

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ

ЧТО ТАКОЕ ГОРЕНИЕ?

Это процесс химического взаимодействия топлива и окислителя характеризующийся:

- .интенсивным выделением тепла
- .скачкообразным ростом температуры и концентрации продуктов горения
- .снижении концентрации окислителя
- .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;
Т–температура процесса в градусах °К.

K_p показывает долю молекул, участвующих в процессе горения.

k_o – характеристика полного числа столкновений молекул реагирующих веществ

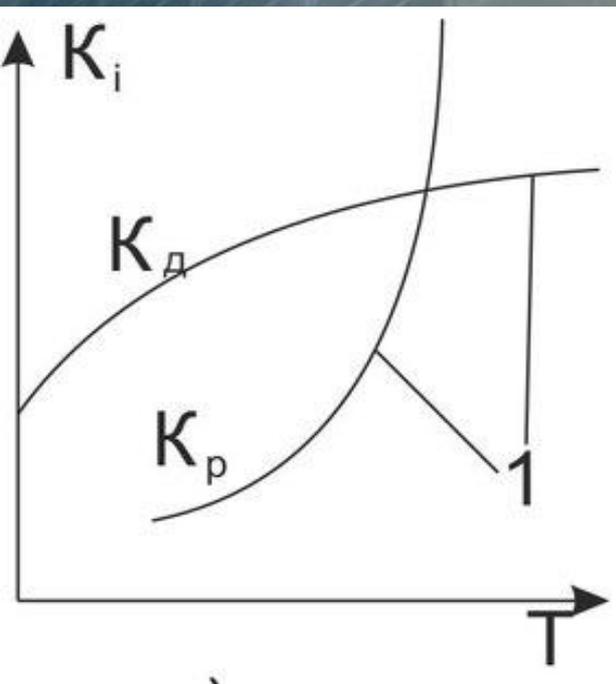
ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА

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

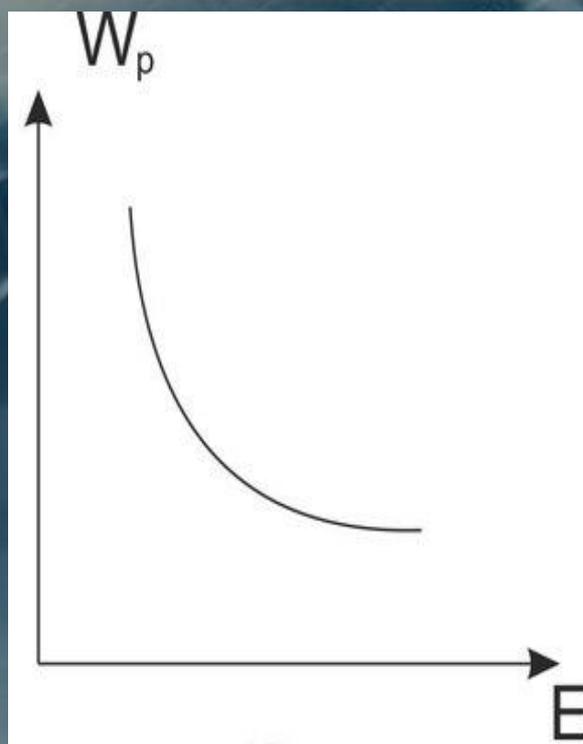
Энергия активации зависит от:
-величины внутриатомных связей в молекулах
-состояния вступающих в реакцию веществ
-от температуры в зоне реакции

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.

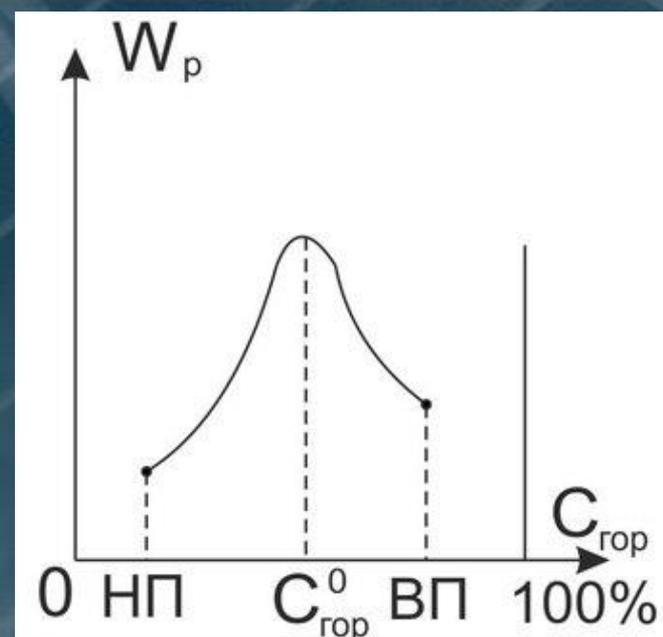
ИНТЕНСИВНОСТЬ(СКОРОСТЬ) ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА



