

# ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ



# ЧТО ТАКОЕ ГОРЕНИЕ?

Это процесс химического взаимодействия топлива и окислителя характеризующийся:

- 1.интенсивным выделении тепла
- 2.скачкообразным ростом температуры и концентрации продуктов горения
- 3.снижении концентрации окислителя
- 4.преобразованием химической энергии топлива в тепловую энергию, идущую на нагрев продуктов сгорания



# КЛАССИФИКАЦИЯ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ

**Химические  
реакции**

## **ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ !**

с выделением тепла, называются.



## **ЭНДОТЕРМИЧЕСКИМИ**

с поглощением тепла, называются.



## **ГОМОГЕННЫЕ**

окислитель и топливо в одном агрегатном состоянии

## **ГЕТЕРОГЕННЫЕ**

окислитель и топливо находятся в разных агрегатных состояниях.

# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

скоростью ГОМОГЕННОЙ химической реакции:

$$\omega = \Delta C / \Delta t = k \cdot C_A^n \cdot C_B^m$$

массовое  
количество  
вещества

Ед. объёма

Ед. времени

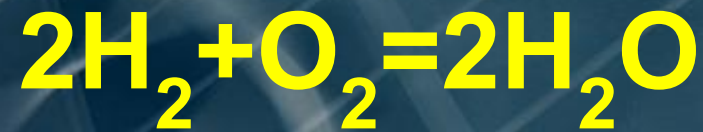
=

закон действующих  
масс

*m и n – число молей  
реагирующего вещества*

в однородной среде при постоянной температуре в  
каждый момент времени скорость реакции  
пропорциональна произведению концентраций  
реагирующих веществ с учетом числа молей

# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА



$$\omega = k \cdot C_{\text{H}_2}^2 \cdot C_{\text{O}_2}$$



# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

При данной  
пропорциональна  
соответствующего газа:

температуре  
парциальному

концентрация  
давлению

$$\omega = K_p \cdot P_A^n \cdot P_B^m$$

# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

При неизменной концентрации реагирующих веществ во времени (постоянный подвод топлива и окислителя в зону горения) скорость реакции зависит от константы скорости реакции

$$K_p = K_o \cdot e^{-E/RT}$$

закон Аррениуса

Е – энергия активации;  
R – газовая постоянная;  
T – температура процесса в градусах °K.

*$K_p$  показывает долю молекул, участвующих в процессе горения.*

*$K_o$  – характеристика полного числа столкновений молекул реагирующих веществ*



# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

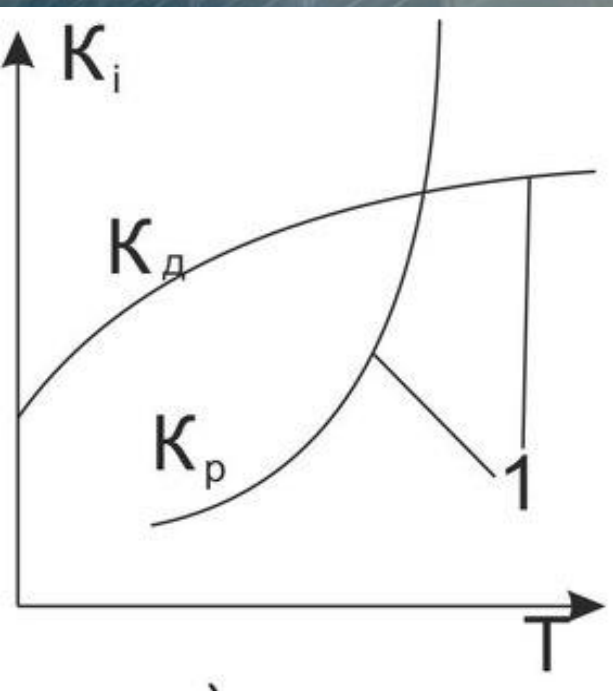
Энергия активации  $E$  - энергия достаточная для разрушения внутримолекулярных связей исходных веществ

*Энергия активации зависит от:*

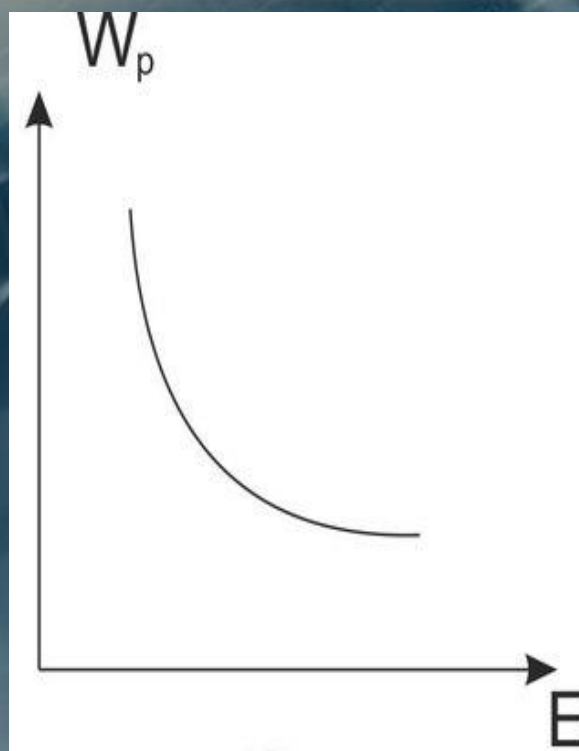
- величины внутриаомных связей в молекулах*
- состояния вступающих в реакцию веществ*
- от температуры в зоне реакции*

При высоких температурах в зоне реакции за счет диссоциации молекул с более слабыми внутренними связями накапливается определенное количество заряженных частиц (радикалов) типа  $\text{OH}\cdot$ ,  $\text{H}\cdot$ ,  $\text{O}_2\cdot$  которые легко вступают в промежуточные реакции с исходными молекулами (такие реакции имеют низкие значения  $E$ ) и способствуют ускорению реакций горения.

