

# Вторичные энергетические ресурсы

**Сухоцкий Альберт Борисович**

# **Горючие вторичные энергетические ресурсы**

**Этапы сжигание топлива. Теория  
горения углерода.**

**Определение количества воздуха  
необходимого для сжигания топлива.**

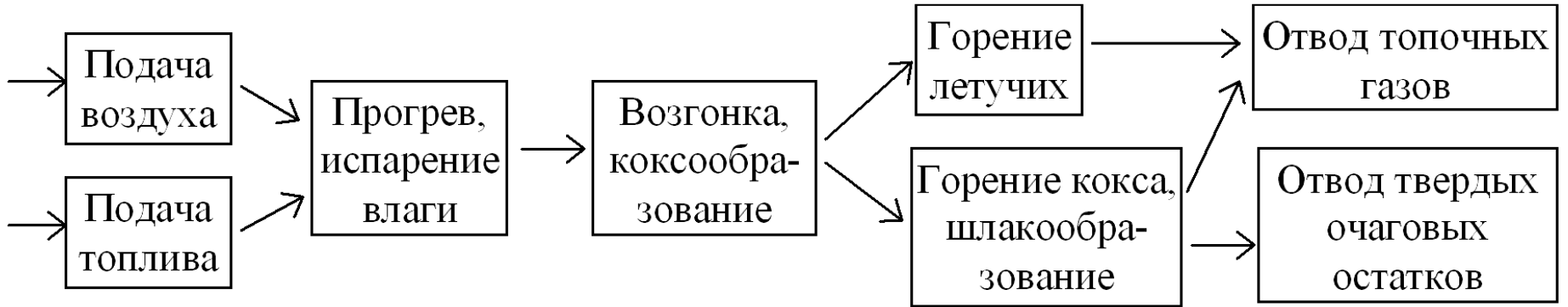
**Технологии сжигания топлива.**

**Определение количества воздуха  
необходимого для сжигания топлива**

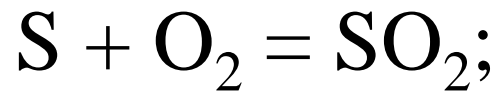
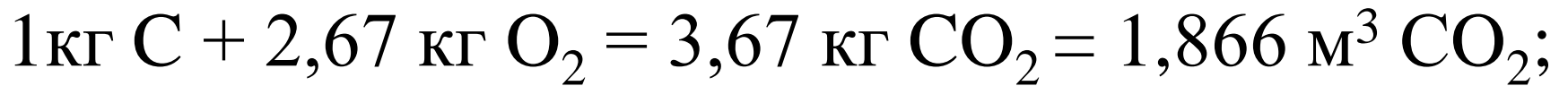
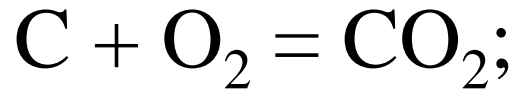
# Этапы сжигания твердого топлива

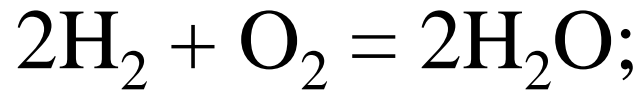
1. Высушивание топлива.
2. Пиролиз (газификация).
3. Воспламенение твердого топлива.
4. Сгорание летучих компонентов.
5. Дожег.
6. Образование шлака.

Все эти стадии при сжигании топлива происходят одновременно.



# Определение количества воздуха необходимого для сжигания топлива





Тогда необходимое количество кислорода для сжигания топлива

$$\text{O}_2 = (2,67 \text{ C}^p + 1,0 \text{ S}^p + 8 \text{ H}^p - 1,0 \text{ O}^p)/100;$$

Тогда теоретически необходимое количество воздуха для сжигания воздуха (/0,23)

$$m_B^0 = 0,115C^P + 0,343H^P + 0,043(S^P - O^P), \quad \text{кг/кг.}$$

$$V_B^0 = 0,0889C^P + 0,265H^P + 0,033(S^P - O^P), \quad \text{м}^3/\text{кг.}$$

Для ствольной древесины ( $C^Г = 50,9\%$ ,  $H^Г = 6,1\%$ ,  $O^Г = 41,9\%$ ,  $N^Г = 0,8\%$ ,  $S^Г = 0,3\%$ ) количество воздуха, необходимого для полного сгорания можно определить по упрощенной формуле:

$$m_B^0 = 0,0612(100 - W^P - A^P), \quad \text{кг/кг.}$$

Сгорание является **полным**, если все горючие компоненты топлива полностью прореагировали с кислородом. При недостатке воздуха сгорание является **неполным** (образуется окись углерода).