Зависимость
константы реакции
горения K_p от
температуры



Изменение
скорости реакции
 ω_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

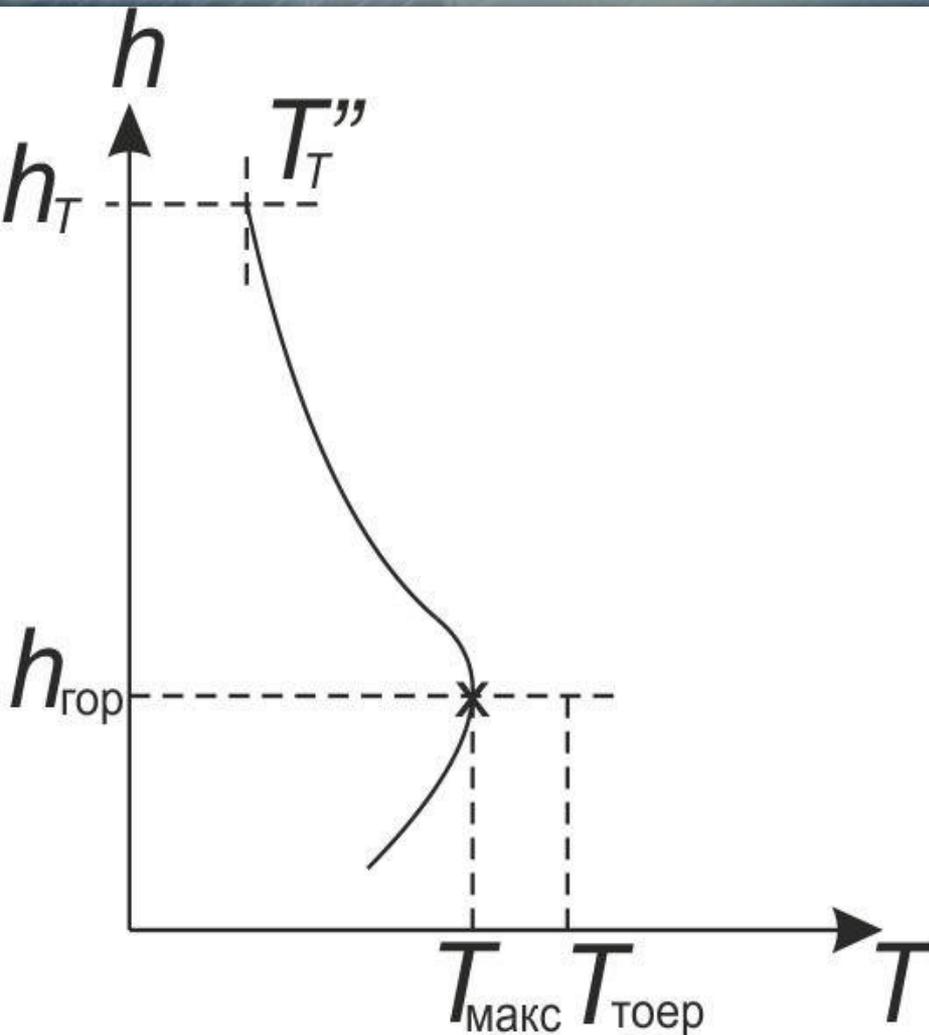
ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

