

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

План лекції

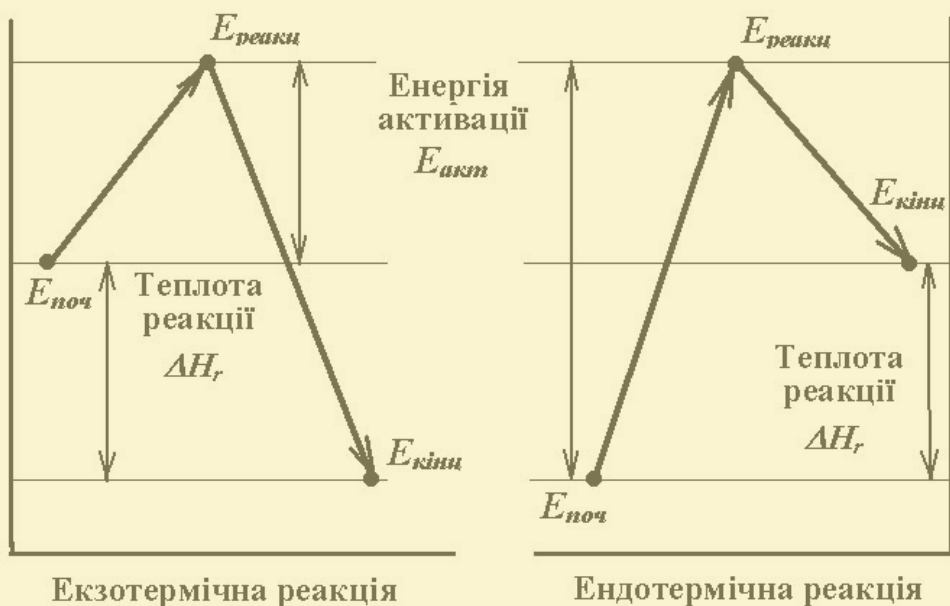
1. Тепловий ефект хімічної реакції.
2. Теплота згоряння. Види теплоти згоряння
3. Розрахунок теплоти згорання
4. Температура горіння речовини та її види
5. Розрахунок адіабатичної температури горіння

1. ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ

Тепловий ефект реакції — кількість теплоти, що виділяється чи поглинається системою при протіканні в ній необоротної хімічної реакції в умовах сталості температури і об'єму чи температури і тиску.

Початковий і кінцевий рівні енергії відрізняються між собою на величину теплоти реакції Q .

$$E_{\text{кін}} - E_{\text{поч}} = Q$$



- За I законом термодинаміки теплота хімічної реакції:

$$- dQ = dU + PdV = dH - VdP$$

- За незмінного тиску ($dP = 0$) теплота реакції виражається як різниця між ентальпією системи в початковому і кінцевому станах.

$$Q = - \int dH = - \Delta H$$

- За незмінного об'єму ($dV = 0$) теплота реакції виражається як різниця між внутрішньою енергією системи в початковому і кінцевому станах.

$$Q = - \int dU = - \Delta U$$

Стандартна теплота реакції - різниця між стандартними теплотами утворення продуктів реакції і вихідних речовин.

$$Q = - \left(\sum n_{\text{кін}} \Delta H^{\circ}_{\text{f кін}} - \sum n_{\text{поч}} \Delta H^{\circ}_{\text{f поч}} \right),$$

Стандартна теплота утворення речовини $\Delta H^{\circ}_{\text{f}}$
- теплота утворення одного молю речовини із елементів, за стандартних умов ($P=101,3\text{кПа}$, $T=298\text{К}$).

2. ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ. ВИДИ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ

Теплота згоряння – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за стандартних умов.