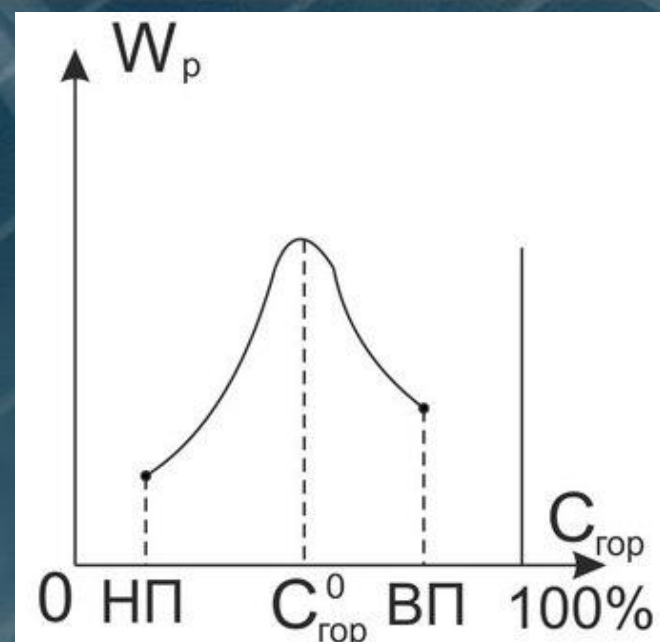
# ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА



Зависимость  
константы реакции  
горения  $K_p$  от  
температуры



Изменение  
скорости реакции  
 $\omega_p$  от энергии  $E$



Изменение скорости  
реакции при повышении  
концентрации горючего  
вещества  $C_{гор}$  в смеси с  
воздухом;  
НП, ВП – нижний и  
верхний предел  
концентрации

# ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

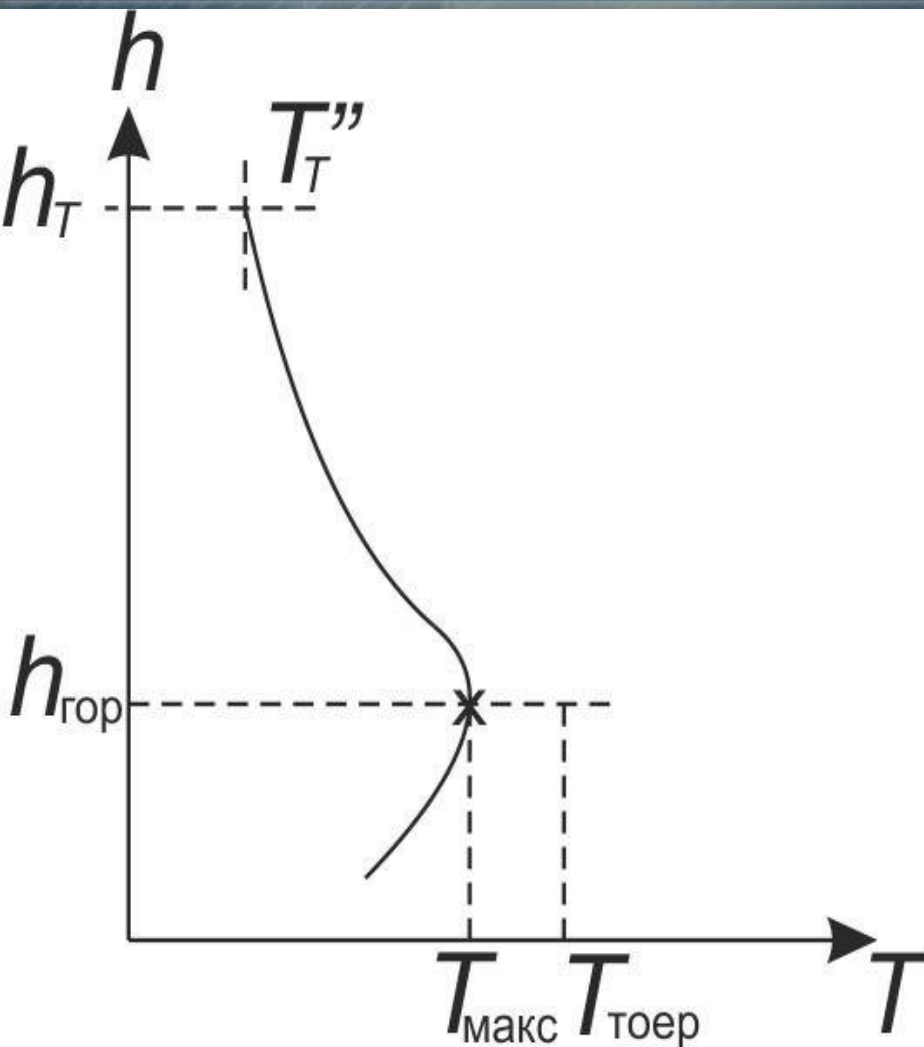
- температура смеси, начиная с которой система способна к самоускорению реакции до устойчивого горения

Тепловыделение в ходе реакции горения топлива (при постоянной концентрации реагирующих веществ) определяется скоростью реакции в данных условиях и теплотой горения топлива:

$$Q_R = \bar{K}_S \cdot Q_H^p \Delta \tau$$



# ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА ПО ВЫСОТЕ ТОПКИ



В топочных устройствах всегда имеет место отвод теплоты из зоны реакции к поверхностям нагрева. С повышением температуры в зоне основного горения увеличивается и отвод теплоты, далее по мере выгорания топлива тепловыделение снижается, а вместе с ним происходит спад температуры продуктов сгорания

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

## ЭТАПЫ

сушка при температуре  
около 100°C

горение состоящее из  
следующих стадий:

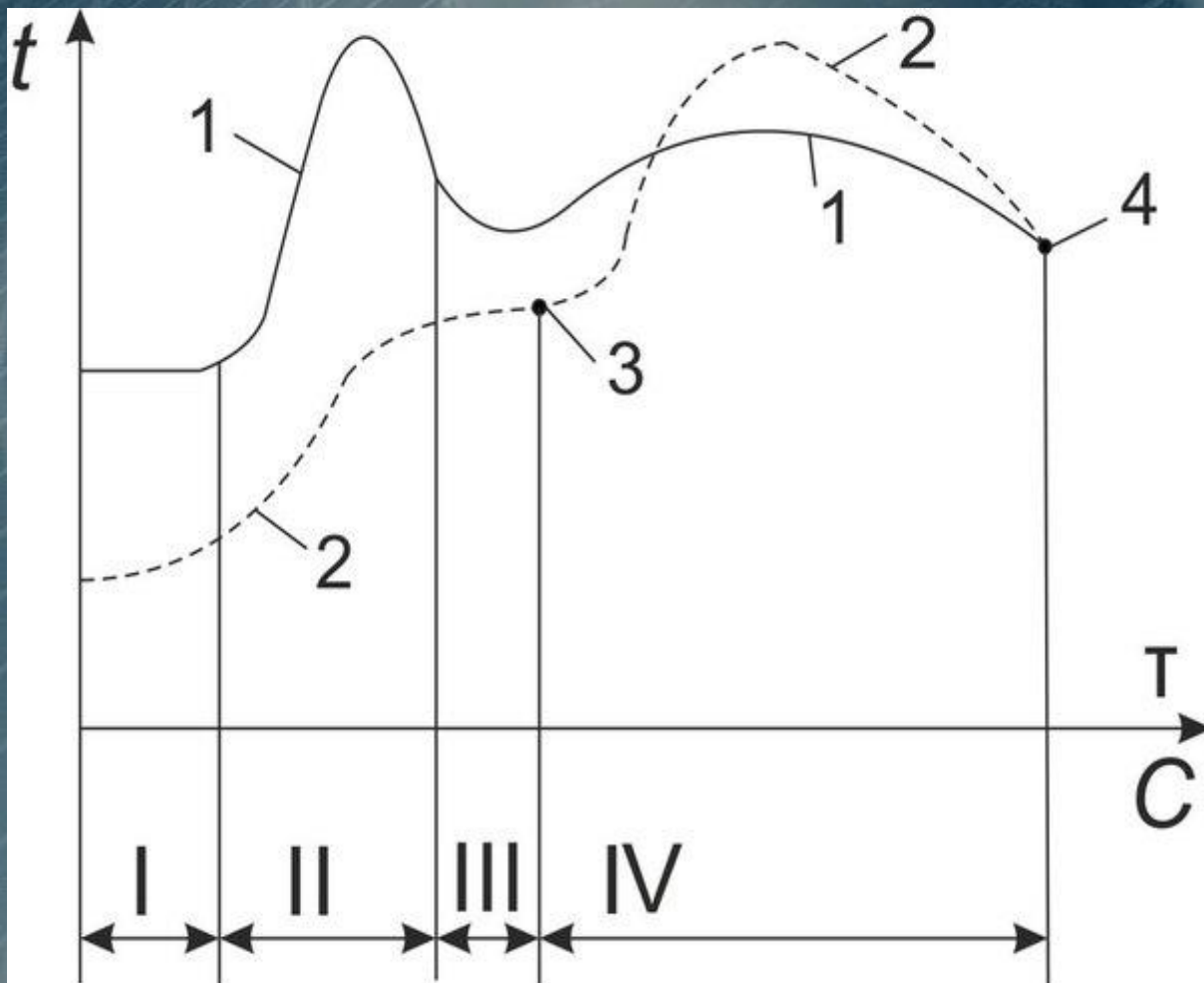
а) выход летучих и  
образование  
нелетучего остатка;

б) горение летучих;

в) горение  
нелетучего  
коксового остатка.



# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА



1 - температура газовой среды вокруг частицы;  
2 - температура частицы;  
3 - воспламенение коксового остатка;  
4 - завершение горения коксового остатка;

**I - зона термической подготовки;**  
**II - зона горения летучих веществ;**  
**III - зона прогрева коксового остатка;**  
**IV - зона горения коксового остатка**

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Горение **летучих веществ** занимает **0,2-0,5 с.** и происходит при температуре **400-600 °С.**

Горение **кокса** (рис. 3.5, зона IV) начинается при температуре около **1000 °С** и является наиболее длительным процессом **1,0-2,5 с.** (около 2/3 общего времени горения)

*При большом выходе летучих (бурые и молодые каменные угли, сланцы, торф) выделяющейся теплоты их горения достаточно для воспламенения коксовой частицы, а при малом выходе летучих возникает необходимость дополнительного прогрева коксовой частицы от окружающих раскаленных газов*

*У молодых топлив, имеющих большой выход летучих веществ, коксовый остаток составляет менее половины начальной массы частицы, поэтому их сжигание (при равных начальных размерах) происходит достаточно быстро и возможность недожога снижается. Старые по возрасту топлива имеют плотную коксовую частицу, горение которой занимает почти все время пребывания в топочной камере.*

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Кислород подводится к частице углерода за счет турбулентного массопереноса, имеющего достаточно высокую интенсивность,

**Спот**

**Слам**

**Слов**

**У поверхности частицы сохраняется тонкий газовый слой (пограничный. Этот слой в значительной мере тормозит подвод кислорода к поверхности**



# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Скорость химической реакции зависит от скорости подвода кислорода к поверхности реагирования и от кинетики химической реакции.

Количество  $O_2$ , подведенное в единицу времени:

*Поверхность ламинарного слоя*

$$G = A \cdot (C_{\text{пот}} - C_{\text{лам}})$$

*A – коэф. турбулентной диффузии*

*Поверхность частиц:*

$$G = D/\delta \cdot (C_{\text{лам}} - C_{\text{пот}}),$$

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

*Количество подводимого к поверхности кислорода*

$$G_{\text{ок}} = \frac{1}{1/A + \delta/D} (C_{\text{пот}} - C_{\text{сл}})$$



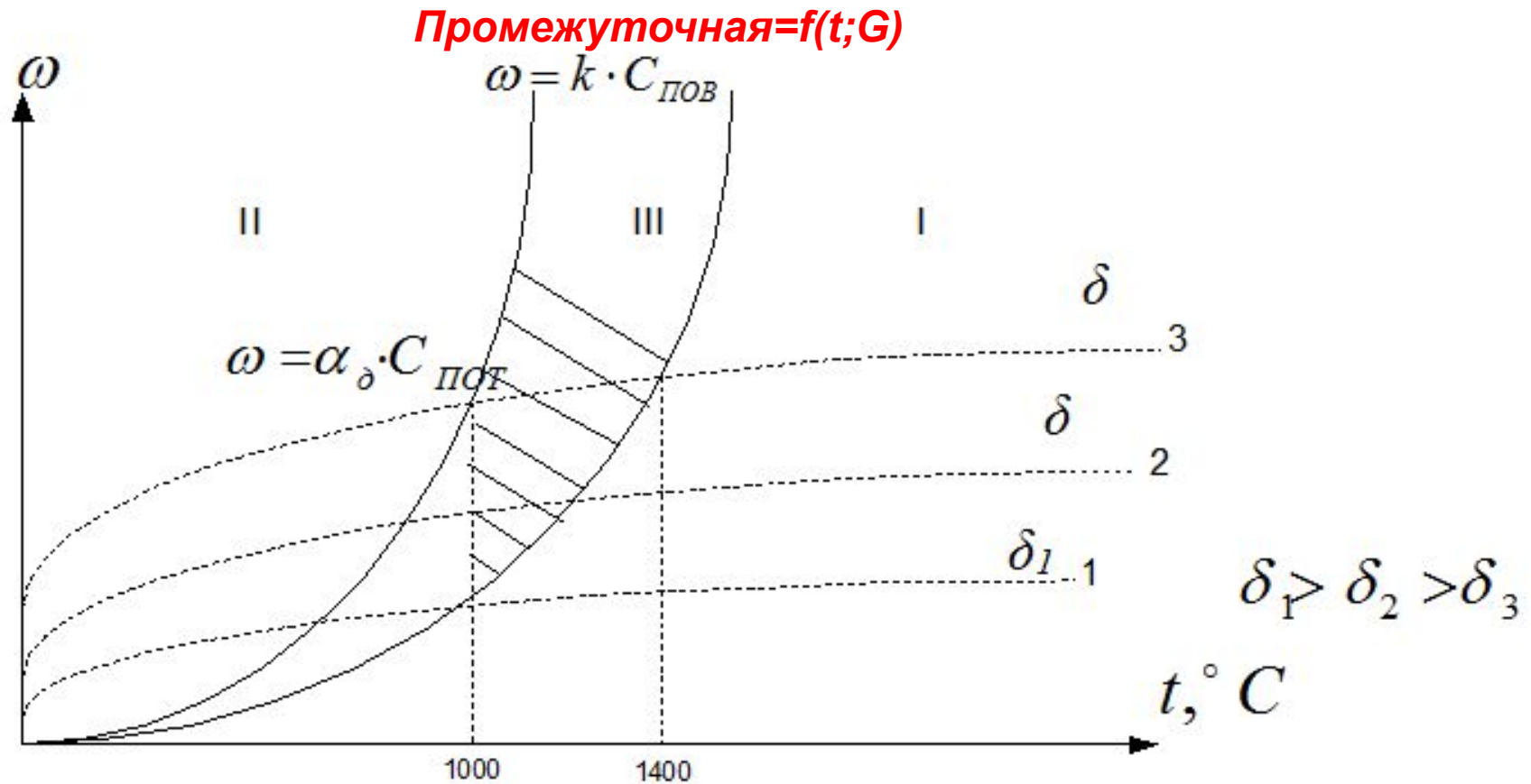
$$G_{\text{ок}} = k_{\text{д}} (C_{\text{пот}} - C_{\text{пов}})$$

*подвод кислорода к реагирующей поверхности твердого топлива определяется константой скорости диффузии и разностью концентраций кислорода в потоке и на реагирующей поверхности*

*Константа скорости диффузии*

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{1/A + \delta/D} = \frac{AD}{(A\delta + D)}$$

# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА



## **Кинетическая=f(t)**

скорость процесса горения  
ограничивается кинетическим  
или химическим сопротив-  
лением процесса горения

## **Диффузионная=f(G)**

скорость реакции горения  
ограничивается скоростью  
подвода кислорода



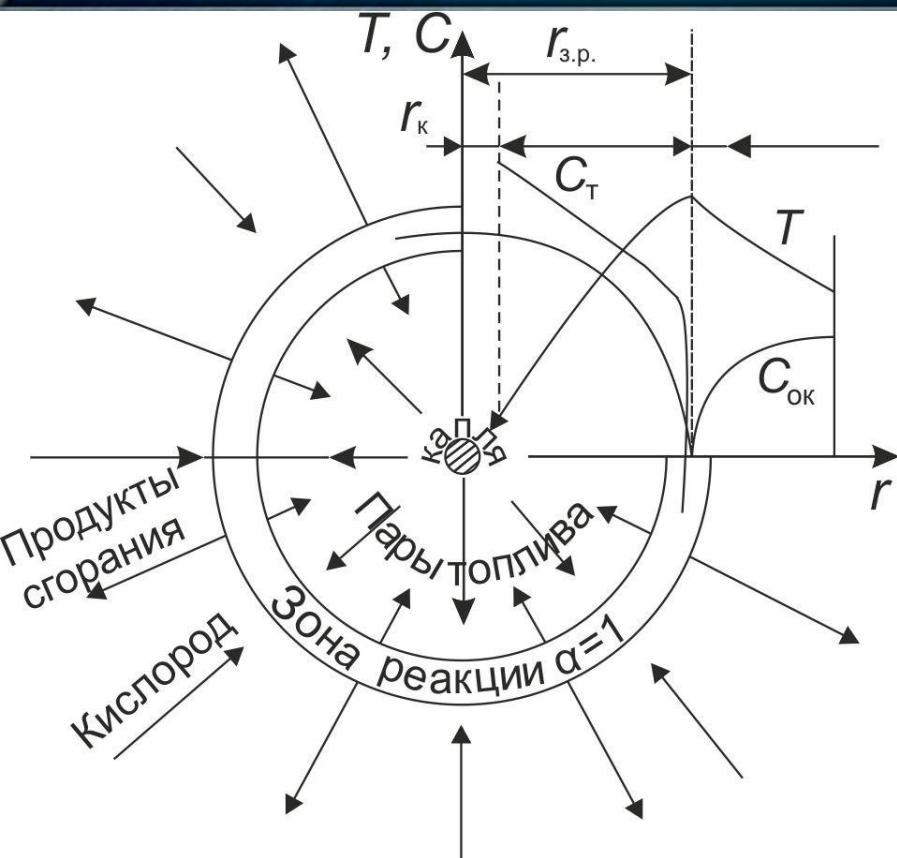
# ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Область чисто диффузионного горения пылевидного топлива характерна для ядра факела, отличающегося наиболее высокой температурой горения, и зоны догорания, где концентрации реагирующих веществ уже малы и их взаимодействие определяется законами диффузии.

Воспламенение любого топлива начинается при относительно низких температурах, в условиях достаточного количества кислорода, т. е. в кинетической области. В этой области горения определяющую роль играет скорость химической реакции, зависящая от таких факторов, как реакционная способность топлива и уровень температуры. Влияние аэродинамических факторов в этой области горения незначительно.

# ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

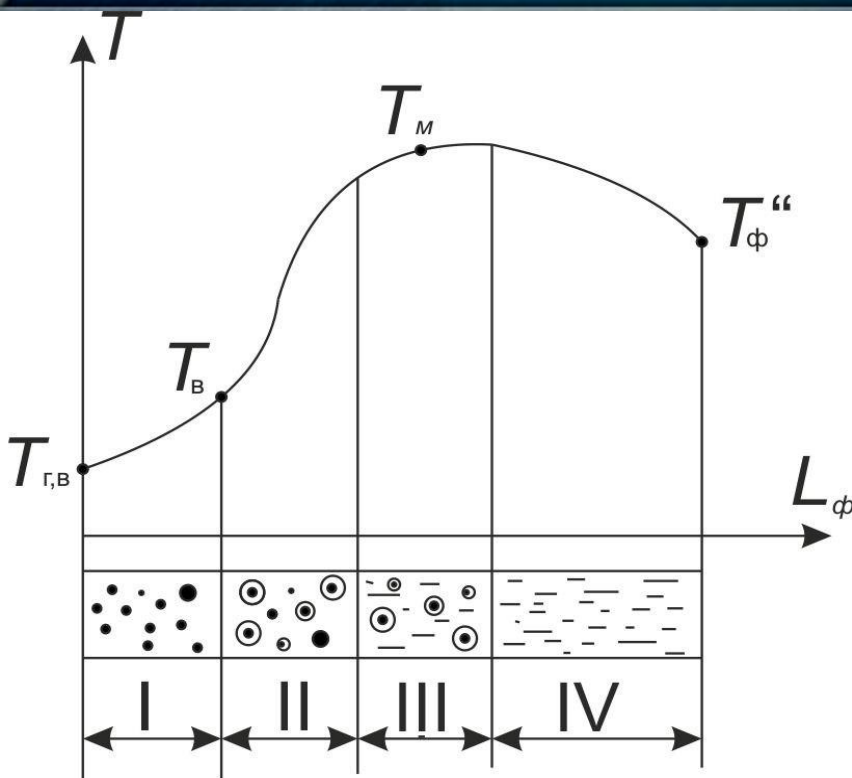
# ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА



1. при поступлении в зону высоких температур **капля мазута** вначале **испаряется** с поверхности за счет подводимой теплоты
1. **пары топлива** смешиваются с воздухом, поступающим из окружающей среды, **подогреваются до температуры воспламенения и горят** в газообразном состоянии
1. **На расстоянии от капли  $r$**  достигается стехиометрическое соотношение между массой горючих газов и кислорода, и **устанавливается фронт горения** (зона реакции)



# ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА



- I – зона смешения с воздухом и прогрев капель;
- II – кинетическая зона горения мелких капель;
- III – диффузионное горение крупных капель;
- IV – зона догорания и охлаждения продуктов сгорания;

$T_{Г,В}$   $T_B$  – температуры горячего воздуха и воспламенения паров мазута;  
 $T_M$   $T_{\phi}''$  – максимальная температура горящего факела и продуктов сгорания на выходе из камеры)

# ГОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

# ГОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

При горении газов протекают разветвленные реакции, в процессе которых один активный центр порождает два или большее число новых активных центров - Теория цепных реакций академика Н. Н. Семенова.



# ГОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

*Цепная разветвленная реакция включает следующие процессы:*

**1.Периодом индукции** - накопления активных центров реакции в виде заряженных частиц за счет разрушения части исходных молекул другими, обладающими большими энергиями движения, выше энергии связи атомов в молекуле (при высокой температуре вступающих в реакцию веществ период индукции занимает от долей секунды до 1-2 секунд)



**1.Зарождение цепей** - процесс, при котором одна активная частица, реагируя с исходными, вызывает образование двух или нескольких новых активных частиц