- 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

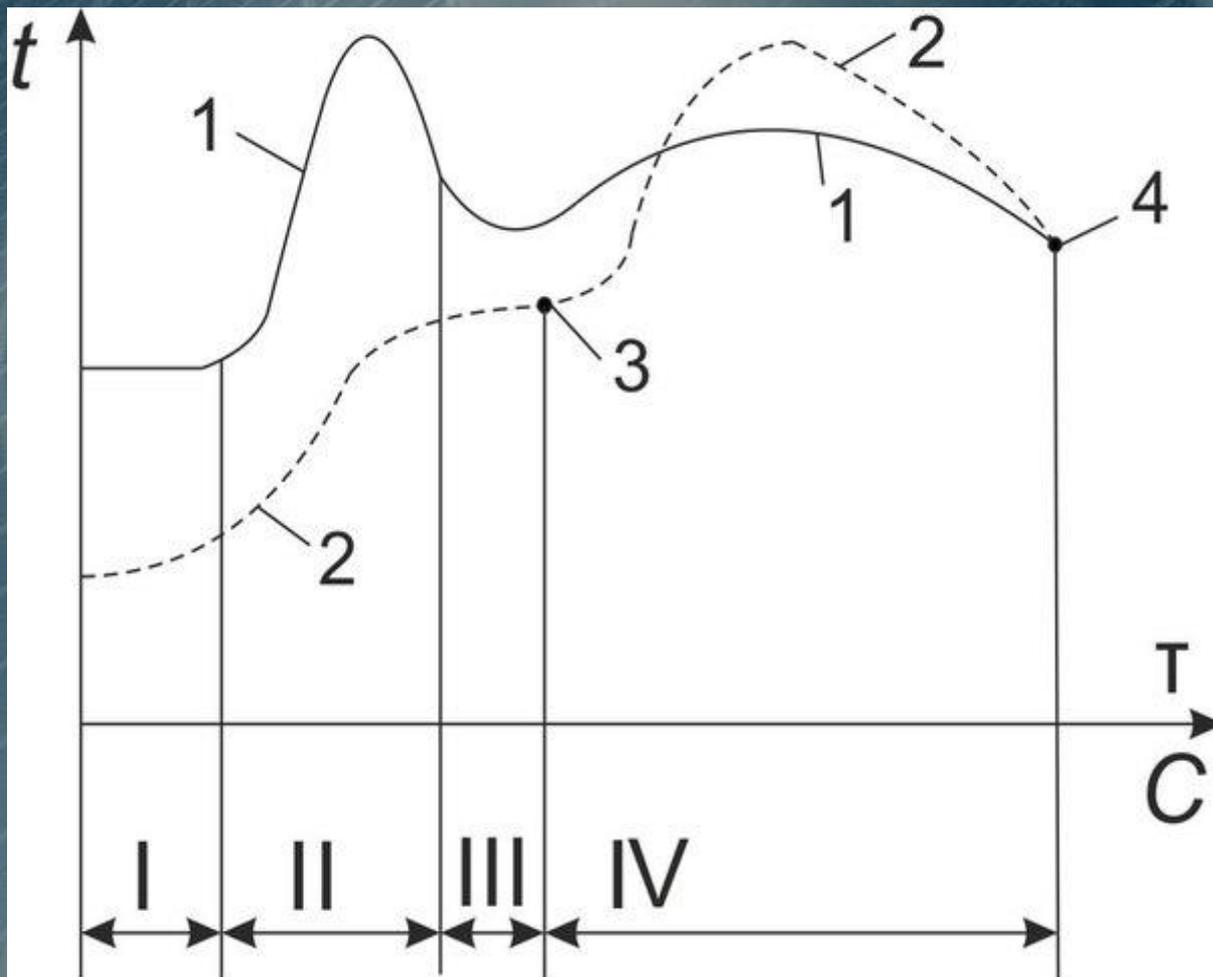
горение состоящее из
следующих стадий:

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.**

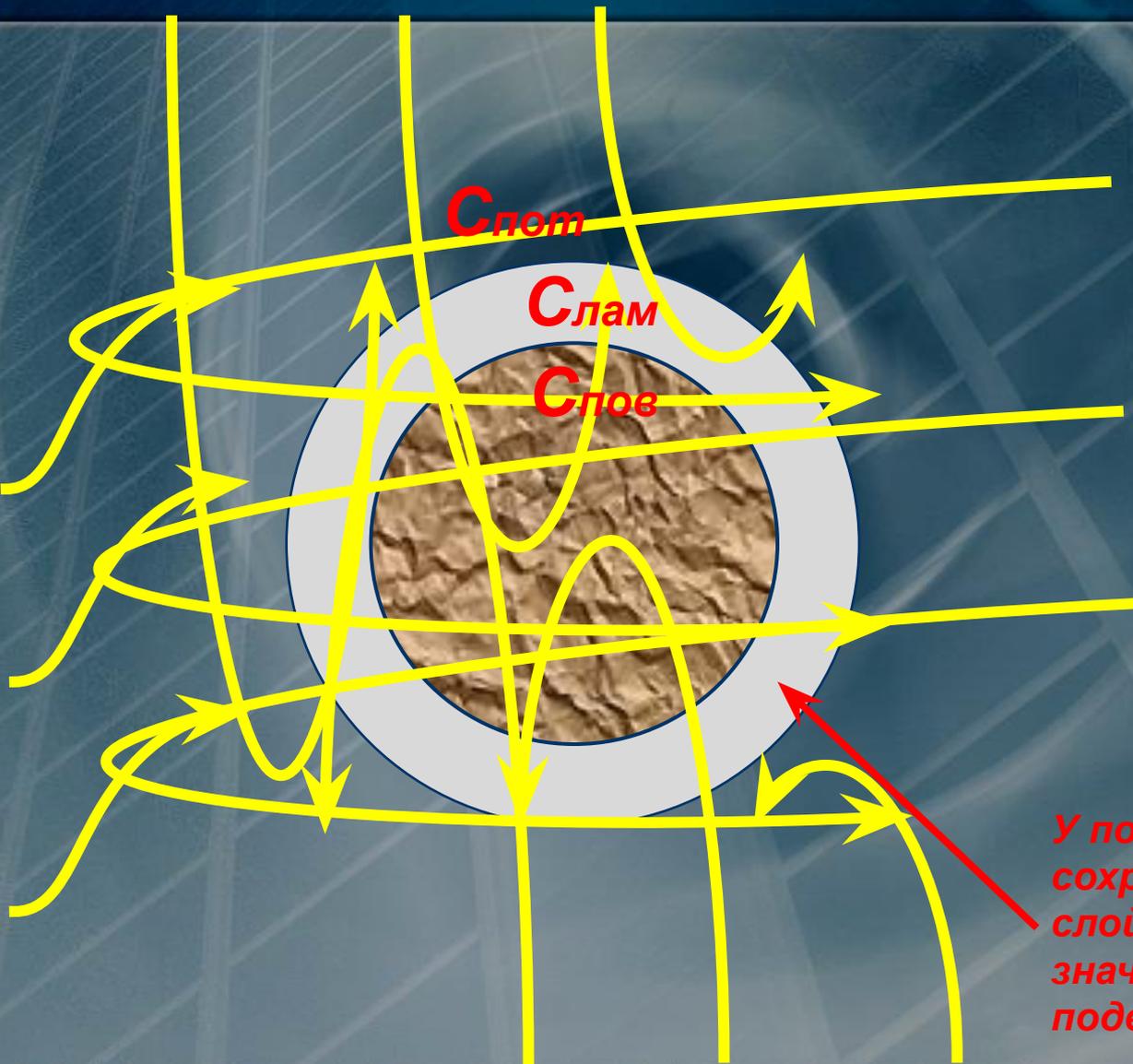
Горение **кокса** (рис. 3.5, зона IV) начинается при температуре около **1000 °С** и является наиболее длительным процессом **1,0-2,5 с.** (около 2/3 общего времени горения)

