot (T_{\text{Н}}^4 - T_{\text{М}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Н}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{М}}} - 1}, \text{ Вт/м}^2.$$

5. Выбирают тип электрического соединения нагревателей и находят величину фазового напряжения. При схеме соединения «треугольник» фазовое напряжение равно сетевому  $U_{\Phi} = U_{C}$ . При схеме соединения «звезда»

$$U_{\Phi} = \frac{U_{C}}{\sqrt{3}}.$$

6. По величинам мощности печи  $N$ ,  $U_{\Phi}$ ,  $\rho$  и  $\omega$  рассчитывают размеры нагревателей и выбирают их количество.

Генерация теплоты по закону Джоуля-Ленца имеет место в индукционных печах и печах сопротивления прямого и косвенного действия.

Генерация теплоты за счет ускорения потока электронов основана на явлении *термоэлектронной эмиссии* - испускании электронов нагретыми телами, например, металлопленочными катодами из тугоплавких металлов с пленкой из щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов (элементы I-III групп периодической системы), помещенными в электрическое поле. Поступающие в межэлектродный промежуток электроны формируются в электрополе в виде направленного потока быстролетающих (со скоростью  $\sim 100$  тыс. км/с) электронов, называемого электронным лучом.

Во избежание рассеяния приобретенной кинетической энергии электроны не должны сталкиваться с молекулами газовой среды, для чего обеспечивают распространение потока электронов в вакууме.

## Мощность электронного луча

$$P = I_A \cdot U_A = k \cdot U_A^{5/2},$$

где  $I_A = k \cdot U_A^{3/2}$  - сила тока переноса в вакууме, связанная с величиной ускоряющего напряжения  $U_A$  так называемым «законом трех вторых» в отличие от закона Ома;

$k$  - постоянная, характеризующая размеры и форму катода и анода.

Из-за соударения электронного луча со связанными электронами нагреваемого вещества возможно возникновение рентгеновского излучения, по этой причине ограничивают величину  $U_A$  (не более 35 кВ). Возможность управления движением электронов позволяет фокусировать и перемещать электронный луч по поверхности нагрева, создавая заданную плотность теплового потока.

Способ применяют в электронно-лучевых печах.



Теплогенерация за счет электрических разрядов в газах заключается в осуществлении разряда путем разрушения нейтральных молекул под действием электромагнитного поля. При этом образуется *плазма* - частично или полностью ионизованный газ. В металлургии используют так называемую низкотемпературную плазму с температурой 5÷20 тыс. К (высокотемпературная плазма с температурой свыше 100 тыс. К является объектом исследований по управляемому термоядерному синтезу).

Суммарные энергозатраты на создание электрического разряда в газах

$$W_{\Sigma} = W_{\text{э}} + W_{\text{д}} + W_{\text{и}},$$

где  $W_{\text{э}}$  - энергия, идущая на увеличение энтальпии газа;

$W_{\text{д}}$  - энергия, идущая на диссоциацию многоатомных молекул;

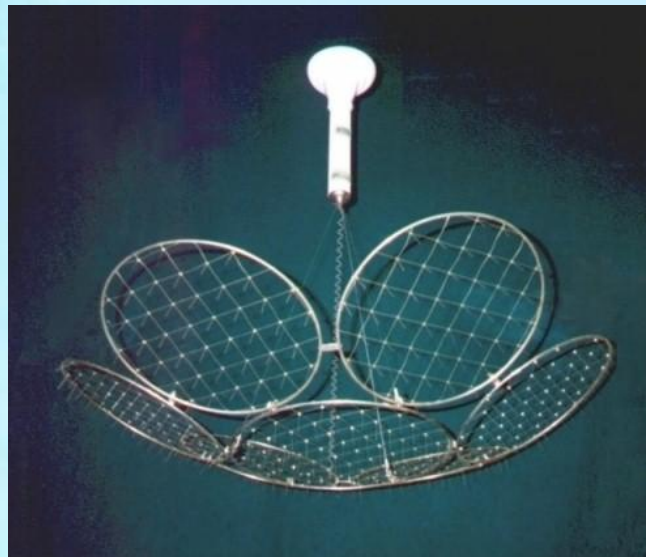
$W_{\text{и}}$  - энергия, идущая на ионизацию, т. е. отрыв электронов.

Удельная энтальпия плазмы ступенчато возрастает при увеличении температуры. При относительно низкой температуре идет процесс диссоциации многоатомных газов (например, четырехокись азота распадается на 2 радикала двуокиси, имеющие на внешнем уровне по одному неспаренному электрону:  $N_2O_4 \rightarrow 2 NO_2$ ), а затем, при дальнейшем возрастании температуры, происходит ступенчатая ионизация с образованием одно-, двух- и более зарядных ионов. Образование многозарядных ионов происходит лишь при температуре  $> 30$  тыс. К.

Чаще всего применяют *дуговой* (в плавильных печах) и *коронный* разряд (в так называемых электронно-ионных технологических процессах и для ионизации аэрозолей при очистке дыма). В промышленности применяют также *искровой* (для электроэрозионной обработки металлов) и *тлеющий* разряд (для распыления металлов при производстве полупроводников и сверхпроводников).



*Дуговой электрический разряд в ксеноновой лампе*



*Ионизатор воздуха "Аэроион-25" (модификация "Ромашка"), использующий коронный электрический разряд*



*Молния - искровой электрический разряд в атмосфере*



*Огни святого Эльма - тлеющий электрический разряд*