$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_{i=1}^n n_{\text{пг}_i} \Delta H_{\text{ф}_{\text{пг}_i}}^{\circ} - \sum n_{\text{гс}} \Delta H_{\text{ф}_{\text{гс}}}^{\circ}$$

Оскільки реакція горіння складається на 1 моль горючої речовини, а горюча суміш містить горючу речовину, та прості речовини - кисень й азот, тепловий ефект реакції горіння становить:

$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_{i=1}^n n_{\text{пг}_i} \Delta H_{\text{ф}_{\text{пг}_i}}^{\circ} - \Delta H_{\text{ф}_{\text{гр}}}^{\circ}$$

Розрізняють теплоти згоряння:

молярну Q – розрахунок на 1 моль горючої речовини

(кДж/моль) за законом Гесса:

$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum_{i=1}^n n_{\text{пг}i} \Delta H_{\text{ф} \text{пг}i}^{\circ} - \sum \Delta H_{\text{ф} \text{гр}}^{\circ} \right|$$

масову Q' - розрахунок на 1 кг горючої речовини

(кДж/кг),

$$Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu}$$

об'ємну Q'' - розрахунок на 1 м³ горючої речовини

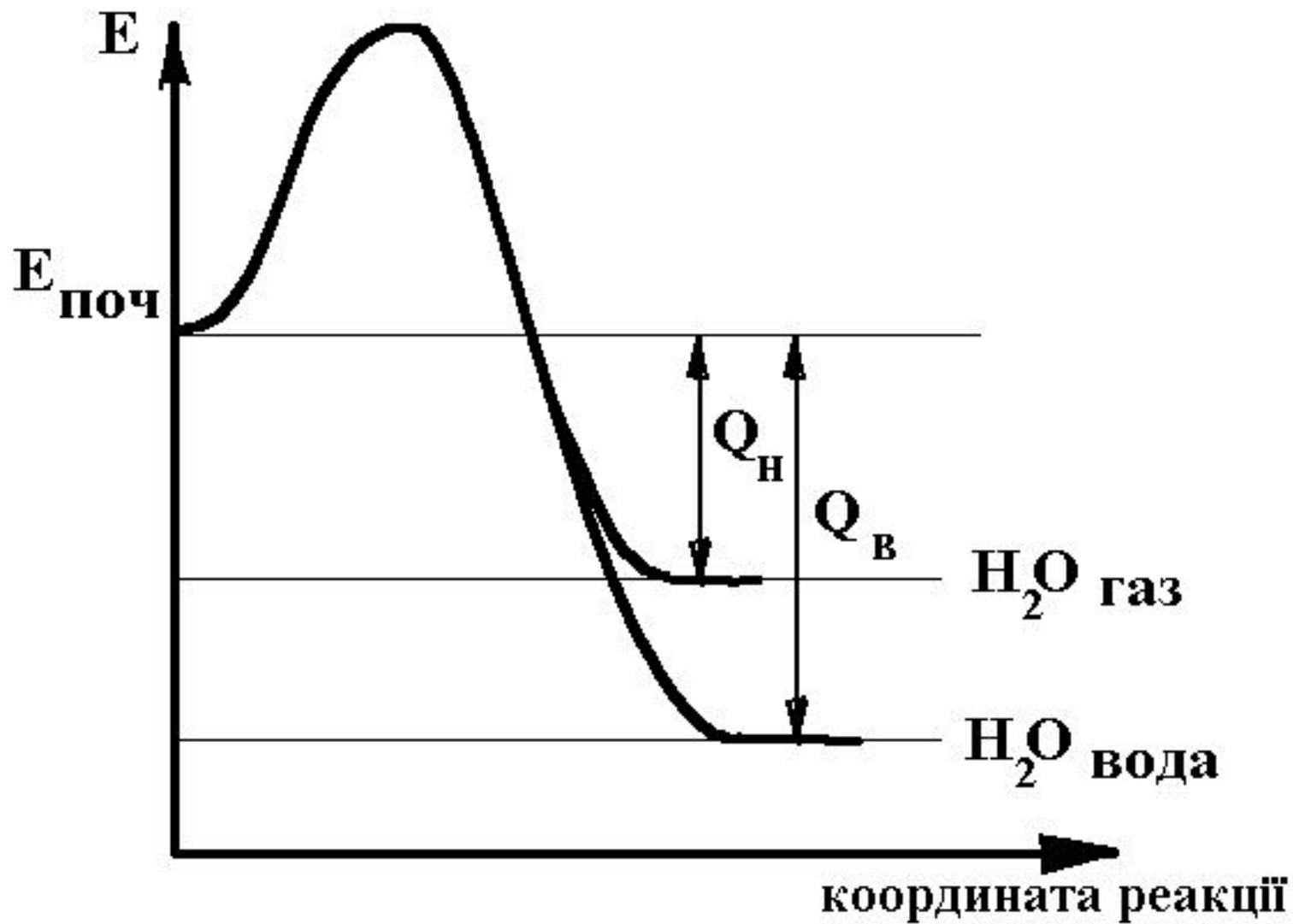
(кДж/м³).