Для обеспечения полного сгорания топлива обычно подводят больше, чем теоретически необходимо воздуха.

Отношение действительно поданного воздуха к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха**

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



**Химический недожог** это процесс неполного сгорания топлива из-за нехватки воздуха ( $\alpha < 1$ ).

**Механический недожог** — это процесс неполного сгорания топлива из-за его размеров, т.е. невозможность кислорода вступить в реакцию с углеродом. Соответственно, механический недожог возможен только при сжигании твердых топлив.

При избытке воздуха ( $\alpha \gg 1$ ) увеличиваются потери тепла с уходящими дымовыми газами (снижается КПД котла) и увеличивается образование термических оксидов азота  $\text{NO}_x$ .

Показателем эффективности процесса является содержание  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  в отходящих газах (признак  $\text{CO}$  в дымовых газах – черный дым).

Выбросы, образующиеся при неполном сгорании, могут быть вызваны:

- неправильным смешением воздуха и топлива в топливной камере, в результате чего образуются локальные зоны с недостатком воздуха;
- недостаточным количеством кислорода;
- низкой температурой горения;
- недостаточным временем пребывания в топке.

# Температура горения

выражается из теплового баланса топки:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} + i_{\text{в}} = i_{\text{д.г}} + i_{\text{з}}$$

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} + c_p^{\text{в}} m_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{о.с}}) = c_p^{\text{г}} m_{\text{г}} (t^{\text{гор}} - t_{\text{о.с}}) + c_p^{\text{з}} m_{\text{з}} (t^{\text{гор}} - t_{\text{о.с}})$$

где  $c_p^{\text{г}}$  и  $c_p^{\text{в}}$  — удельная массовая изобарная теплоемкость дымовых газов и воздуха. Значение удельной изобарной теплоемкости дымовых газов среднее в диапазоне 1000-2000°С соответствует: 1,34 кДж/(кг °С).

Если пренебречь теплоемкостью золы, то температура горения (температура продуктов сгорания) рассчитывается по формуле:

$$t^{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}} + c_{\text{p}}^{\text{B}} \alpha m_{\text{B}}^0 (t_{\text{B}} - t_{\text{o.c}})}{c_{\text{p}}^{\text{Г}} (1 + \alpha m_{\text{B}}^0)} + t_{\text{o.c}}$$

Следовательно, температура горения зависит, прежде всего, от трех факторов: количества подаваемого воздуха  $\alpha$ , влажности топлива  $W_{\text{p}}$  и температуры подаваемого воздуха.

Для ствольной древесины ( $C^{\Gamma} = 50,9\%$ ,  
 $H^{\Gamma} = 6,1\%$ ,  $O^{\Gamma} = 41,9\%$ ,  $N^{\Gamma} = 0,8\%$ ,  $S^{\Gamma} = 0,3\%$ )  
температуру горения можно определить по  
упрощенной формуле:

$$t^{\text{гор}} = \frac{189(100 - A^p - 1,13W^p) + \alpha 0,0612(100 - W^p - A^p)t_{\text{в}}}{1,34(1 + \alpha 0,0612(100 - W^p - A^p))}$$

# Энергетический КПД (утилизации энергии топлива) топки

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} - Q_{\text{Т.д}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{у.г.}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{зола}} + Q_{\text{изол}},$$

$$1 - q_{\text{Т.д}} = q_{\text{пол}} + q_{\text{у.г.}} + q_{\text{х.н}} + q_{\text{м.н}} + q_{\text{зола}} + q_{\text{изол}},$$