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,



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

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



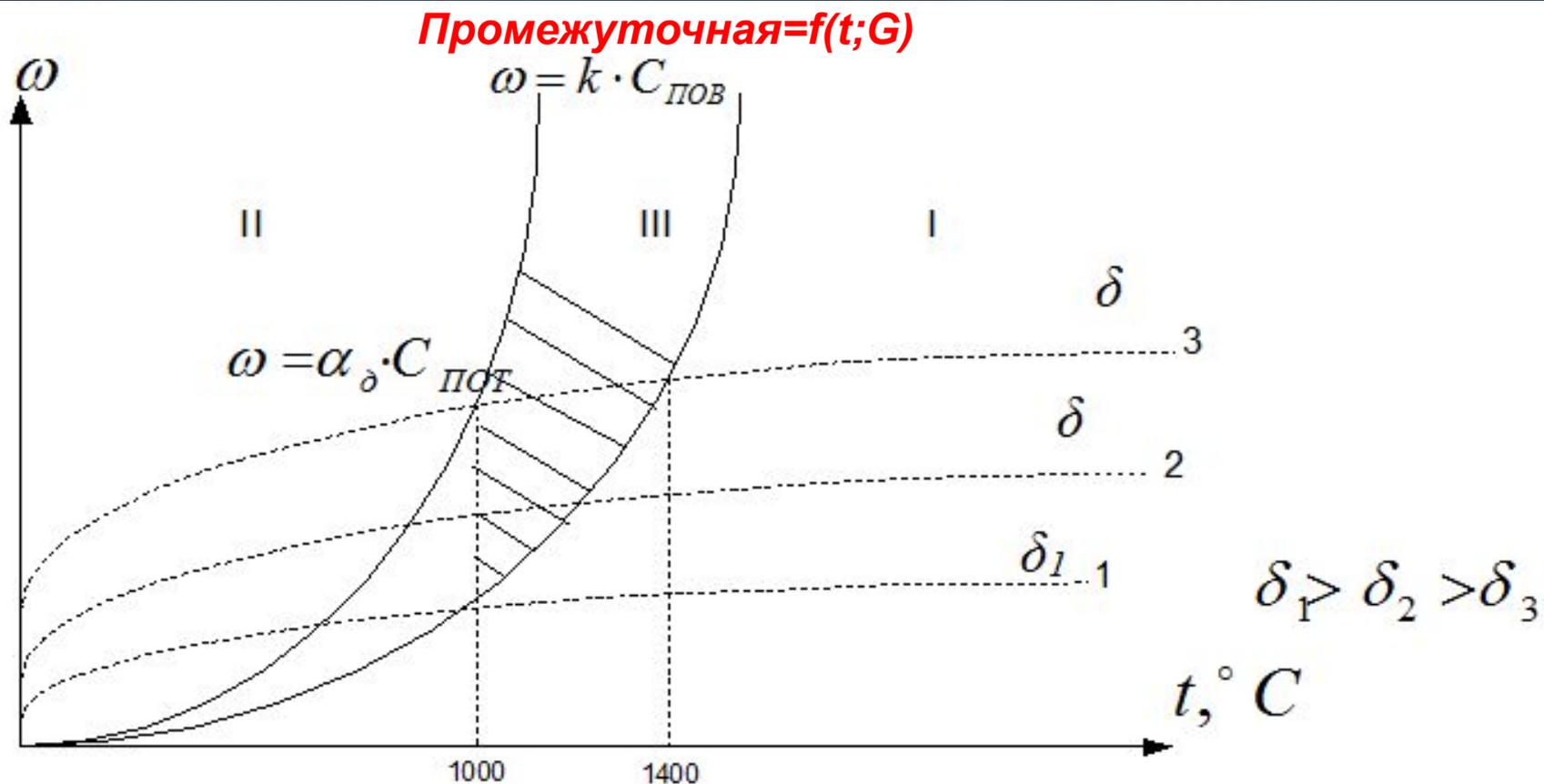
$$G_{\text{ок}} = k_{\text{д}} (C_{\text{пот}} - C_{\text{пов}})$$