$$Q''_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{V_{\mu}}$$

Залежно від агрегатного стану води, яка утворилася в процесі горіння і знаходиться в продуктах горіння, розрізняють **вищу** та **нижчу** теплоту згоряння.

Вища теплота згоряння Q_v - кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини при умові, що вода у продуктах згоряння знаходиться у **сконденсованому (рідкому)** стані.

Нижча теплота згоряння Q_n - кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини при умові, що вода в продуктах горіння знаходяться в **газоподібному** стані.



$$Q_B - Q_H = Q_{\text{конденс}}$$

У разі урахуванні чинників, які впливають на теплоту згоряння речовини (повнота згорання, вологість матеріалу, втрати на теплове випромінювання), говорять про **практичну або робочу теплоту згоряння матеріалу Q_H^P** .

3. РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ

- Горюча речовина індивідуального хімічного складу – за законом Гесса

- Складні горючі матеріали:

- суміш газів

$$Q_{\text{H(в)сум}}^{//} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{H(в)}i}^{//} \frac{\varphi_i}{100}$$

ФОРМУЛА МЕНДЄЛЄЄВА

Вища теплота згоряння:

$$Q_{\text{в}}' = 339,4 \cdot \varphi_{\text{C}} + 1256,8 \cdot \varphi_{\text{H}} + 108,9(\varphi_{\text{S}} - \varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{N}}), \text{ кДж/ кг}$$

де φ_{C} , φ_{H} , φ_{S} , φ_{O} , φ_{N} , - вміст атомів у горючій речовині, % мас.

Нижча теплота згоряння:

$$Q_{\text{H}}' = Q_{\text{в}}' - 25,1(9 \cdot \varphi_{\text{H}} + W\%), \text{ кДж/ кг}$$

де $W\%$ - вміст вологи у горючій речовині, %.

Практичне значення теплоти згоряння

- 1). Розрахунок пожежної навантаги $R_{\text{пож}}$ – це кількість тепла, що виділяється при згорянні усіх речовин з одиниці площі приміщення.

$$R_{\text{пож}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot Q'_{\text{нi}}}{S_{\text{підл}}}, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$$

- 2). Визначення горючості речовини: негорючі - не відносяться до вибухонебезпечних та їх нижча теплота згоряння менша за **2100 кДж/кг** для твердих речовин або **1830 кДж/м³** для газів.
- 3). Розрахунок параметрів пожежної небезпеки речовин: температура горіння, температура вибуху, максимальний тиск вибуху, концентраційні межі поширення полум'я.

4. ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ РЕЧОВИНИ ТА ЇЇ ВИДИ

Температура горіння - температура, до якої нагріваються продукти горіння за рахунок теплоти згоряння.

За спрощеннями у розрахунку розрізняють такі температури горіння:

- **калориметричну,**
- **теоретичну,**
- **адіабатичну,**
- **дійсну.**

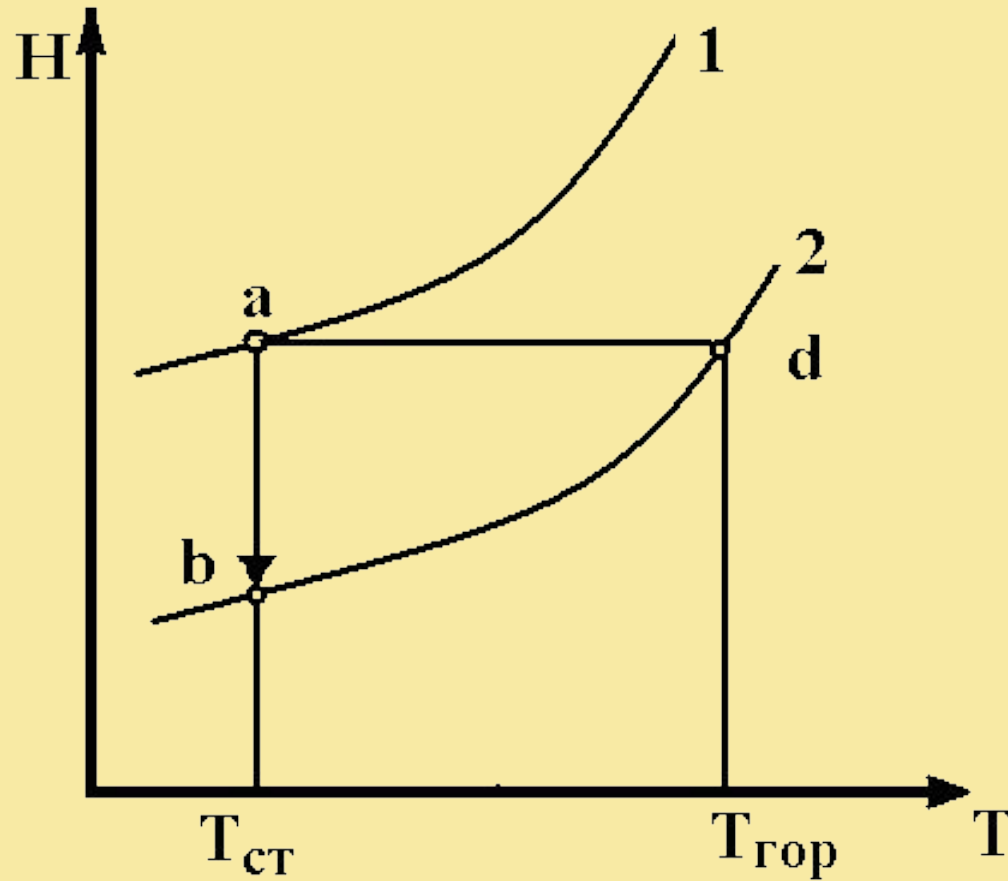
Калориметрична - виконуються наступні умови:

- 1) стандартні умови;
- 2) повне згоряння
(стехіометрична концентрація);
- 3) немає дисоціації продуктів горіння;
- 4) немає тепловтрат.

Все тепло реакції іде на нагрів продуктів горіння, вода у продуктах горіння знаходиться в газоподібному стані, тому враховують **нижчу теплоту згоряння**.

$$Q_{\text{нед}} = Q_{\text{твт}} = 0, \quad Q_{\text{нагрів пг}} = Q_{\text{н}}$$

тепловий баланс: якщо $P = \text{Const}$: $\sum n_{\text{вих}} H_{\text{Авих}}^{T_0} = \sum n_{\text{кін}} H_{\text{Акін}}^{T_{\text{гор}}}$
 якщо $V = \text{Const}$: $\sum n_{\text{вих}} U_{\text{Авих}}^{T_0} = \sum n_{\text{кін}} U_{\text{Акін}}^{T_{\text{виб}}}$



Якщо процес є адіабатичним, зміна ентальпії системи дорівнює

Залежність ентальпії від температури:

$$H_{(T)} = H_{ст} + \overline{C_p} (T - T_{ст})$$

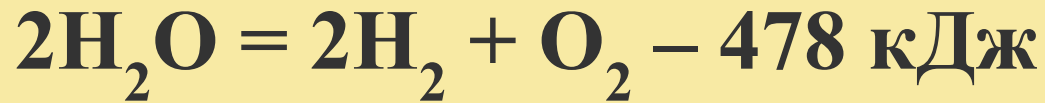
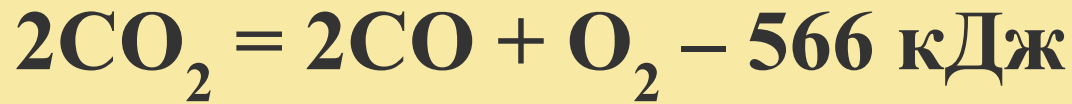
де $H_{ст}$ – теплота реакції, за стандартних умов.