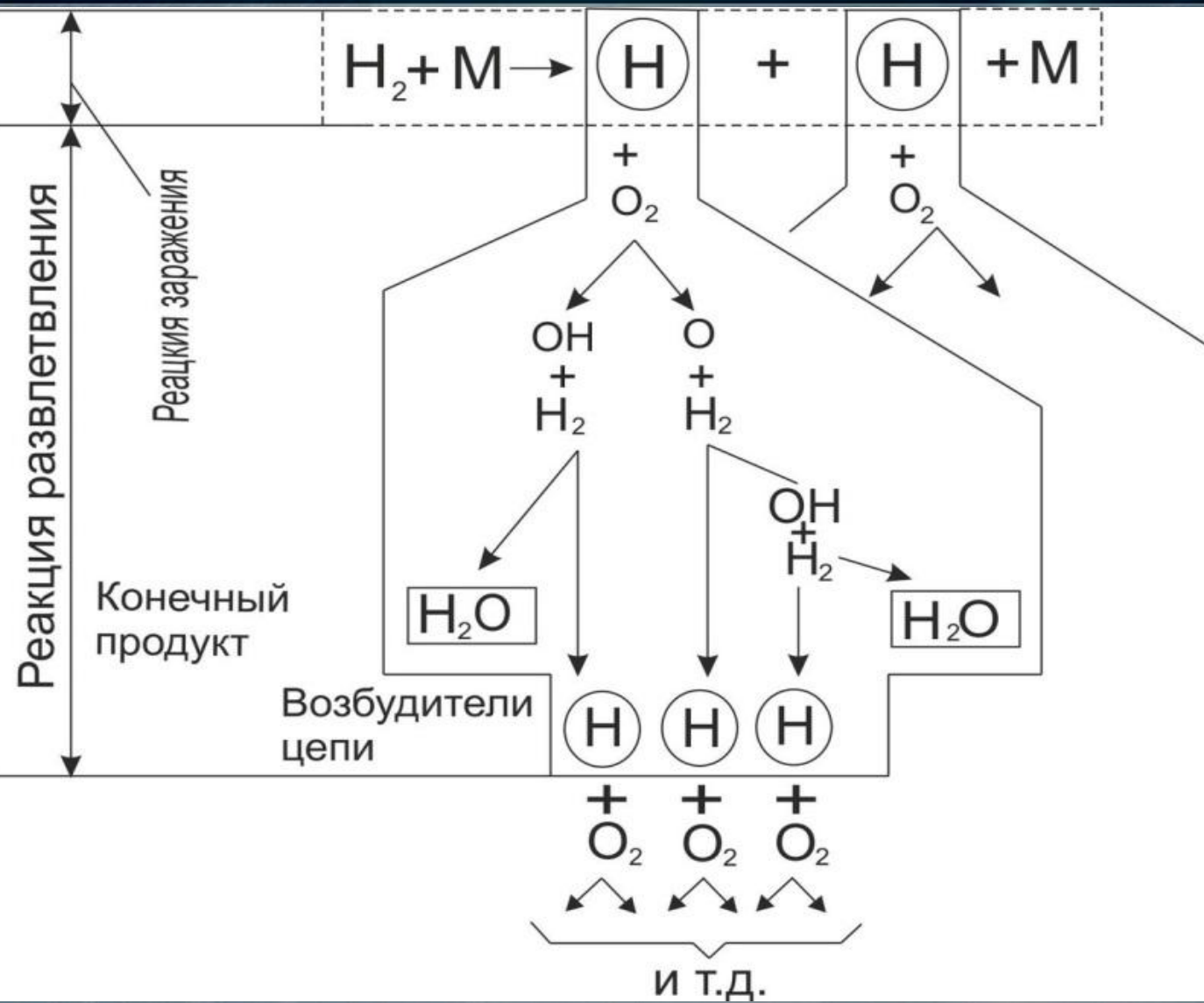


**1.Замедление реакции** по мере использования горючих компонентов



**1.Обрыв цепей** и реакция вырождается - горение прекращается.

# ГОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА



возбудитель цепной реакции



конечный продукт

# ГОРЕНИЕ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

Трудность обеспечения полного смешения расхода газа с воздухом за короткий промежуток времени связан с большим различием объемных расходов газа и воздуха — на сжигание  $1 \text{ м}^3$  газа требуется  $10 \text{ м}^3$  воздуха.

Для полноты перемешивания приходится вводить газ в поток воздуха внутри горелки большим количеством мелких струй малого диаметра и с большой скоростью. Воздушный поток также сильно турбулизуется в специальных завихрывающих устройствах.



# МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС КОТЛА

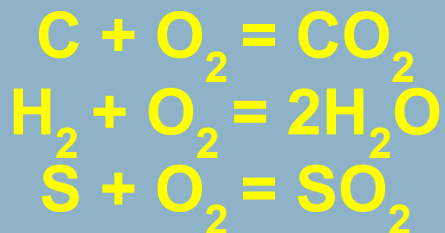
# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА

$V^0$  – это объем воздуха при нормальных условиях, который требуется для полного сгорания единицы топлива [ $\text{нм}^3/\text{кг}$ ] или [ $\text{нм}^3/\text{м}^3$ ]

# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

**горение**  
H, C, S + O<sub>2</sub>

**Полное**



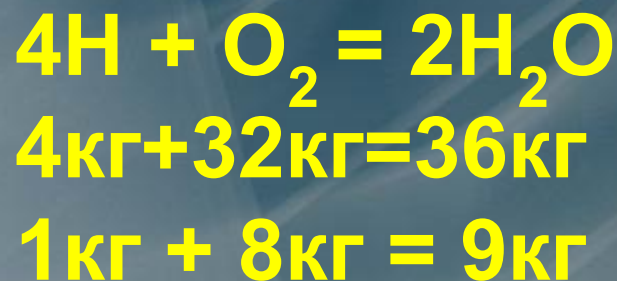
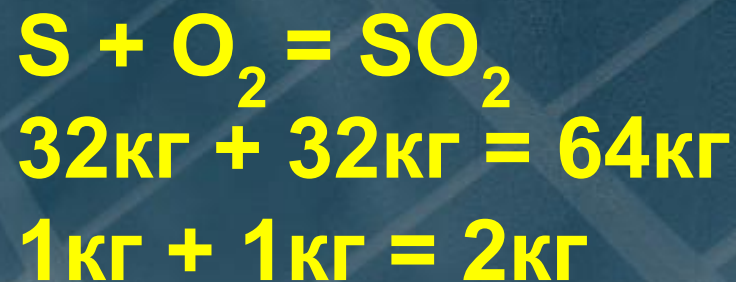
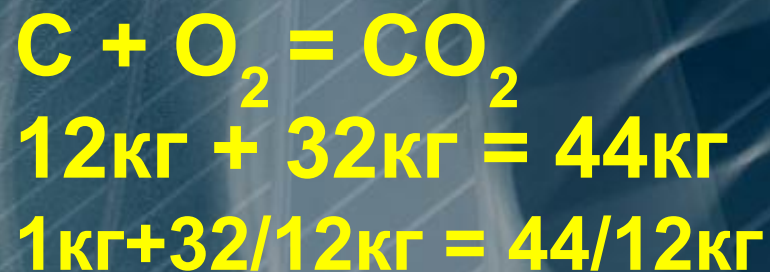
**Неполное**

+CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>  
Продукты  
неполного  
окисления



# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

Стехиометрических уравнений горения для твердого и жидкого топлив:



# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

воздух содержит 21%  $O_2$



$$V_{O_2}^0 = 21/100 \cdot V^0$$



$$V^0 = 100/21 \cdot V_{O_2}^0 = 100/21 \cdot (G_{O_2} / \rho_{O_2}),$$

где

$G_{O_2}$  – вес  $O_2$  для окисления 1 кг топлива (кг  $O_2$  / кг топл.)

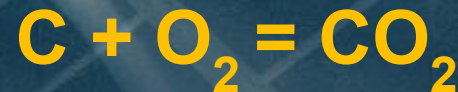
$\rho_{O_2} = \mu_{O_2} / V_{\mu O_2} = 32 / 22,41 = 1,428 \text{ кг/м}^3$  – плотность кислорода при нормальных условиях

$\mu_{O_2}$  – молекулярный вес  $O_2$ ,

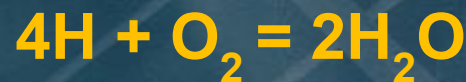
$V_{\mu O_2}$  – объём 1 кмоль идеального газа при н.у.

# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

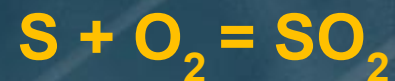
$$V^0 = 100/21 \cdot (G_{O_2} / \rho_{O_2})$$



$$1 \text{ кг} + 32/12 \text{ кг} = 44/12 \text{ кг}$$



$$1 \text{ кг} + 8 \text{ кг} = 9 \text{ кг}$$



$$1 \text{ кг} + 1 \text{ кг} = 2 \text{ кг}$$

$$V^0 = \frac{100 \cdot 22.41}{21 \cdot 32} \cdot \left( \frac{C^P}{100} \cdot \frac{32}{12} + \frac{H^P}{100} \cdot 8 + \frac{S_{\text{Л}}^P}{100} - \frac{O^P}{100} \right) \left[ \frac{\text{нм}^3 \text{ в - ха}}{\text{кг топл.}} \right]$$

$$V^0 = 0,889 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P) + 0,265 \cdot H^P - 0,033 \cdot O^P \quad [\text{нм}^3/\text{кг}]$$



# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

$$V^0 = \frac{100 \cdot 22.41}{21 \cdot 32} \cdot \left( \frac{C^P}{100} \cdot \frac{32}{12} + \frac{H^P}{100} \cdot 8 + \frac{S_{\text{Л}}^P}{100} - \frac{O^P}{100} \right) \left[ \frac{\text{нм}^3 \text{ в - ха}}{\text{кг топл.}} \right]$$



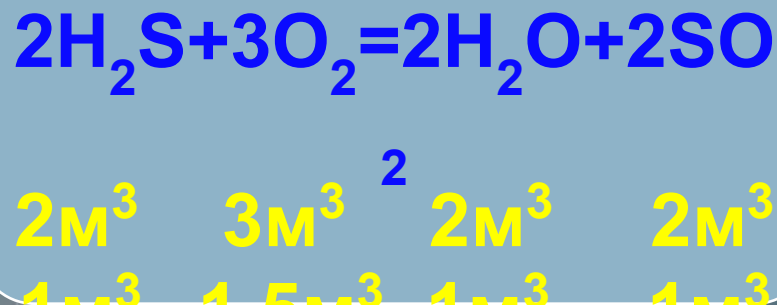
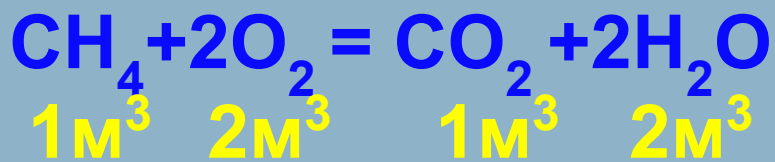
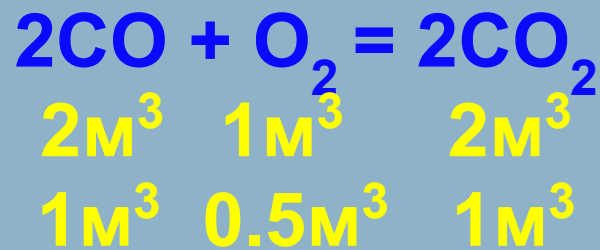
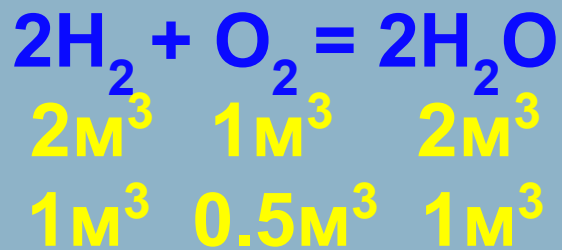
$$V^0 = 0,889 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P) + 0,265 \cdot H^P - 0,033 \cdot O^P$$

[нм<sup>3</sup>/кг]

# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для газообразного топлива

Для газообразного топлива состав горючих элементов выражается в процентах объёма

1 кмоль любого газа при нормальных условиях занимает один и тот же объем (22,41 нм<sup>3</sup>/кмоль)



# ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для газообразного топлива



$$V^0 = \frac{100}{21} \cdot 0,01 \cdot (0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + (\sum_{n=1} (n + \frac{m}{4}) \cdot C_n H_m) + 1,5 \cdot H_2S - O_2)$$

$\left[ \frac{\text{нм}^3 \text{ воздуха}}{\text{нм}^3 \text{ топлива}} \right]$

где  $H_2$ ,  $CO$  ... – в процентах объема



# КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Поскольку процесс перемешивания топлива с воздухом неидеален, то для обеспечения полного сгорания топлива, необходимо подавать воздуха в топку больше  $V^0$ .

Коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$ ) называется отношение действительного количества воздуха ( $V_d$ ) к теоретически необходимому ( $V^0$ ):