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

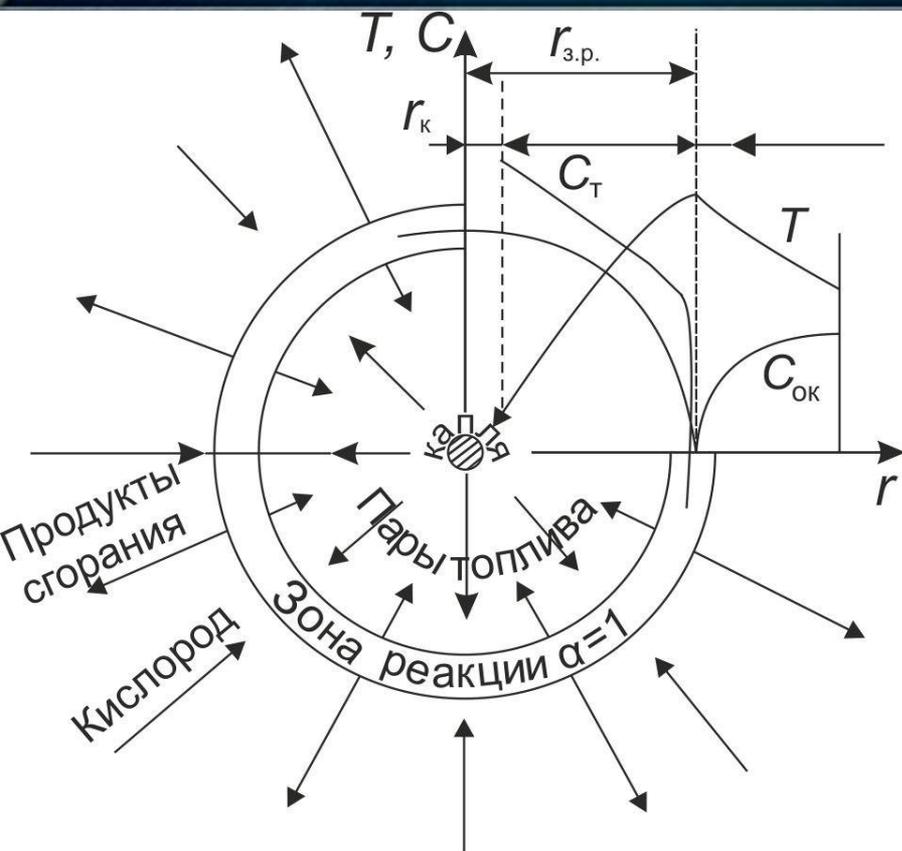
ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

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.

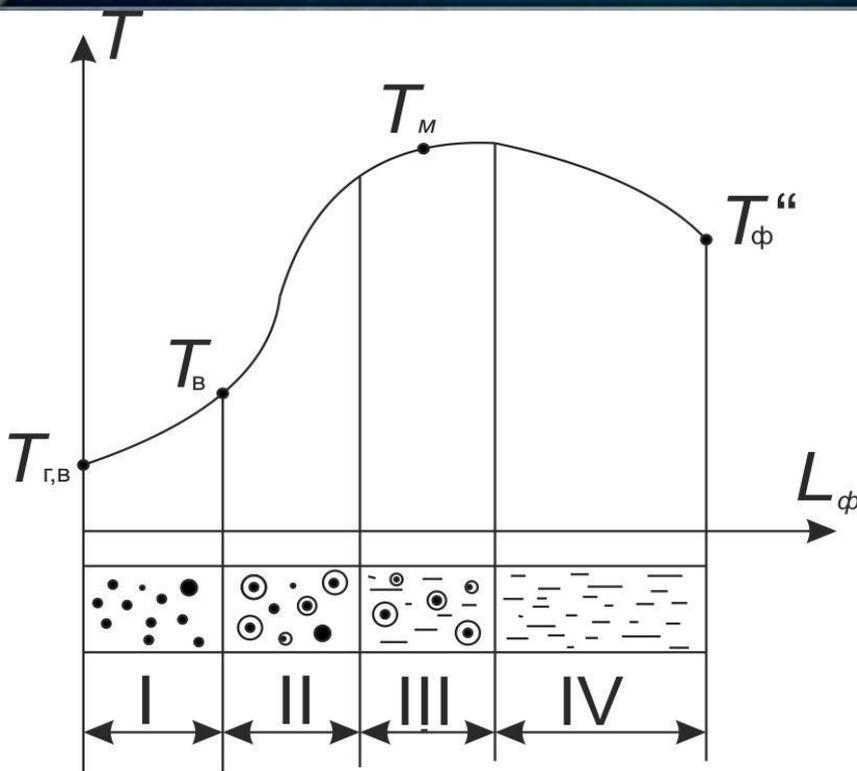
ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

ГОРЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА



1. при поступлении в зону высоких температур **капля мазута** вначале **испаряется** с поверхности за счет подводимой теплоты
2. **пары топлива** смешиваются с воздухом, поступающим из окружающей среды, **подогреваются до температуры воспламенения и горят** в газообразном состоянии
3. 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_{ϕ}'' – 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:

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)



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

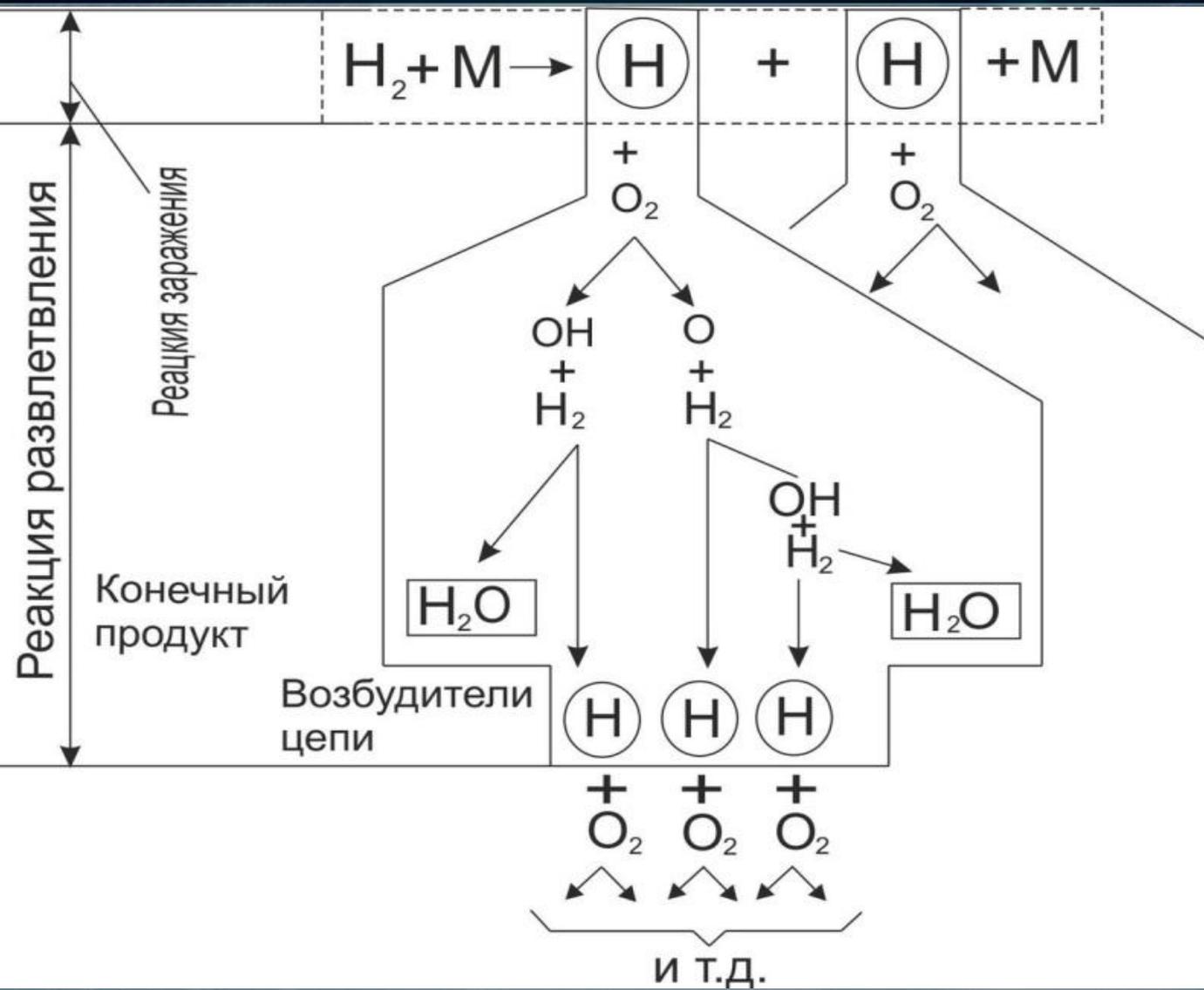


Замедление реакции по мере убывания горючих компонентов



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 м^3 газа требуется 10 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