Тепло на розігрів ПГ передається
конвективним шляхом $Q_{кон}$:

$$Q_{кон} = v_{пг} C_p (T_{гор} - T_0)$$

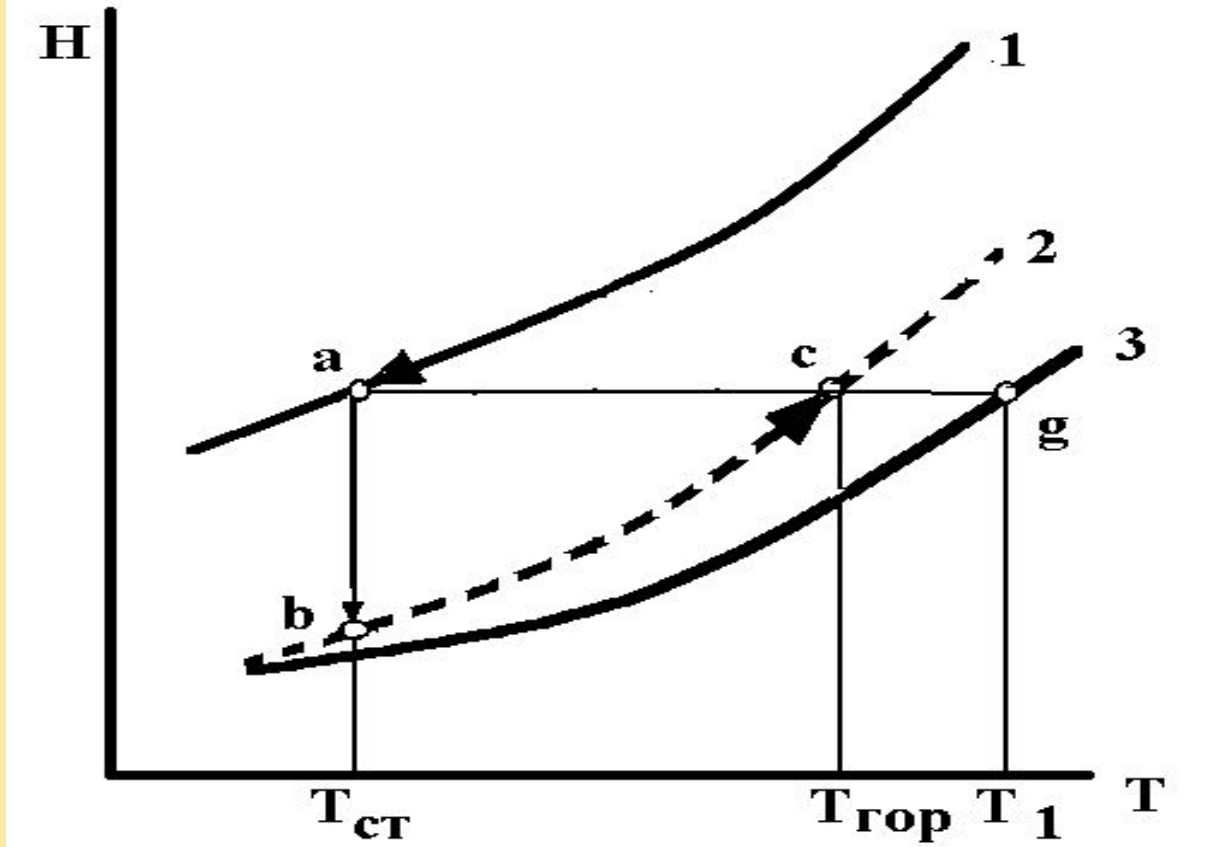
$$T_{гор_{кал}} = T_{ст} + \frac{Q_H}{\sum n_{кін} C_{p_{кін}}}$$

Якщо $T_{гор}$ значна, то продукти горіння дисоціюють із витратою енергії на цей процес.