Энергетический коэффициент полезного действия топки определяется по формуле

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Э}} &= Q_{\text{пол}} / Q_{\text{H}}^{\text{P}} = q_{\text{пол}} = \\ &= 1 - (q_{\text{у.г.}} + q_{\text{х.н}} + q_{\text{м.н}} + q_{\text{Т.д}} + q_{\text{изол}} + q_{\text{зола}}), \end{aligned}$$

# Определение удельных затрат энергии на работу тяго-дутьевых устройств

$$q_{\text{т.д}} = 29330 b_{\text{э.э}} N_{\text{т.д}} / (B Q_{\text{н}}^{\text{р}})$$

$$b_{\text{э.э}} = 0,32 - 0,340 \text{ кг.у т/ кВт}\cdot\text{ч}$$

$$N_{\text{т.д}} = V_{\text{д.г.}} \Delta p_{\text{г.т.}} / \eta_{\text{т.д}}$$

$$V_{\text{д.г.}} = (V_{\text{д.г.}}^0 + (\alpha - 1) V_{\text{в}}^0)$$

Материальный баланс топки

$$G_{\text{г}} = B + G_{\text{в}}^{\text{г}} + \sum G_{\text{в}}^{\text{тп}} - G_{\text{зола}},$$

$$m_{\text{г}} = 1 + \alpha_{\text{т}} m_{\text{в}}^0 + \Delta \alpha m_{\text{в}}^0 - A^{\text{р}} / 100.$$