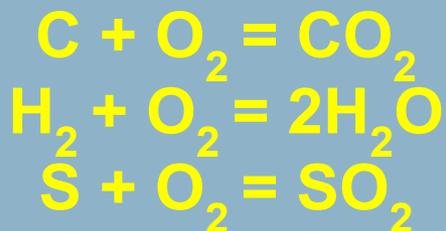
ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА

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 + O₂

Полное

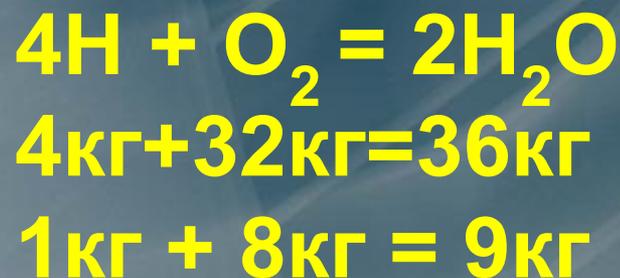
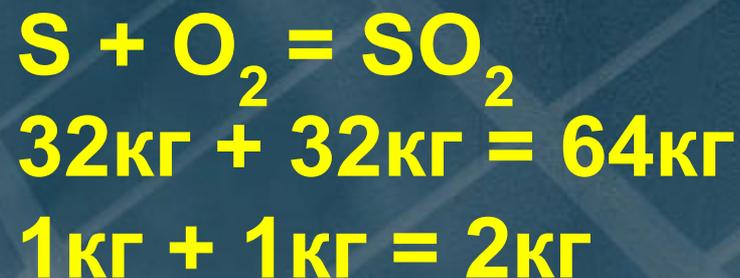


Неполное

+CO, H₂, CH₄
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.)

$\rho_{O_2} = \mu_{O_2} / V_{\mu O_2} = 32 / 22,41 = 1,428$ кг/м³ – плотность кислорода при нормальных условиях

μ_{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

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



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



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



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

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

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИ НЕОБХОДИМОЕ КОЛИЧЕСТВО ВОЗДУХА для твердого и жидкого топлив

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



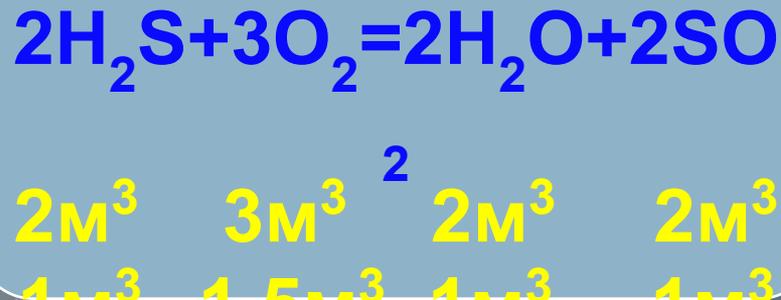
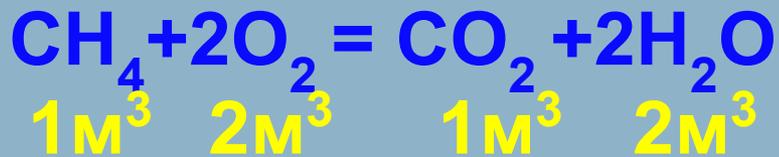
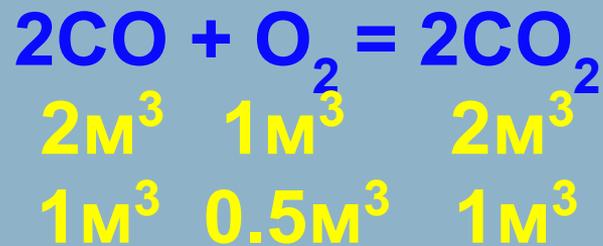
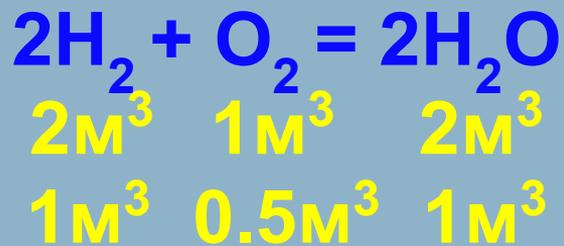
$$V^0 = 0,889 \cdot (C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P) + 0,265 \cdot H^P - 0,033 \cdot O^P$$