Теоретична температура горіння враховує умови:

- 1) стандартні умови;
- 2) повне згоряння (стехіометрична концентрація);
- 3) дисоціація продуктів горіння;
- 4) немає тепловтрат.



$$\alpha=1$$

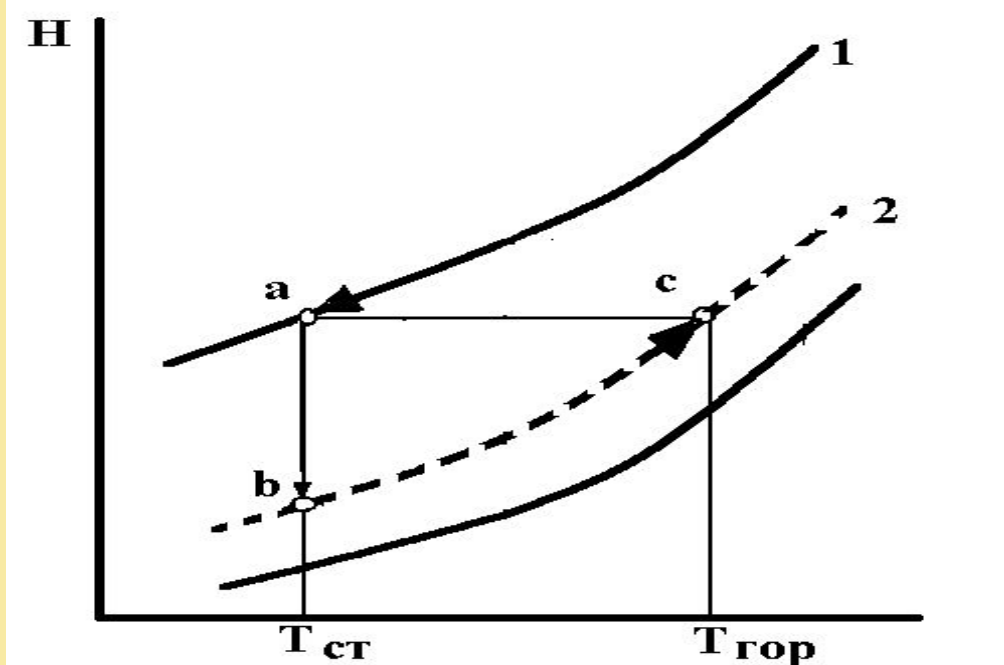
$$Q_{\text{нед}} = Q_{\text{ТВТ}} = 0 \quad Q_{\text{нагрів}}_{\text{пг}} = Q_{\text{гор}} - Q_{\text{дис}}$$

$$T_{\text{гортеор}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{дисоц}}}{\sum n_{\text{кін}} C_{p_{\text{кін}}}} + T_{\text{ст}}$$

Адіабатична температура горіння

- 1) стандартні умови;
- 2) враховується надлишок повітря;
- 3) продукти горіння не дисоціюють;
- 4) тепловтрат немає.

$$\alpha_{\text{п}} \geq 1; \quad Q_{\text{нед}} = Q_{\text{твт}} = 0; \quad Q_{\text{нагрів}}_{\text{пг}} = Q_{\text{гор}}$$



$$T_{\text{гор ад}} = \frac{Q_{\text{н}}}{C_p V_{\text{пг}}} + T_{\text{ст}}$$

Дійсна температура горіння враховує нагрів продуктів горіння за реальних умов:

- 1) є надлишок повітря,
- 2) враховують усі види тепловтрат,
- 3) фактичні початкові умови.

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{твт}} - Q_{\text{недоп}}}{C_p V_{\text{пг}}} + T_{\text{ст}}$$

4) Враховано недопал $Q_{\text{недоп}}$ (неповне згоряння).

$$Q_{\text{нед}} = (1 - \eta) Q_{\text{н}},$$

де η - коефіцієнт повноти згоряння $\eta = 0,95 \div 0,75$

5. РОЗРАХУНОК АДІАБАТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ГОРІННЯ

5.1. Визначення температури горіння із використанням ентальпії продуктів горіння

Індивідуальна речовина	Складна речовина
1. Скласти рівняння реакції горіння.	
2. Визначити питомий теоретичний об'єм повітря	
$v_{\text{п}}^0 = 4,76\beta, (\text{м}^3 / \text{м}^3, \text{ моль/моль})$	$v_{\text{п}}^0 = 0,267 \left(\frac{\text{C}}{3} + \text{H} + \frac{\text{S} - \text{O}}{8} \right), \text{ м}^3 / \text{кг}$ $v_{\text{п}}^0 = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \varphi_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21}, \text{ м}^3 / \text{м}^3$