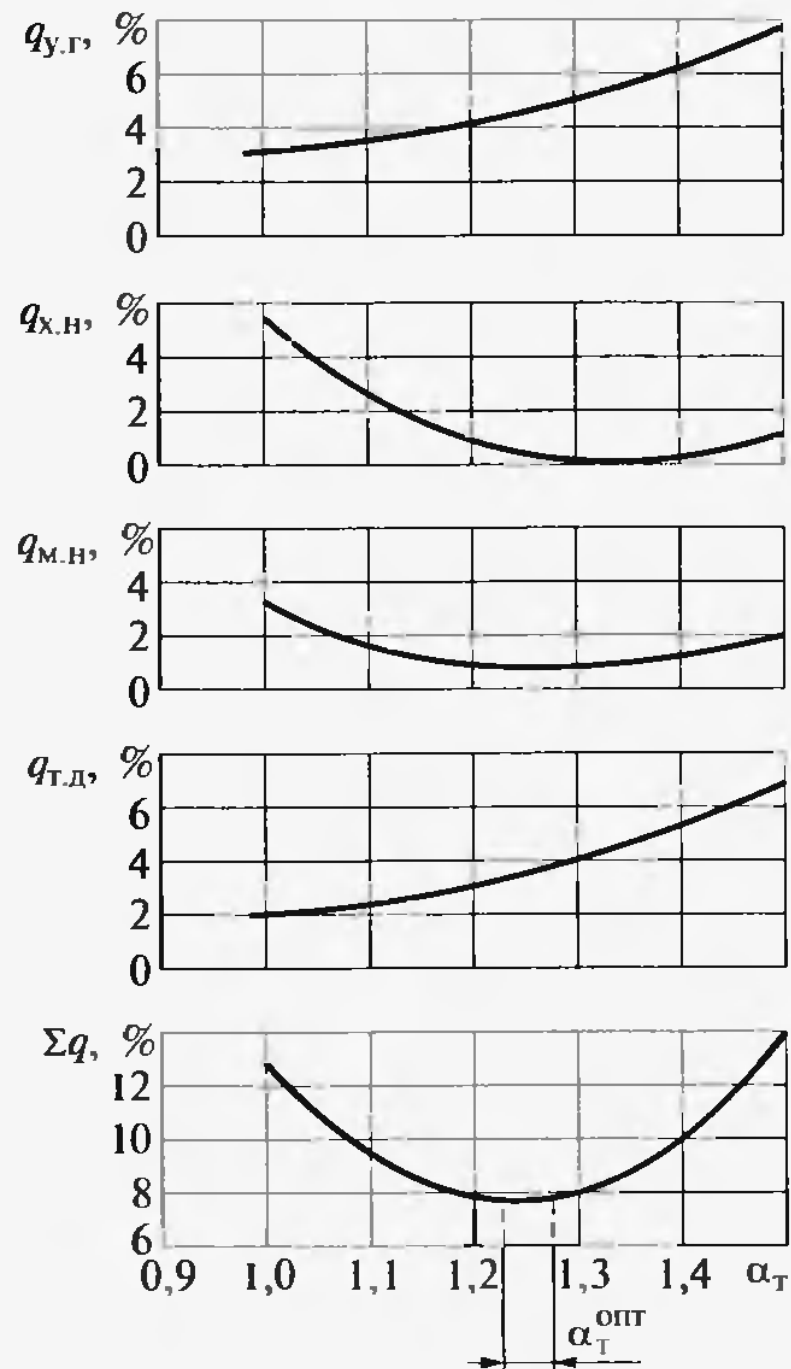


# Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха

$$\eta_{\text{э}} = 1 - \sum q = \max,$$

$$\sum q = q_{\text{у.г}} + q_{\text{х.н}} + q_{\text{м.н}} + q_{\text{т.д}} +$$

$$+ q_{\text{изол}} + q_{\text{золы}}$$

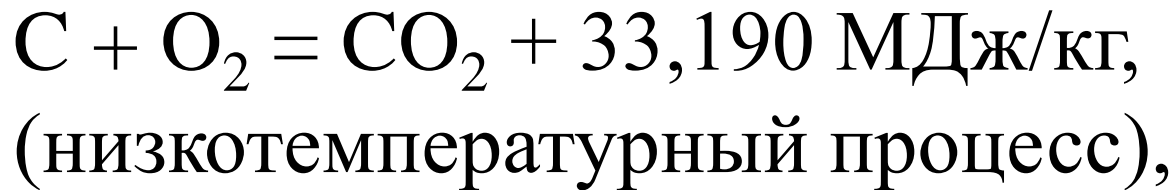


Технология сжигания топлива и конструкция топочных устройств должны обеспечивать поддержание такого значения коэффициента избытка воздуха, при котором сумма потери тепла с отходящими газами, и вследствие химической и механической неполноты сгорания, а также затрат на работу тягоудельных устройств была бы минимальной;