[нм³/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 нм³/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 (α) называется отношение действительного количества воздуха (V_d) к теоретически необходимому (V^0):

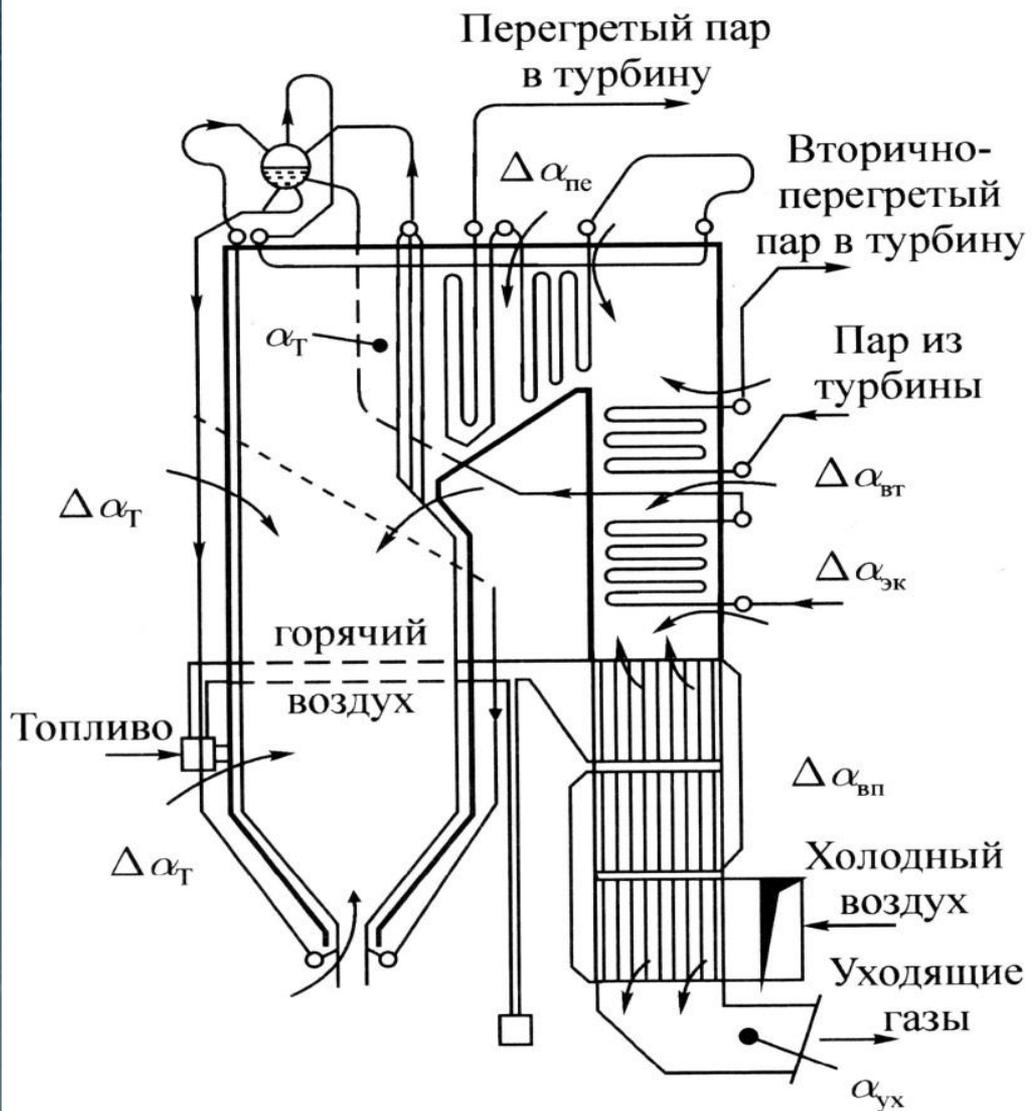
$$\alpha = V_d / V^0$$

$\alpha_T = 1,2 - 1,25$ – 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_{RO_2} – трёхатомные газы

$V_{\text{с.г.}}^0$ – сухие газы

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ для твердого топлива

Объем трехатомных газов:

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

[НМ³/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:

$$V_{H_2O}^0 = \frac{9 \cdot H^P \cdot 22,4}{100 \cdot 18} + \frac{W^P}{100 \cdot 0,804} + \frac{d_B \cdot V^0}{1000 \cdot 0,804} + \frac{G_\Phi}{0,804}$$

окисление водорода влага топлива влага воздуха пар, при распыле мазута в форсунке



$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^P + 0,0161 \cdot V^0 + 0,0124 \cdot W^P + 124 \cdot G_\Phi$$

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 α 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/м³, 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_3 , кДж/кг:

$$H_3 = (A^{\text{р}} \cdot a_{\text{ун}} \cdot C_3 \cdot t_3) / 100$$

ЭНТАЛЬПИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

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

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