3. Визначити $v_{\text{пр}}^0$

$$v_{\text{пр}}^0 = n_{\text{пр}}^0 V_{\mu}/\mu \text{ (м}^3/\text{кг)}$$

$$v_{\text{пр}}^0 = \sum v_{\text{пр}i} \text{ (за таблицею), (м}^3/\text{кг)}$$

4. Визначити питомий дійсний об'єм продуктів згоряння з урахуванням $\Delta v_{\text{п}}$;

$$v_{\text{пр}} = v_{\text{пр}}^0 + (\alpha_{\text{п}} - 1) v_{\text{п}}^0, \text{ (м}^3/\text{кг, м}^3/\text{м}^3)$$

5. Визначити нижчу теплоту згоряння речовини

За законом Гесса

$$Q_{\text{н}} = \left| \sum_i n_i \Delta H_{\text{fпр}i}^0 - \Delta H_{\text{fгг}}^0 \right|, \text{ кДж/моль}$$

для суміші газів

$$Q_{\text{н}}'' = \sum r_i Q_{\text{н}i}'', \text{ кДж/м}^3$$

для конд. речовин

$$Q_{\text{н}}' = 339,4 \cdot \varphi_{\text{C}} + 1256,8 \cdot \varphi_{\text{H}} + 108,9 (\varphi_{\text{S}} - \varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{N}}) - 25,1(9 \cdot \varphi_{\text{H}} + W\%), \text{ кДж/кг}$$

6. Визначити середню ентальпію продуктів згоряння $\Delta H_{\text{ср}}$

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{v_{\text{пр}}}$$

7. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначити температуру горіння T_1 у першому наближенні

8. Визначити теплоту продуктів горіння $Q_{\text{пг } T_1}$ за температури горіння T_1

$$Q_{\text{пг } T_1} = \sum \Delta H_i \cdot n_{\text{пг } i},$$

Особливістю є те, що визначення теплоти продуктів горіння ведеться за таблицями об'ємної ентальпії продуктів горіння

9. Визначити температуру горіння в другому наближенні T_2 , виходячи з того, що $T_2 < T_1$, якщо $Q_{\text{пг } 1} > Q_{\text{н}}$, або $T_2 > T_1$, якщо $Q_{\text{пг } 1} < Q_{\text{н}}$;

10. Визначити теплоту продуктів горіння $Q_{\text{пг } T_2}$ за температури горіння T_2

$$Q_{\text{пг } T_2} = \sum \Delta H_i \cdot n_{\text{пг } i}, \text{ кДж/моль};$$

11. Визначити температуру горіння методом лінійної інтерполяції

$$T_{\text{гор}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(Q_{\text{н}} - Q_{\text{пг } 1})}{(Q_{\text{пг } 2} - Q_{\text{пг } 1})},$$

5.2. Розрахунок температури горіння із використанням теплоємності продуктів горіння

$$T_{\text{гор ад}} = \frac{Q_{\text{н}}}{v_{\text{пг}} C_{\text{рпг}}} + T_{\text{ст}}$$

Середня теплоємність продуктів горіння залежить від їх температури:

$$C_{\text{р}}^{\circ} = a_{\text{сум}} + b_{\text{сум}} t_{\text{гор}}, \text{ кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К}); \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

де $t_{\text{гор}}$ - температура продуктів горіння, °С.

$$a_{\text{сум}} = \sum a_i v_{\text{пгі}}; \quad b_{\text{сум}} = \sum b_i v_{\text{пгі}}$$

Температура горіння розраховується за формулою:

$$t_{\text{ад}} = \frac{-a_{\text{сум}} + \sqrt{a_{\text{сум}}^2 + 4b_{\text{сум}} Q_{\text{н}} \cdot 10^3}}{2b_{\text{сум}}}$$

Завдання на самопідготовку

1. Література

- Демидов, Шандиба, Щеглов, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 29 – 33.
- Демидов, Саушев, Горіння та властивості горючих речовин, стор. 24-42.

2. Провести розрахунок теплоти згорання та енергетичного балансу горіння речовини згідно індивідуального завдання.