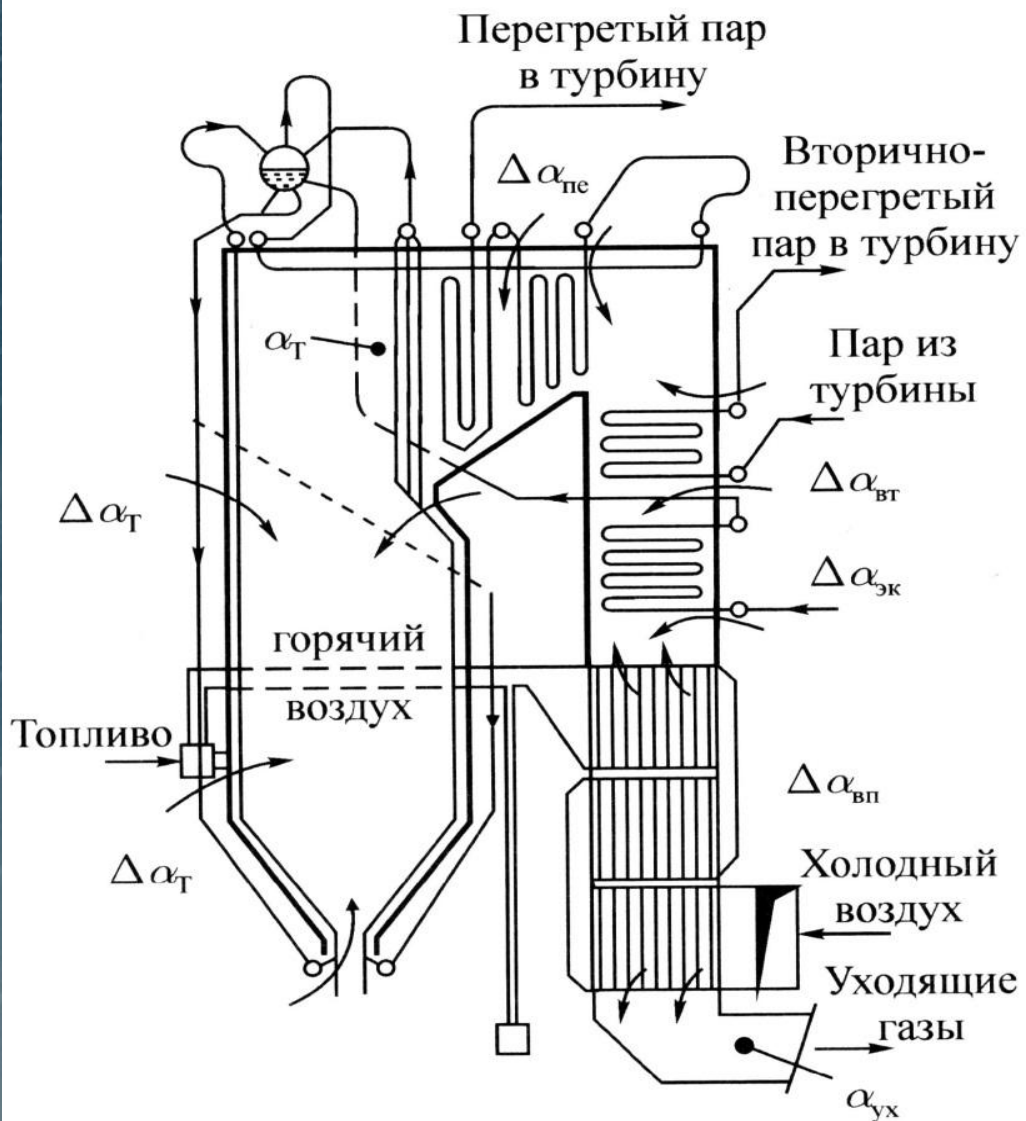
$$\alpha = V_d / V^0$$

$\alpha_T = 1,2 - 1,25$  – для твердого топлива;

$\alpha_T = 1,05 - 1,1$  – для газа и мазута (топка под разрежением);

$\alpha_T = 1,02 - 1,05$  – для газа и мазута (топка “под наддувом”).

# КОЭФФИЦИЕНТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для твердого топлива

При полном сгорании топлива и  $\alpha=1$ :

$$V_{\Gamma}^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{с.г.}}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0$$

$V_{\text{RO}_2}$  – трёхатомные газы

$V_{\text{с.г.}}^0$  – сухие газы



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для твердого топлива

Объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \frac{G_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \frac{G_{SO_2}}{\rho_{SO_2}} = \frac{C^P \cdot 44 \cdot 22,4}{100 \cdot 12 \cdot 44} + \frac{S^P \cdot 2 \cdot 22,4}{100 \cdot 64} = \frac{C^P \cdot 22,4}{100 \cdot 12} + \frac{S^P \cdot 22,4}{100 \cdot 32}$$

[НМ<sup>3</sup>/КГ]

Объем азота:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + \frac{N^P \cdot 22,4}{100 \cdot 28}$$

азот  
воздуха

азот  
топлива

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для твердого топлива

Объем водяных паров:

окисление  
водорода

влага  
топлива

влага  
воздуха

пар, при  
распыле  
мазута  
в форсунк



$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot H^P + 0,0161 \cdot V^0 + 0,0124 \cdot W^P + 124 \cdot G_{\text{ф}}$$

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для твердого топлива

Объем водяных паров:

При сжигании топлива с  $\alpha > 1$ :

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (1 + 0,0161) \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0$$

При химически неполном горении и  $\alpha > 1$  :

$$V_{\Gamma} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_4} + \dots$$



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для газообразного топлива

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum(n \cdot C_n H_m)) \text{ [нм}^3/\text{нм}^3]$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2 \text{ [нм}^3/\text{нм}^3]$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot (H_2 + H_2S + \sum(m/2 \cdot (C_n H_m))) + 0,124 \cdot d_{\text{газа}} + 0,124 \cdot d_{\text{воздуха}} \cdot V^0 \text{ [нм}^3/\text{нм}^3]$$

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Приближенная *углекислотная* формула:

$$\alpha = RO_2^{\text{макс}} / RO_2$$

Точная *углекислотная* формула:

$$\alpha = (79 / RO_2 + \rho) / (79 / RO_2^{\text{макс}} + \rho)$$

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Значения  $\alpha$  можно определить по результатам газового анализа продуктов сгорания. В простейшем случае, если содержанием азота в топке пренебречь и считать, что концентрация азота в продуктах сгорания равна 79 %, при наличии в продуктах сгорания свободного кислорода коэффициент избытка воздуха можно определить по приближенной **кислородной** формуле:

$$\alpha = 21 / (21 - O_2)$$

Точная **кислородная** формула:

$$\alpha = 1 / [1 - 79 / 21 \cdot (O_2 / N_2)]$$



# ЭНТАЛЬПИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

# ЭНТАЛЬПИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Энтальпия продуктов сгорания при сжигании жидкого, газообразного и малозольного твердого топлива  $H$ , кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>, является суммой физической теплоты трехатомных газов ( $RO_2$ ), двухатомных газов ( $N_2$ ) и водяных паров ( $H_2O$ ).

При  $\alpha = 1$

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{RO2} \cdot C_{RO2} + V_{N2}^0 \cdot C_{N2} + V_{H2O}^0 \cdot C_{H2O})$$

При  $\alpha > 1$

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot H_{B}^0$$

# ЭНТАЛЬПИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

При сжигании твердых топлив с высокой зольностью для расчета энтальпии продуктов сгорания сначала определяют значение приведенной зольности топлива, %/(кДж/кг):

$$A_{\text{пр}} = 1000 \cdot A^{\text{р}} \cdot a_{\text{ун}} / Q_{\text{н}}^{\text{р}}$$

где  $a_{\text{ун}}$  – доля золы, уносимой через газоходы котла;  
 $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Если  $A_{\text{пр}}$  больше 1,4, то при определении энтальпии продуктов сгорания учитывают величину физической теплоты золы  $H_{\text{з}}$ , кДж/кг:

$$H_{\text{з}} = (A^{\text{р}} \cdot a_{\text{ун}} \cdot C_{\text{з}} \cdot t_{\text{з}}) / 100$$



# ЭНТАЛЬПИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

С учетом величины физической теплоты зольной энтальпия продуктов сгорания определяется по формуле:

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{\text{RO}_2} \cdot C_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 \cdot C_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + A^p \cdot a_{\text{ун}} \cdot C_3) / 100) \cdot \nu$$