$$\sum q = q_{у.г} + q_{х.н} + q_{м.н} + q_{т.д} = \min$$

# Теория горения твердого углерода (кокса)

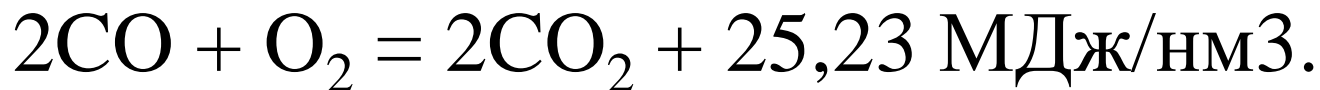
## 1 этап

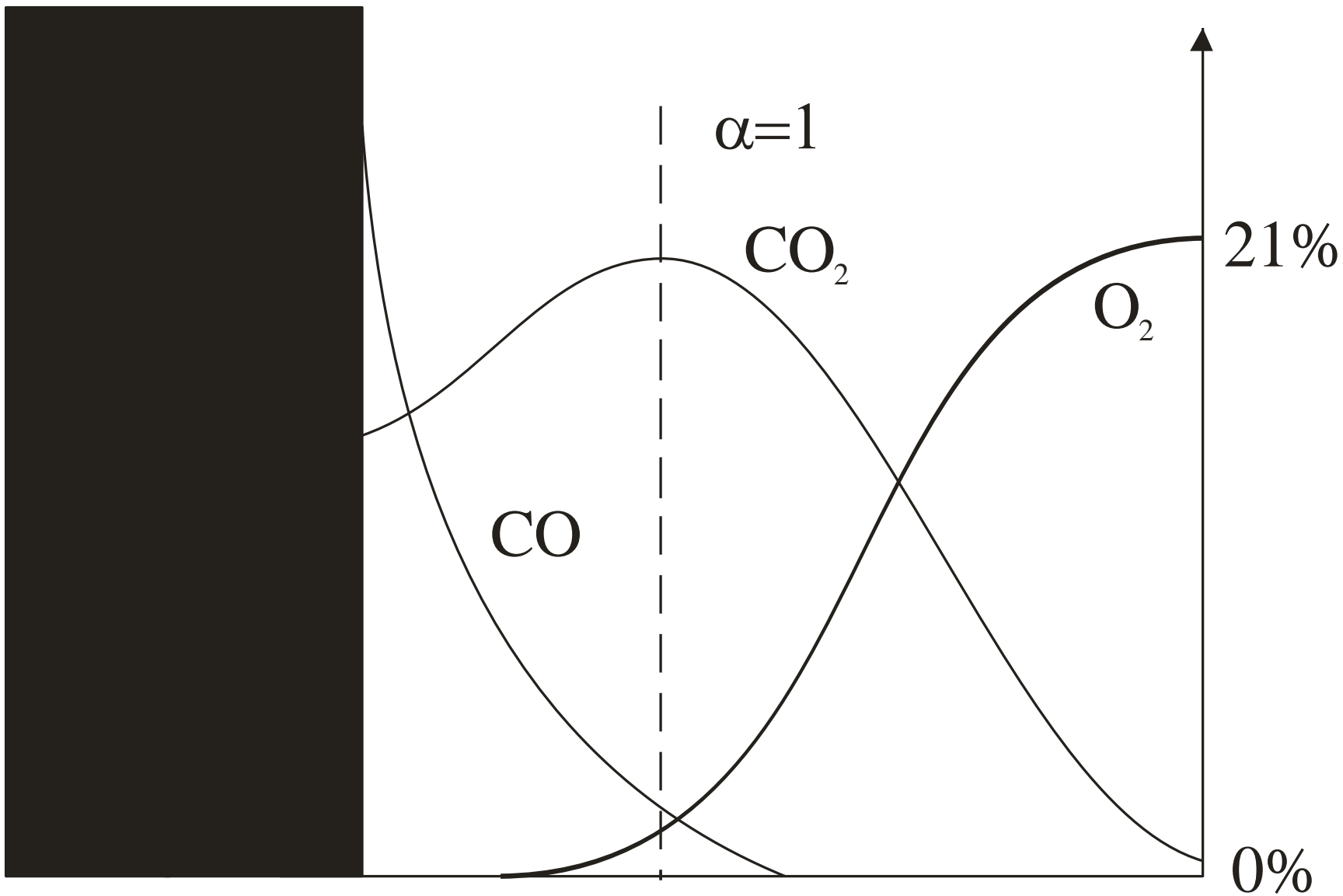


## 2 этап



## 3 этап





Следовательно, при горении твердого углерода, происходит его газификация превращающее его в газообразное топливо. Воспламенение продуктов газификации приводит к образованию фронта пламени.

# ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

$$V_{\Gamma} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866C^{\text{p}}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007S^{\text{p}}$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{N^{\text{p}}}{100 \cdot 1,251} + 0,79\alpha V_{\text{B}}^0 = 0,008N^{\text{p}} + 0,79\alpha V_{\text{B}}^0$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_{\text{B}}^0$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d\alpha V_{\text{B}}^0 \rho_{\text{возд}}}{100\rho_{\text{пара}}} + \frac{W^{\text{P}}}{100\rho_{\text{пара}}} + \frac{9H^{\text{P}}}{100\rho_{\text{пара}}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0161\alpha V_{\text{B}}^0 + 0,0124W^{\text{P}} + 0,111H^{\text{P}}$$

$$V_{\text{Г}} = 0,01866C^{\text{P}} + 0,007S^{\text{P}} + 0,008N^{\text{P}} + 0,111H^{\text{P}} + \\ + 0,79\alpha V_{\text{B}}^0 + 0,21(\alpha_{\text{T}} - 1)V_{\text{B}}^0 + 0,0161\alpha_{\text{T}}V_{\text{B}}^0 + 0,0124W^{\text{P}}$$

$$V_{\text{Г}} = 0,01866C^{\text{P}} + 0,007S^{\text{P}} + 0,008N^{\text{P}} + \\ + 1,0161\alpha_{\text{T}}V_{\text{B}}^0 - 0,21V_{\text{B}}^0 + 0,0124W^{\text{P}} + 0,111H^{\text{P}}$$